

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
(РОСГИДРОМЕТ)

ОЧЕРКИ
ПО ИСТОРИИ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ
СЛУЖБЫ РОССИИ

Том
3

Книга I



Санкт-Петербург
Гидрометеоиздат
2005

Редакционная коллегия:

А. И. Бедрицкий (председатель), С. И. Авдюшин, В. Г. Блинов (отв. секретарь), Е. П. Борисенков (научный редактор 3-го тома), В. М. Борисенко, И. И. Бурцев, А. А. Васильев, А. И. Гусев, Ю. А. Израэль, А. Д. Клещенко, А. В. Карпов, В. П. Мелешко, А. И. Минаев, В. М. Пасецкий, В. А. Тренин, А. И. Угрюмов, А. Б. Успенский, А. А. Черников, И. Е. Фролов, И. А. Шикломанов

Предлагаемая вниманию читателей книга является третьим, завершающим, томом трехтомной серии „Очерки по истории Гидрометеорологической службы России”. В третьем томе рассматриваются основные этапы послевоенного восстановления в значительной мере разрушенных в годы Великой Отечественной войны органов Гидрометслужбы и в особенности гидрометеорологической сети на оккупированной территории, а также этапы развития Гидрометслужбы начиная с 1960-х годов и в последующем.

Многие очерки посвящены как развитию традиционных направлений деятельности Гидрометслужбы, так и становлению и развитию новых возлагаемых на Службу направлений деятельности, таких как изучение Арктики и Антарктики, охрана окружающей среды, активные воздействия на гидрометеорологические процессы, создание гелиогеофизической службы и др.

Ряд очерков посвящен развитию новых технических средств и технологий, связанных с внедрением вычислительной техники, с созданием систем связи и автоматизированных технологий сбора и обработки информации, спутниковых методов исследований и их внедрением в оперативную работу и др.

Показывается возросшая роль Гидрометслужбы в решении крупных народнохозяйственных задач, ее влияние на развитие международного сотрудничества в области гидрометеорологии.

This book is the third and the final volume of the 3-volume series entitled "Essays on History of the Russian Hydrometeorological Service". The third volume considers the main stages of the post-war reconstruction of the Service bodies, which were mostly destroyed during the Second World War, especially on the occupied territories, as well as the stages of the Service rapid development, starting with 1960's.

Many essays describe the development of traditional fields of the Hydrometeorological Service activities, as well as establishment of new directions, such as investigation of Arctica & Antarctica, environmental protection, weather modification, organization of heliogeophysical service, etc.

A number of essays is devoted to the development of new technical means in the field of computer technologic, organization of communication network and automatic means of data collection and processing, satellite activities of the Service in operational practice, etc.

One can see the growing role of Hydrometeorological Service in solving the main economical problems, as well as in international cooperation in hydrometeorology.

О 1805040400-25

069(02)-05

ISBN 5-286-01332-5

ISBN 5-286-01517-4

© Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), 2005 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Более тысячелетия отделяет нас от того времени, когда на Руси зародилась народная служба погодоведения, развивавшаяся от столетия к столетию и донесшая до нас хотя и скудную, но достаточно обширную информацию о природных катаклизмах, происходивших на Руси, и их последствиях. Эта и другая природо-ведческая информация позволила создать „Свод экстремальных природных явлений” на территории России и сопредельных с ней государств за последние две с половиной тысячи лет и показать их заметное влияние на экономику и социальную жизнь общества.

Полученные данные убедительно свидетельствуют о большом влиянии природных явлений на различные стороны хозяйственной деятельности. Особенно это касается России, территория которой наиболее часто подвергается воздействию неблагоприятных природных явлений. Достаточно упомянуть, что только за последнее тысячелетие на территории нашей страны отмечено 360 засух, 207 дождливых лет, 293 холодные зимы, 137 небывалых половодий, 80 случаев морозов в конце лета, 93 года с нашествием вредителей и эпизоотиями. В результате только за второе тысячелетие Россия перенесла 433 голодных года.

Указанные обстоятельства определили тот закономерный интерес, который проявляли многие государственные деятели России к организации наблюдений за погодой и ее влиянием на урожай, мореплавание, ведение военных действий, а по мере развития научно-технического прогресса и на все другие стороны хозяйственной деятельности. Это проявилось и в период царствования Алексея Михайловича, по приказу которого начали вестись записи о погоде, сохранившиеся за период 1657—1677 гг.

Вслед за этим царь Петр I в законодательном порядке ввел в русском флоте вахтенные журналы, куда записывались наблюдения за погодой. Петр I сам вел такие наблюдения.

При Екатерине II в Петербурге была введена служба не-вских наводнений, а также служба эстафетных сообщений о погоде, ценах на хлеб и видах на урожай.

Естественным продолжением этих усилий явилось создание 13 апреля 1834 г. в Петербурге при Горном ведомстве Нормальной магнитно-метеорологической обсерватории с подчиненными

ей филиалами. С этого времени и ведет свое начало официальная Гидрометеорологическая служба России, 165-летие которой в 1999 г. широко было отмечено научной общественностью страны и мира. Одновременно с этим юбилеем был отмечен 150-летний юбилей Главной физической, ныне ордена Трудового Красного Знамени Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, образованной в 1849 г. на базе Нормальной обсерватории, а также были отмечены 200-летие со дня рождения основателя гидрометслужбы академика А. Я. Купфера и 270-летие начала инструментальных метеорологических наблюдений в России.

В связи с этими датами был задуман выпуск трехтомной серии „Очерков по истории Гидрометеорологической службы России”.

Издание трехтомной серии в какой-то мере должно помочь читателям оценить исторические предпосылки, приведшие к созданию Гидрометслужбы страны, осмыслить основные этапы ее становления и развития, всевозрастающий круг решаемых ею задач и неизбежность принятия экстраординарных мер по дальнейшему развитию Службы.

В 1997 г. был выпущен первый том „Очерков”, посвященный изложению основных событий из истории отечественной гидрометеорологии с древних времен и до конца XIX столетия, на которое падает начальный период организации и становления Гидрометслужбы России.

В 1999 г. к юбилею Службы был издан второй том „Очерков”, посвященный достаточно насыщенному периоду развития Гидрометслужбы России начиная с рубежа XIX и XX столетий и до конца Великой Отечественной войны 1941—1945 гг.

В указанных двух томах, охватывающих более чем столетний период становления, развития и преобразования Гидрометслужбы страны, изложены события, результатом которых явилось создание в России единой постоянно действующей регулярной сети наблюдений, территориальных органов и организаций Гидрометслужбы, целого ряда центральных и региональных научно-исследовательских институтов. Все это позволило Гидрометслужбе страны занять важную, а во многих отношениях ведущую роль в обеспечении развития экономики страны, прежде всего ее промышленного и сельскохозяйственного производства, в обеспечении боевых действий войск в период Первой и Второй мировых войн, в осуществлении крупных народнохозяйственных проектов

и планов, в организации и развитии международного сотрудничества в области гидрометеорологии.

Настоящий том „Очерков” является завершающим томом этой серии. Этот том охватывает период бурного развития Гидрометслужбы страны в послевоенный период, особенно с начала 60-х годов XX столетия. В нем изложены также основные события, происходившие в Службе в довольно сложный период последнего десятилетия XX века, когда с распадом СССР распалась централизованная Гидрометслужба и на ее базе были организованы национальные службы государств—членов СНГ.

Для этого периода было характерно развитие новых технических средств и переоснащение сети и систем наблюдений. В это время происходило бурное внедрение вычислительной техники, новых систем телесвязи, новых средств наблюдений, таких как космические, автоматизированных систем сбора и обработки информации, систем наблюдений на водных объектах.

На Службу был возложен ряд новых функций, в том числе по изучению Арктики и Антарктики и Мирового океана, по развитию исследований и службы активных воздействий на атмосферные явления и процессы, по изучению режима рек и водных объектов, по агрометеорологии и др. Все это привело к появлению принципиально новых технологий, — начиная от автоматизированных и полуавтоматизированных наблюдательных систем и кончая автоматизированными системами сбора, обработки и распространения гидрометеорологической информации, к созданию автоматизированного фонда данных об окружающей среде.

Совершенно новые функции были возложены на Гидрометслужбу в области мониторинга окружающей среды, включая атмосферу, гидросферу, океан, поверхность суши, в области контроля за состоянием окружающей среды и источниками ее загрязнения, в области нормирования выбросов загрязняющих компонентов в окружающую среду. Новые функции были возложены на Службу в области создания гелиогеофизической службы.

Начиная с 1970-х годов Гидрометслужба стала одним из ведущих ведомств страны по новой проблеме — проблеме глобального изменения климата. Хотя работы в области климата проводились в Службе и ранее, они имели в основном прикладной аспект. Новая задача, имеющая глобальный характер, потребовала организации работ по таким направлениям, как мониторинг

изменений климата, мониторинг парниковых газов, моделирование климата и его изменений, влияние изменений климата на экономику, природную среду и население, адаптация к происходящим и ожидаемым климатическим изменениям и др.

Весь этот комплекс новых задач, решаемых на базе достижений научно-технического прогресса и прежде всего спутниковых методов исследований, других дистанционных средств зондирования атмосферы, численных методов анализа и прогноза гидрометеорологических процессов, существенно преобразил облик Гидрометслужбы и повысил ее роль в общем комплексе управления хозяйственной деятельностью страны.

Все перечисленные обстоятельства обусловили специфику построения и написания очерков, входящих в третий том. Если первые два тома были написаны несколькими авторами, то к подготовке большинства представленных в третьем томе очерков был привлечен достаточно большой состав исполнителей. С одной стороны, это способствовало более полному представлению существа излагаемых вопросов, а с другой — привело к „технологичности” изложения, что лишает очерки живой формы. В то же время в этот том включен практически весь доступный на момент завершения подготовки рукописи материал, позволяющий судить о многообразии решаемых Службой задач и их важности в народнохозяйственном комплексе страны.

В силу ряда обстоятельств третий том очерков не охватывает всех сложившихся сейчас направлений деятельности Службы. Это связано, в первую очередь, с тем, что работа по подготовке ряда статей (например, в области исследований климата и его изменений) потребовала сбора, обобщения и анализа значительного объема разнородных материалов и документов и не могла быть завершена к моменту окончания работы над текстом уже готовых статей третьего тома. По мере готовности таких статей предполагается выпустить соответствующие дополнения и впоследствии издать третий том в новой, расширенной редакции.

За последний период в организациях Гидрометслужбы был подготовлен ряд публикаций, касающихся различных аспектов ее истории. Например, в журнале „Метеорология и гидрология” начиная со 2-й половины 1990-х годов стали публиковаться очерки по истории гидрометеорологических станций и обсерваторий, центров и управлений по гидрометеорологии и мониторингу

окружающей среды. В Гидрометеоздате только за последний период вышли в свет монография ВНИИСХМ „Развитие сельскохозяйственной метеорологии в России”, очерки Северного УГМС „История развития гидрометслужбы на европейском севере России”, сборник воспоминаний ветеранов Якутского УГМС „Гидрометеорологи у полюса холода”, очерки Забайкальского УГМС „История развития гидрометслужбы Забайкалья”, „История региональной гидрометслужбы России: Курский край, 1802—2002”, подготовленная в УГМС ЦЧО, воспоминания об известном исследователе Арктики и Антарктики В. С. Сидорове „Вся моя жизнь — сплошное счастье...”. УГМС ЦЧО выпущен сборник документов, посвященных династии гидрометеорологов Вангенгеймов—Поповых. Нельзя обойти вниманием и фундаментальный труд „Очерки развития гидрометеорологии в Средней Азии”, подготовленный Среднеазиатским региональным научно-исследовательским гидрометеорологическим институтом имени В. А. Бугаева и выпущенный Гидрометеоздатом в 1993 г. Отсылаем внимательного читателя к этим и другим публикациям, посвященным различным страницам истории отечественной Гидрометслужбы.

Деятельность Службы в постсоветский период проходила в непростое время — на фоне политических и экономических преобразований в нашей стране. Еще в советское время, с 1987 г., начала резко сокращаться сеть гидрометеорологических наблюдений. Так, за период 1987—1991 гг. количество станций уменьшилось на 533, или на 20,87 % (с 2553 до 2020), а постов — на 963, или на 20,27 % (с 4779 до 3816). Кризис, охвативший все стороны жизни России в 1992—1999 гг., самым негативным образом отразился на состоянии и возможностях Гидрометслужбы. В первую очередь это опять коснулось наблюдательной сети — ее вынужденно сокращали вплоть до 1999 г. За восемь лет количество станций сократилось на 228, или на 11,29 % (с 2020 до 1792), а постов — на 772, или на 20,23 % (с 3816 до 3044). Вместе с тем благодаря энтузиазму и самоотверженности специалистов Службы ее деятельность не только не прекращалась, но и была направлена на сохранение потенциала и на развитие. С 2000 г. идет рост числа станций и постов — за счет восстановления старых и открытия новых. В 1994 г. отечественная спутниковая метеорологическая система пополнилась первым российским гео-

стационарным ИСЗ. Это было важным вкладом и в выполнение международных обязательств России. Тенденции развития гидрометеорологических служб мира и потребности государства в защите населения от опасных атмосферных процессов и явлений (смерчи, ураганы и т. п.) потребовали значительного развития систем раннего предупреждения на базе метеорологических радиолокаторов. В последние годы Гидрометслужбой проводится активное наращивание сети МРЛ в Европейском регионе России для создания единого радиолокационного кольца, объединенного с аналогичными системами Беларуси, Украины, стран Балтии и Финляндии.

С 1930-х годов Гидрометслужба огромное внимание уделяла работам в Арктике. Уже с первой дрейфующей станции СП-1 стала поступать уникальная научная информация об атмосфере, океане, морском льде этого полярного бассейна. До 1992 г. эти работы в Арктике проводились на постоянной основе и получили высокую оценку в стране. В 2004 г. успешно завершила работу станция СП-32, положившая начало восстановления постоянно присутствия России на Северном полюсе планеты. С сентября 2004 г. начала работать дрейфующая станция СП-33.

Огромного напряжения сил всех работников Гидрометслужбы потребовала Чернобыльская авария. Специалисты Службы с момента катастрофы и до сегодняшнего дня продолжают нелегкий труд по радиационному мониторингу последствий Чернобыля. Выпущенный в содружестве с рядом министерств и ведомств и при международной кооперации „Атлас загрязнения Европы цезием после Чернобыльской аварии” вносит важный вклад в ликвидацию последствий этой глобальной катастрофы XX века.

Служба по-прежнему является одной из влиятельных в международных кругах и во Всемирной метеорологической организации, а ее руководитель в 2003 г. был избран Президентом Всемирной метеорологической организации.

К успеху последнего периода следует отнести разработку и принятие в 1998 г. Федерального Закона „О гидрометеорологической службе”. Закон содержит как правовые основы, так и порядок функционирования Службы, включающий формирование и обеспечение функционирования государственной наблюдательной сети, формирование государственных информационных ресурсов в области гидрометеорологии, обеспечение единства и со-

поставимости методов измерений, участие в международном сотрудничестве и др. Все это открывает широкие перспективы для развития гидрометеорологии в новом тысячелетии.

В последние годы реализован ряд важных перспективных разработок и решений по моделям и технологиям прогнозов и режимных расчетов, по приборам и методам наблюдений, сбору, обработке и хранению информации, по развитию средств связи и вычислительных средств. В настоящее время прогностическая деятельность Мирового метеорологического центра „Москва”, а также экспериментальные долгосрочные прогнозы погоды основываются на гидродинамических моделях и технологиях численных прогнозов. После установки в 1996 г. первого в Гидрометслужбе суперкомпьютера „Крэй” широкое развитие получили новые прогностические технологии. Это позволило существенно увеличить оправдываемость и заблаговременность прогнозов погоды.

Значительное внимание уделяется разработке и реализации концепции гидрометеорологической безопасности, защите населения и экономики от воздействия неблагоприятных и опасных погодноклиматических факторов. 16 апреля 2004 г. Совет глав Правительств СНГ принял Концепцию гидрометеорологической безопасности Содружества Независимых Государств, инициатором и активным разработчиком которой был Росгидромет. Разрабатываются и совершенствуются методы экономической оценки использования гидрометеорологических прогнозов и предотвращения ущерба в отраслях экономики.

Роль Гидрометслужбы в обеспечении устойчивого развития общества, повышении эффективности производства все больше осознается как в нашем государстве, так и на международном уровне, и такие тенденции можно только приветствовать. Но это требует и адекватного повышения ответственности специалистов Службы за качество работы и ее результаты. Сохраняется актуальность решения проблем соответствия Службы технологическому уровню на современном этапе и в перспективе, равноправного и достойного участия в международном сотрудничестве и кооперации.

Третий том „Очерков” снабжен списком основных памятных дат из истории Гидрометслужбы и именованным указателем, относящимся ко всем трем томам. В связи с большим объемом информации третий том „Очерков” выпущен в двух книгах.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ В ПОСЛЕВОЕННЫЙ ПЕРИОД

После декрета Совета Народных Комиссаров, подписанного В. И. Лениным 21 июня 1921 г. „Об организации метеорологической службы РСФСР”, которым руководство всем метеорологическим делом в РСФСР было возложено на Главную физическую обсерваторию, произошел ряд важных организационных преобразований Гидрометслужбы.

Так, постановлением ЦИК и СНК СССР от 7 августа 1929 г. был образован Гидрометеорологический комитет Союза ССР при Совете Народных Комиссаров Союза ССР, которому были подчинены все разрозненные гидрометслужбы страны.

Однако вскоре постановлением Совета Народных Комиссаров СССР от 11 февраля 1931 г. № 126 Гидрометеорологический комитет был введен в состав Народного комиссариата земледелия Союза ССР.

С целью выделения и усиления самостоятельной роли Гидрометслужбы постановлением ЦИК и СНК СССР от 23 февраля 1933 г. № 59/167 было образовано Центральное управление единой гидрометеорологической службы Союза ССР при Народном комиссариате земледелия Союза ССР. Но уже в скором времени постановлением ЦИК и СНК Союза ССР от 14 ноября 1936 г. № 80/1981 это управление преобразовано в Главное управление гидрометеорологической службы Союза ССР при Совете Народных Комиссаров Союза ССР (ГУГМС).

Прежде чем перейти к характеристике организационных преобразований Службы в послевоенный период, хотелось бы обратить внимание на то, что и в довоенный период были попытки передать Гидрометслужбу в подчинение одному из отраслевых министерств, которые, однако, заканчивались ее выделением в самостоятельное ведомство. И тем не менее, как будет показано ниже, такого рода попытки были и в послевоенный период. Заканчивались они, как правило, выделением Гидрометслужбы в самостоятельное ведомство и усилением ее роли как центрального ведомства страны.

С началом войны, 15 июля 1941 г., ГУГМС было военизировано, и постановлением Государственного Комитета Обороны и приказом Верховного Главнокомандующего Главное управление гидрометеорологической службы СССР при Совнаркоме СССР было подчинено Комиссариату Обороны. При этом все функции гидрометеорологического обеспечения гражданских отраслей экономики за Службой сохранялись.

С окончанием Великой Отечественной войны Гидрометеорологическая служба страны вернулась к выполнению своих основных обязанностей — к гидрометеорологическому обеспечению восстанавливаемых основных отраслей хозяйственной деятельности страны.

Гидрометеорологическое обеспечение Вооруженных Сил продолжало осуществляться через созданные и укрепившиеся в годы войны гидрометслужбы видов Вооруженных Сил (ВВС, ПВО, ВМФ и др.).

Основная задача послевоенного периода заключалась в скорейшем восстановлении разрушенной на оккупированной территории, особенно на Украине и в Белоруссии, сети гидрометеорологических станций, постов и обсерваторий, а также в укреплении всех сетевых органов Службы страны, ее научно-экспериментальной и производственной базы.

Следует отметить, что, в отличие от предыдущего послевоенного периода, последовавшего за войнами 1914—1921 гг., восстановление разрушенной сети в данный послевоенный период происходило практически сразу же после освобождения оккупированных территорий наступающими советскими войсками.

В результате уже к концу Великой Отечественной войны число гидрометеорологических станций и постов в СССР, в том числе на территориях, которые были оккупированы немецко-фашистскими захватчиками, не только не уменьшилось по сравнению с 1940 г., но даже увеличилось примерно на 15 %.

Оборудование большинства станций вскоре после окончания войны было обновлено и унифицировано. В УГМС были созданы ремонтно-восстановительные партии, которые приступили к переоборудованию станций по специально разработанным в ГГО, ГГИ и других институтах стандартам.

В 1953 г. постановлением Совета Министров СССР от 17 марта 1953 г. № 823 ГУГМС на сравнительно короткое время (с

17.03.53 по 31.06.54 г.) было включено в состав Министерства сельского хозяйства и заготовок СССР, что вскоре вновь подтвердило неэффективность такого рода преобразований. Поэтому постановлением Совета Министров СССР от 1 июля 1954 г. № 1312 ГУГМС было выделено из состава Министерства сельского хозяйства СССР и подчинено непосредственно Совету Министров СССР и стало называться Главным управлением гидрометеорологической службы при Совете Министров СССР.

В первые послевоенные годы началось существенное укрепление научной базы Гидрометслужбы.

В 1950-е годы на базе филиалов ГГО и некоторых региональных обсерваторий (Главная геофизическая обсерватория — ГГО, Центральный институт прогнозов — ЦИП, Центральная аэрологическая обсерватория — ЦАО, Государственный гидрологический институт — ГГИ, Государственный океанографический институт — ГОИН) были созданы пять новых научно-исследовательских гидрометеорологических институтов. Это Украинский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт в Киеве (УкрНИГМИ), Среднеазиатский региональный научно-исследовательский институт в Ташкенте (САНИГМИ), Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт во Владивостоке (ДВНИГМИ), Закавказский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт в Тбилиси (ЗакНИГМИ), Казахский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт в Алма-Ате (КазНИГМИ).

В 1950-е годы существенное развитие получила деятельность Гидрометслужбы, связанная с осуществлением в стране широкого комплекса работ, получивших название „План преобразования природы засушливых районов СССР“, направленных на создание лесозащитных полос и проведение мелиоративных работ по осушению болот и заболоченных территорий.

Следует отметить, что в первый послевоенный период, как и в последующие годы, практически все крупные проекты, связанные с развитием старых и формированием новых направлений деятельности в сфере экономики, созданием новых технологий, укреплением обороноспособности страны, осуществлением крупных международных проектов и программ, не обходились без активного участия Гидрометслужбы.

В 1958 г. Гидрометслужба приняла самое активное участие в выполнении программы Международного геофизического года, в начале 1960-х годов — программы Международного года спокойного Солнца.

К концу 1950-х годов сеть гидрометеорологических станций и постов, а также сетевые органы Гидрометслужбы были не только восстановлены, но и существенно расширены и укреплены в техническом отношении. В это время стали создаваться и расширяться новые сети наблюдений, такие как озонметрическая, актинометрическая, атмосферно-электрическая, теплобалансовая, радиометеорологическая и др. Существенное развитие и техническое переоснащение получили аэрологическая, гидрологическая и другие сети.

При описании организационных преобразований Гидрометслужбы в первые послевоенные годы следует отметить, что в это время имели место необоснованные обвинения в адрес руководства Гидрометслужбы и лично ее начальника Е. К. Федорова, по которым он был освобожден от должности начальника и разжалован из генерал-лейтенанта в рядовые. Однако большинство старейших работников Гидрометслужбы, к их чести, сохранили глубокое уважение к Е. К. Федорову — незаурядной личности, национальному герою, полярнику-папанинцу, Герою Советского Союза. Крупный ученый, патриот, талантливый организатор, известный государственный и общественный деятель, он много сделал для развития отечественной Гидрометслужбы, Всемирной метеорологической организации, международного сотрудничества гидрометеорологов всего мира.

Новый толчок в развитии Гидрометслужбы произошел в начале 1960-х годов и связан он с возвращением на пост начальника ГУГМС академика Е. К. Федорова.

В соответствии с постановлением Совета Министров СССР от 9 сентября 1963 г. № 944 на Гидрометслужбу возлагался ряд новых задач по обслуживанию различных отраслей народного хозяйства, созданию новых технических средств, техническому переоснащению Службы, изучению Мирового океана, разработке методов активного воздействия на погодные, климатические и гидрологические явления и процессы и др.

Был поставлен вопрос о разработке автоматизированных систем сбора и обработки информации на базе новых автоматичес-

ких и полуавтоматических измерительных систем, систем сбора и обработки информации с использованием ЭВМ. Гидрометслужба стала одним из лидирующих в стране ведомств по использованию средств вычислительной техники в своей деятельности.

В Гидрометслужбу были переданы из Академии наук СССР Институт прикладной геофизики (ИПГ, Москва), Высокогорный геофизический институт (ВГИ, Нальчик), Гидрохимический институт (ГХИ, Ростов-на-Дону).

Из Главного управления Северного морского пути Министерства морского флота в ГУГМС был передан Арктический научно-исследовательский институт (АНИИ, Ленинград), впоследствии Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ). Одновременно в ГУГМС была передана сеть полярных станций вместе с арктическими радиометцентрами и отделом полярных станций Главсевморпути, на базе которого в ГУГМС было образовано Управление Арктики и Антарктики. Была передана сеть дрейфующих станций „Северный полюс“. Все функции гидрометеорологического обеспечения плавания по Северному морскому пути были также возложены на Гидрометслужбу. В состав ГУГМС была передана Советская антарктическая экспедиция и сеть организованных ею обсерваторий и станций в Антарктиде. В дальнейшем все функции по организации постоянно действующих Высокоширотных воздушных экспедиций „Север“ и Советской антарктической экспедиции были возложены на ГУГМС.

Вскоре в г. Обнинске Калужской области была создана мощная научная и научно-производственная база ГУГМС. В этом городе на базе ИПГ был основан Институт экспериментальной метеорологии (ИЭМ). Практически на новом месте были построены научно-производственные корпуса и единственная в стране высотная гидрометеорологическая мачта (обсерватория). Здесь же, в Обнинске, был образован Всесоюзный научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации (ВНИИГМИ), который в дальнейшем был преобразован во ВНИИГМИ—МЦД (Мировой центр данных).

В соответствии с постановлением Совета Министров СССР от 03.01.1964 № 11 в г. Москве на базе Вычислительного метеорологического центра и Главного радиометеорологического центра был создан Мировой метеорологический центр (ММЦ) с отделе-

нием хранения и статистической обработки гидрометеорологических данных ММЦ в г. Обнинске. Впоследствии в результате объединения ММЦ с Центральным институтом прогнозов был создан центральный научно-прогностический центр страны, один из трех мировых метеорологических центров — Гидрометцентр России, осуществляющий основную научно-производственную прогностическую деятельность в стране.

На базе научно-производственных органов Гидрометслужбы страны в Москве, Ташкенте, Новосибирске и Хабаровске были организованы региональные метеорологические центры, вошедшие в систему Всемирной службы погоды (ВСП) (всего в мире таких центров 28).

В 1960-е годы и несколько позже был создан и укреплен еще ряд институтов Службы. Так, получил развитие Научно-исследовательский институт гидрометеорологического приборостроения (НИИ ГМП, Москва). В Обнинске было создано Центральное конструкторское бюро гидрометеорологического приборостроения (ЦКБ ГМП), в Новосибирске — Западно-Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт (ЗапСибНИГМИ).

Необходимость в агрометеорологическом обеспечении сельскохозяйственного производства привела к созданию действующего и поныне Всесоюзного (Всероссийского) научно-исследовательского института сельскохозяйственной метеорологии (ВНИИСХМ, Обнинск).

Существенно укрепилась научно-производственная база Института экспериментальной метеорологии (ИЭМ), и на его основе в Обнинске было создано Научно-производственное объединение „Тайфун“.

Были расширены и укреплены научно-экспериментальные базы (филиалы) центральных научно-исследовательских институтов. Прежде всего это Валдайский филиал ГГИ, экспериментальная база ГГИ вблизи г. Зеленогорска, центральная полевая экспериментальная база ГГО в пос. Воейково, полевая база ГГО в пос. Тургош Ленинградской области, полевые базы ВГИ, ЦАО, филиал ГОИНа — Ленинградское отделение этого института (ЛЮ ГОИН), пункты ракетного зондирования атмосферы на острове Хейса (ЦАО), в районе Волгограда (ЦАО), на острове Диксон (ЦАО), в районе озера Балхаш (ЦАО), на станции „Моло-

дежная" в Антарктиде, на научно-исследовательских судах Гидрометслужбы, а также в Монголии, Болгарии, ГДР, Индии.

При институтах, имеющих научно-исследовательский флот, были созданы морские базы (Санкт-Петербург, Мурманск, Владивосток, Одесса). Институты Службы были оснащены хорошо оборудованными парками самолетов-лабораторий (ЦАО, ГГО, ВГИ).

С укреплением существующих и созданием новых баз, экспедиционного флота и самолетов-лабораторий резко возросли возможности Гидрометслужбы по осуществлению широкого комплекса экспериментальных и научно-производственных работ, а также по участию в крупнейших комплексных экспедициях и экспериментах, многие из которых осуществлялись в рамках международного сотрудничества. К таким крупным программам относятся Программа исследования глобальных атмосферных процессов (ПИГАП) и ее подпрограммы, такие как Полярный эксперимент (ПОЛЭКС), Тропический эксперимент (ТРОПЭКС), Муссонный эксперимент (МОНЭКС), Комплексный энергетический эксперимент (КЭНЭКС), Советско-американская экспедиция „Беринг" и др.

Резко возросла роль Гидрометслужбы в изучении Мирового океана. В 1960-е и 1970-е годы в Службе появился целый класс прекрасно оборудованных научно-исследовательских судов, таких как „Профессор Визе", „Профессор Зубов" и др., флот пополнился также научно-исследовательскими судами ледокольного класса, такими как НИС „Михаил Сомов" и „Академик Федоров", и малотоннажными судами (всего в составе Гидрометслужбы насчитывалось 47 НИС неограниченного океанского плавания, более 426 речных и озерных судов и около 4000 катеров и других плавсредств).

С запуском первого искусственного спутника Земли в Службе начались работы, инициатором которых была Гидрометслужба, по созданию экспериментальных, а затем и оперативно действующих систем метеорологических спутников. Первоначально эти работы были сосредоточены в небольшой лаборатории при Центральном институте прогнозов. Впоследствии для этих целей был создан Государственный научно-исследовательский центр изучения природных ресурсов (ГосНИЦИПР), в настоящее время — Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии (НИЦ „Планета", Москва).

Сейчас спутниковые методы исследований далеко вышли за рамки чисто метеорологических задач и включают широкий комплекс наблюдений из космоса не только за метеорологическими процессами, но и за состоянием почв и растительности, океанов, морей, рек и водоемов, ледяного и снежного покровов.

Была составлена и осуществляется обширная программа изучения природных ресурсов с помощью космических средств. Для этих целей в системе Гидрометслужбы были созданы оборудование и пункты приема спутниковой информации, методы ее обработки; организованы и оперативно действуют пункты приема информации с метеорологических спутников, работающих в режиме непосредственной передачи.

Постановлением ЦК КПСС и СМ СССР от 29 декабря 1972 г. № 898 „Об усилении охраны природы и улучшении использования природных ресурсов” на Гидрометслужбу были возложены новые функции по контролю за состоянием природной среды. ГУГМС было поручено организовать общегосударственную службу наблюдений и контроля за уровнем загрязнения атмосферы, почвы и водных объектов по физическим, химическим и гидробиологическим (для водных объектов) показателям и экстренной информации о резких изменениях уровня загрязнения атмосферы, почвы и вод. Во исполнение данного постановления ГУГМС сразу же приступило к созданию сети пунктов по контролю загрязнения атмосферы. К 1974 г. эта сеть включала 130 городов и населенных пунктов. В 1980-е годы сеть насчитывала более 500 пунктов.

Работы по контролю за загрязнением различных компонентов окружающей природной среды были организованы в ряде институтов Службы: в ГГО — за состоянием атмосферы, в ГОИНе — Мирового океана, в ИПГ (совместно с ИЭМ) — за радиоактивным загрязнением, в ИЭМ — за загрязнением почвы, в ГХИ — за состоянием поверхностных вод суши.

Во всех территориальных управлениях Гидрометслужбы были созданы специальные отделы, осуществляющие во взаимодействии с местными органами мониторинг состояния окружающей природной среды и выполняющие работы по нормированию вредных выбросов в атмосферу при экспертизе проектов, инспекциях и планировании атмосферно-охранных мероприятий. Органами Гидрометслужбы уже в 1980 г. была проведена первая об-

цесоюзная инвентаризация всех промышленных выбросов на 80 тыс. предприятий. В территориальных управлениях ГУГМС в эти годы было создано более 100 лабораторий по анализу проб воздуха. К сожалению, созданная тогда мощная сеть станций по контролю за загрязнением атмосферного воздуха в последнее десятилетие пришла в упадок и находится в критическом состоянии.

В начале 1970-х годов на Росгидромет были возложены новые задачи — организация работ по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, таких как противогородовые работы, защита от лавин и селей, тушение лесных пожаров и др. Вскоре эти работы перешли из опытных в стадию производственных, что привело к созданию военизированных подразделений по борьбе с градом. В результате в ряде управлений, в том числе и в республиканских (Армения, Грузия, Украина, Узбекистан, Молдавия), были созданы военизированные противогородовые службы.

Признанием возросшей роли Гидрометслужбы в жизнеобеспечении страны явился Указ Президиума Верховного Совета СССР от 30 марта 1978 г. № 7298-IX „О преобразовании Главного управления гидрометеорологической службы при Совете Министров СССР в Государственный комитет СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды” (Госкомгидромет СССР). Этот комитет в соответствии с Законом СССР от 5 июля 1978 г. „О Совете Министров СССР” был отнесен к общесоюзным государственным комитетам СССР.

В начале 1991 г. постановлением Кабинета Министров СССР от 13 апреля 1991 г. № 176 Госкомгидромет СССР был преобразован в Комитет гидрометеорологии СССР (Госгидромет СССР) при Кабинете Министров СССР.

В соответствии с Указом Президента РСФСР от 28 ноября 1991 г. № 242 „О реорганизации центральных органов государственного управления РСФСР” Комитет гидрометеорологии СССР был передан вновь образованному Министерству экологии и природных ресурсов РСФСР. В составе этого министерства был образован Комитет по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Роскомгидромет), который Указом Президента Российской Федерации от 30 сентября 1992 г. № 1148 реорганизован в самостоятельный федеральный орган исполнительной

власти — Федеральную службу России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

В 1991 г. на базе территориальных управлений гидрометслужб союзных республик, входивших ранее в СССР, а также ряда институтов (УкрНИГМИ, ЗакНИГМИ, КазНИГМИ, САНИГМИ) и соответствующих военизированных противорадиологических служб были созданы гидрометслужбы в странах СНГ и Балтии, с которыми Гидрометслужба России поддерживает тесные и постоянные контакты. В феврале 1992 г. странами СНГ было подписано Соглашение о взаимодействии в области гидрометеорологии и создан Межгосударственный совет по гидрометеорологии как координационный орган Содружества Независимых Государств в этой области. Межгосударственный совет по гидрометеорологии (МСГ) проводит большую работу практически по всем направлениям деятельности в области гидрометеорологии, в том числе регулярные сессии, конференции и семинары. По инициативе МСГ глав государств СНГ приняты соглашения о межгосударственной гидрометеорологической сети и о сотрудничестве в области активного воздействия на метеорологические и другие геофизические процессы, а также концепция гидрометеорологической безопасности государств—участников СНГ.

Во исполнение Договора об образовании Сообщества Беларуси и России в 1997 г. был образован Комитет Союза Беларуси и России по гидрометеорологии и мониторингу загрязнения природной среды. К приоритетным направлениям работы Комитета относятся работы по техническому, технологическому, научно-методическому и нормативно-правовому развитию деятельности гидрометеорологических служб России и Беларуси и создание на их основе единой гидрометеорологической службы, деятельность которой отнесена к исключительному ведению Союзного государства.

В соответствии с Указом Президента РФ от 30 сентября 1992 г. № 1148 и рядом более поздних указов Президента РФ, определяющих структуру федеральных органов исполнительной власти (от 10.01.94 № 66; от 22.09.98 № 1142; от 25.05.99 № 651; от 17.05.2000 № 867), Гидрометслужба России до апреля 1998 г. функционировала как самостоятельная Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Указ Президента Российской Федерации от 30.04.98 № 483 предусматривал упразднение Службы и передачу ее функций Госкомэкологии России. Неоправданная ликвидация самос-

тоятельности Гидрометслужбы большинством специалистов, практиков, государственных деятелей, научной общественностью нашей страны и международным сообществом была воспринята как грубый опыт в ходе реорганизации федеральных органов исполнительной власти. Тем самым был бы причинен непоправимый ущерб возможностям государства в гидрометеорологической деятельности в национальных интересах и в выполнении международных обязательств.

Все это вызвало положительные действия. Указом Президента Российской Федерации от 22.09.98 № 1142 Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды была вновь образована.

Однако опыт принятия ошибочного решения был повторен в 2004 г. при реализации основных направлений административной реформы. За этим решением стояли конкретные люди, которые преследовали цели, далекие от государственных интересов. Указом Президента Российской Федерации от 09.03.2004 г. № 314 Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды была вновь упразднена.

Активная работа руководства Росгидромета и личная поддержка Президента Российской Федерации В. В. Путина позволили быстро восстановить самостоятельность Службы. Указом Президента Российской Федерации от 20.05.2004 г. была образована Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, руководство которой осуществляется Правительством Российской Федерации. При этом спектр полномочий Службы существенно расширился.

В настоящее время Росгидромет имеет в своем составе оперативно-производственные организации, научно-исследовательские и учебные учреждения и ряд других организаций, работающих в области гидрометеорологии и смежных с ней областях.

Основным звеном в оперативно-производственной деятельности Росгидромета являются территориальные управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС) и центры по гидрометеорологии и мониторингу природной среды (ЦГМС), расположенные в крупных городах и населенных пунктах соответствующих субъектов Российской Федерации.

К ним относятся следующие УГМС: Башкирское (Уфа); Верхне-Волжское с ЦГМС в Нижнем Новгороде, Кирове, Йошкар-Оле,

Саранске, Ижевске, Новочебоксарске; Дальневосточное с ЦГМС в Хабаровске и Благовещенске; Забайкальское с ЦГМС в Чите и Улан-Удэ; Западно-Сибирское с ЦГМС в Новосибирске, Барнауле, Кемерово, Горно-Алтайске и Томске; Иркутское с ЦГМС в Иркутске, Байкальске, Братске и Усть-Ордынске; Камчатское (Петропавловск-Камчатский); Колымское (Магадан); Мурманское (Мурманск); Обь-Иртышское с ЦГМС в Омске, Тюмени, Салехарде и Ханты-Мансийске; Приволжское с ЦГМС в Самаре, Оренбурге, Пензе, Саратове и Ульяновске; Приморское (Владивосток); Сахалинское (Южно-Сахалинск); Северо-Западное с ЦГМС в Санкт-Петербурге, Петрозаводске, Новгороде и Пскове; Северное с ЦГМС в Архангельске, Вологде, Сыктывкаре, Нарьян-Маре и на Диксоне; Северо-Кавказское с ЦГМС в Ростове-на-Дону, Астрахани, Волгограде, Владикавказе, Грозном, Краснодаре, Майкопе, Махачкале, Нальчике, Назрани, Сочи, Ставрополе, Черкесске и Элисте; Среднесибирское с ЦГМС в Красноярске, Абакане, Кызыле, Норильске и Туре; УГМС Республики Татарстан (Казань); Уральское с ЦГМС в Екатеринбурге, Кургане, Перми и Челябинске; Центральное с ЦГМС в Москве, Владимире, Иваново, Калуге, Костроме, Рязани, Смоленске, Твери, Туле и Ярославле; УГМС Центрально-Черноземных областей с ЦГМС в Курске, Белгороде, Брянске, Воронеже, Липецке, Орле и Тамбове; Чукотское (Певек); Якутское (Якутск) с ЦГМС в Тикси. В Калининграде функционирует самостоятельный ЦГМС, не входящий в состав какого-либо территориального управления.

К оперативно-производственным подразделениям Росгидромета относятся также Главный радиометеорологический центр (ГРМЦ), Главный авиаметеорологический центр (ГАМЦ) и Главный вычислительный центр (ГВЦ), расположенные в Москве.

Противоградовые работы осуществляют три военизированные службы (ВС) по активному воздействию на гидрометеорологические процессы: Северо-Кавказская (Нальчик), Краснодарская (г. Лабинск Краснодарского края) и Ставропольская (Ставрополь).

В составе Росгидромета функционируют 18 научно-исследовательских институтов: Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ (Гидрометцентр России, Москва); Главная геофизическая обсерватория (ГГО, Санкт-Петербург) с филиалом в

пос. Воейково; Государственный гидрологический институт (ГТИ, Санкт-Петербург) с Валдайским филиалом; Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ, Санкт-Петербург); Государственный океанографический институт (ГОИН, Москва) с Санкт-Петербургским отделением (СПО ГОИН), Центральная аэрологическая обсерватория (ЦАО, Долгопрудный Московской области), Институт прикладной геофизики (ИПГ, Москва), Институт глобального климата и экологии (ИГКЭ, Москва)*, Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии „Планета” (НИЦ „Планета”, Москва), Научно-производственное объединение „Тайфун” (НПО „Тайфун”, Обнинск), Центральное конструкторское бюро гидрометеорологического приборостроения (ЦКБ ГМП, Обнинск), Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных (ВНИИГМИ—МЦД, Обнинск), Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии (ВНИИСХМ, Обнинск), Высокогорный геофизический институт (ВГИ, Нальчик), Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт (СибНИГМИ, Новосибирск), Гидрохимический институт (ГХИ, Ростов-на-Дону), Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт (ДВНИГМИ, Владивосток), Каспийский морской научно-исследовательский центр (КаспМНИЦ, Астрахань). Примечательно, что КаспМНИЦ создавался практически на новом месте в сложный для Службы период середины 1990-х годов. Несмотря на финансовые, кадровые и организационные трудности, Гидрометслужба России и администрация Астраханской области нашли необходимые решения и новый институт Службы был создан в короткие сроки и приступил к работе.

Начиная с 1998 г. Росгидрометом было образовано 29 метеорологических агентств с юридическим статусом автономных некоммерческих организаций, главной задачей которых является развитие специализированного гидрометеорологического обеспечения.

В послевоенный период в системе Гидрометслужбы была создана сеть учебных заведений, осуществляющих подготовку кад-

*ИГКЭ имеет двойное подчинение — Росгидромету и РАН.

ров. Прежде всего следует назвать Московский гидрометеорологический институт, где еще до войны начала осуществляться подготовка кадров высшей квалификации (метеорологов, гидрологов, океанологов). В годы Великой Отечественной войны этот институт также был военизирован и эвакуирован в Ленинабад. После окончания войны он вернулся не в Москву, а в Ленинград и функционировал в системе Министерства высшего образования (ЛГМИ, РГМИ, ныне РГГМУ — Российский государственный гидрометеорологический университет).

До войны в Харькове начал функционировать Харьковский гидрометеорологический институт, который в 1944 г. был перебазирован в Одессу. После войны в Одессе был воссоздан Одесский гидрометеорологический институт (ОГМИ), функционировавший в системе Минвуза СССР. Оба эти института осуществляли свою деятельность в тесном контакте с Гидрометслужбой и сыграли большую роль в подготовке гидрометеорологических кадров высшей квалификации.

Непосредственно в системе Гидрометслужбы в настоящее время функционируют Институт повышения квалификации (ИПК Росгидромета, г. Железнодорожный Московской области) и пять гидрометеорологических техникумов (ГМТ): Алексинский, Владивостокский, Иркутский, Ростовский-на-Дону и Туапсинский. Образован и действует Гидрометеорологический колледж (Москва).

Издательская деятельность в послевоенный период не претерпела существенных изменений. Продолжает свою деятельность Федеральное издательство гидрометеорологической научно-технической и производственной литературы (Гидрометеоиздат, Санкт-Петербург). Издание научно-технического журнала „Метеорология и гидрология” с 1994 г. в связи с ликвидацией Московского отделения Гидрометеоиздата осуществляет Издательский центр „Метеорология и гидрология” (ИЦ МГ, Москва). В целях обеспечения различных направлений деятельности Росгидромета в послевоенный период образованы Фабрика офсетной печати (ФОП, Обнинск), Агентство экспедиционного флота (Москва), Региональный центр „Мониторинг Арктики” (Санкт-Петербург), Агентство Росгидромета по специализированному гидрометобеспечению (Москва), Оперативно-производственный центр информационных технологий (пос. Голохвастово Подольского

района Московской области) и ряд других вспомогательных служб и подразделений.

Деятельность по популяризации гидрометеорологических знаний, кроме образованного еще до войны Метеорологического музея ГГО, осуществляют Российский государственный музей Арктики и Антарктики (Санкт-Петербург), Музей гидрологических приборов Валдайского филиала ГГИ. В последние годы активную работу по созданию музейных коллекций и экспозиций проводят УГМС и НИУ.

Таким образом, проследив историю создания, становления и развития Гидрометеорологической службы России, можно убедиться, как возрастала ее роль в жизни страны, совершенствовалась и укреплялась ее научно-производственная база и организационная структура, на какой уровень поднялось гидрометеорологическое обслуживание различных отраслей экономики и других сфер хозяйственной деятельности страны, как развивалась международная деятельность Службы и какую роль она играла и играет во Всемирной метеорологической организации.

Значительный вклад в преобразование, научное и технологическое развитие Службы в послевоенный период внесли многие руководители и специалисты научно-исследовательских учреждений и производственных организаций, сотрудники центрального аппарата Гидрометслужбы, на имена которых ссылаются авторы разделов настоящего тома „Очерков”. К числу выдающихся руководителей Гидрометслужбы этого периода можно с полным основанием отнести Е. К. Федорова, Ю. А. Израэля и А. И. Бедрицкого, возглавляющего Службу с 1993 г. Здесь же хотелось бы особо отметить большой вклад в деятельность Службы таких крупных ученых и руководителей, бывших заместителей Председателя Госкомгидромета СССР, как Ю. С. Седунов, Н. П. Козлов, В. И. Корзун, В. Г. Соколовский, Е. И. Толстиков, А. П. Метальников, В. М. Захаров, А. Н. Чилингаров, С. С. Ходкин.

МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ

Развитие методических основ гидрометеорологических наблюдений

Последние 50 лет XX в. развитие системы гидрометеорологических наблюдений и ее техническое переоснащение проходили при резком увеличении требований к метеорологическому обеспечению основных отраслей хозяйства страны. Так, уже в первые дни после окончания Великой Отечественной войны перед Гидрометслужбой был поставлен вопрос о разработке и научном обосновании основных мероприятий по коренной реорганизации сельского хозяйства страны на основе расчета основных составляющих теплового и водного баланса конкретных территорий, оценки возможностей улучшения соотношения между ними при проведении крупномасштабных преобразований подстилающей поверхности и внедрении искусственного орошения на больших площадях. Интенсивное развитие авиации, повышение интенсивности воздушного движения, увеличение грузоподъемности и скорости воздушных судов потребовали существенного усовершенствования системы получения оперативной информации о метеорологических условиях в аэропортах и достаточно точных прогнозах их изменения на моменты взлета и посадки самолетов.

Это привело к значительному увеличению объема наблюдений на сети, необходимых прежде всего для оперативных и синоптических целей. К середине 1950-х годов такие метеорологические наблюдения стали складываться уже в самостоятельную систему получения метеорологической информации, которая действовала на фоне основной системы наблюдений (в климатологические сроки — 1, 7, 13 и 19 ч среднего солнечного времени).

Значительно возрос объем наблюдений и за счет организации новых видов наблюдений (актинометрические и теплоресурсные, за содержанием озона в атмосфере, концентрацией загрязняющих примесей и др.).

Большое развитие получила и система аэрологических наблюдений — увеличилось число как сроков наблюдений, так и станций, выполняющих аэрологические наблюдения.

В первые же месяцы послевоенной поры встал вопрос о рационализации всей системы гидрометеорологических наблюдений страны, ее состава и густоты распределения пунктов наблюдений. Разработанный под руководством О. А. Дроздова и Е. С. Рубинштейн в 1945—1946 гг. план рационализации и развития сети основывался на требованиях к точности интерполяции климатологических характеристик в любую точку территории по значениям, полученным на сети станций. Оценка ошибки интерполяции была получена в работах О. А. Дроздова и М. М. Шепелевского на основании определения изменчивости изучаемой величины по территории. При расчете оптимального расстояния между пунктами наблюдений предполагалось, что ошибка интерполяции должна быть не более чем погрешность определения данной величины в пункте измерения.

План рационализации и развития гидрометеорологической сети содержал и уточнение классификации сетевых подразделений, типовых табелей приборов и оборудования для оснащения станций, а также штатное расписание и программу наблюдений станций, постов и обсерваторий.

В соответствии со значимостью станций для интерполяции основных величин и репрезентативностью их местоположения сеть станций делилась на основную (опорную), описывающую общий климатологический фон территории, и дополнительную, учитывающую мезоклиматические отклонения от фона. Для основных метеорологических величин (температура, влажность и давление воздуха, скорость и направление ветра) расстояние между станциями должно быть 70—80 км; для всего пространства Союза требовалось около 4000 станций на относительно однородной равнинной территории.

Для горных районов расположение станций зависело от вертикальной зональности распределения метеорологических величин.

В связи с существенно большей изменчивостью полей осадков и снежного покрова расстояние между пунктами их измерения получалось около 20—30 км для суточных сумм (примерно 6000 постов для площади Союза). Такое сгущение сети для измерения

осадков и снежного покрова достигалось организацией гидрометеорологических постов с одним-двумя наблюдателями, которые подчинялись в методическом отношении соответствующим станциям.

План рационализации и развития сети был рассмотрен и утвержден научно-техническим советом Главного управления гидрометслужбы (ГУГМС) в 1946 г. Реализация этого плана привела к существенному развитию сети. Так, к 1975 г. число станций достигало 3300, а к 1985—1986 г. оно возросло до 3900—4000, а число постов — почти до 6000. Однако следует отметить, что это было результатом не только реализации плана развития сети, но и в значительной мере существенного роста потребностей народнохозяйственных организаций в метеорологическом обеспечении. Особенно большое увеличение числа станций происходило за счет организации авиационных метеорологических станций (гражданских) (АМСГ) для обслуживания полетов авиации, а также станций вблизи АМСГ для создания сети штормового оповещения.

Таким образом, увеличивалась неравномерность распределения станций по территории: в ряде случаев в одном населенном пункте организовывались две и даже три станции.

Следует также отметить, что принятый план предусматривал развитие только основной (климатологической) системы наблюдений, а для реального метеорологического обеспечения народнохозяйственных мероприятий требовалось развитие оперативной системы метеорологических наблюдений. К концу 1950-х годов сложилось положение, при котором оперативная система наблюдений имела уже большее практическое значение по сравнению с основной; она требовала и больших затрат на техническое оснащение и методическое руководство наблюдениями. Объем получаемой оперативной информации был существенно более полным, а требования к ее точности и репрезентативности были практически такими же, как и для климатологической системы. Поэтому в 1957—1958 гг. научно-техническим советом ГУГМС был поставлен вопрос о целесообразности сохранения двух систем метеорологических наблюдений.

Учитывая значительно большую информационную содержательность и определенность системы оперативных метеорологических наблюдений, ее возможности в анализе суточного хода

метеорологических процессов при изучении климата и метеорологического режима территорий, было принято решение об отмене с января 1961 г. наблюдений в климатологические сроки и введении на всей сети метеорологических станций синхронных 8-срочных наблюдений как для синоптических и оперативных целей, так и в целях накопления и обобщения результатов для изучения метеорологического режима и климата территории. Система измерения осадков была организована так, что обеспечивалось получение суточных и полусуточных сумм как за реальный день и ночь, так и за синхронные 12 и 24 ч по всей территории страны.

Если в старой климатологической системе наблюдений и накопления данных приоритет отдавался не физическому смыслу измеряемой величины, а ее однородности с накопленным рядом измерений, то вопросы непосредственного приложения измеренных величин в оперативных расчетах требовали возможно более точного соответствия полученных значений их физическому смыслу. Поэтому с переходом на новую систему метеорологических наблюдений были уточнены определения физического смысла, содержащегося в понятиях метеорологических величин, и откорректированы характеристики точности, обеспечивающие измерение значений в соответствующих реальных условиях. При этом в ряде случаев были уточнены и методы получения выдаваемых данных. Так, в систему измерения осадков были введены поправки на смачивание осадкосборного сосуда; при определении влажности воздуха уточнены формулы для расчета психрометрических таблиц; уточнен вертикальный градиент температуры для приведения атмосферного давления к уровню моря. В значительной мере усовершенствованы как методика, так и приборы для измерения скорости ветра.

Для обеспечения перевода метеорологической сети на новую систему наблюдений с едиными синхронными сроками и организации обобщения результатов наблюдений с учетом реального суточного хода метеорологических величин в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (ГГО) были разработаны методические основы наблюдений в новой системе сроков, а также необходимые методические пособия (методические указания и наставления). Эта работа была выполнена под руководством

Д. П. Беспалова и И. А. Берлин сотрудниками методического отдела; от ГУГМС обеспечивал реализацию ее на сети О. А. Городецкой.

Дальнейшие усовершенствования методических основ новой системы наблюдений обеспечили повышение ее информативности, особенно в режимных и климатологических обобщениях.

Работы последних лет в области методики метеорологических наблюдений были связаны с комплексированием различных видов наблюдений в единую систему гидрометеорологической информации на основе приложения численных мезомасштабных описаний полей метеорологических величин и их изменений во времени.

Развитие производственной базы приборостроения

К концу Великой Отечественной войны производство гидрометеорологических приборов (ГМП) в основном было сосредоточено на Ленинградском заводе „Гидрометприбор“, а также на Московском опытном заводе. Ленинградский завод был существенно ослаблен блокадой, перенесенной городом, да и тем, что перед самой войной основной его участок (на 18-й линии Васильевского острова) был передан Министерству авиационной промышленности. Кроме того, в начале войны значительная часть завода (как кадровая, так и оборудование) была эвакуирована в г. Свердловск (Екатеринбург), на ее основе вырос Свердловский завод ГМП. Свердловский завод ГМП обеспечивал в войну Гидрометслужбу и войсковые подразделения радиозондами. После окончания войны завод остался профилированным на производство радиозондов, удовлетворяя быстро возрастающие потребности как Гидрометслужбы, так и зарубежных метеорологических служб (Монголии, Польши, Болгарии и др.).

Оставшаяся часть Ленинградского завода продолжала выпускать метеорологические приборы и во время войны, в условиях блокады Ленинграда, обеспечивая потребности фронтовых метеорологических подразделений. С окончанием войны потребности в поставках станциям метеорологических приборов существенно увеличились, при этом остро стоял вопрос как об обеспечении традиционными приборами для замены изношенных приборов, так и о разработке технических средств в соответствии с новыми

задачами и требованиями к производству наблюдений. Для этого мощностей Ленинградского завода было явно недостаточно, и уже в 1945 г. в Риге был создан новый опытный завод (РОЗ ГМП) с конструкторским бюро и опытным производством.

Ленинградский завод специализировался на производстве наиболее сложных в технологическом отношении видов ГМП и освоении новых разработок. Так, до последнего времени завод обеспечивал сеть ртутными барометрами (чашечными, инспекторскими и контрольными), глубоководными опрокидывающимися термометрами и другой аппаратурой. В 1956—1957 гг. завод освоил производство первого в мире самописца скорости и направления ветра с автоматическим осреднением скорости по последовательным десятиминутным интервалам (М-12), в 1960—1963 гг. на заводе начали выпускать анеморумбометры М-63, а в 1965 г. — анеморумбографы М-64, которые были разработаны на основе самописца М-12. Ленинградским заводом „Гидрометприбор“ были освоены (и в дальнейшем модернизированы) и первые дистанционные метеорологические станции ДМС-Н-49, ДМС-Н-53, М-49.

Впоследствии (1975 г.) Ленинградский завод „Гидрометприбор“ объединился с заводом штурманских приборов и оборудования, а с 1985 г. объединенный завод штурманских приборов и инструментов сосредоточился на производстве судовой, в том числе и метеорологической, аппаратуры.

Рижский завод ГМП к 1960 г. освоил производство всех основных метеорологических приборов (метеорологических самописцев, барометров-анероидов, новой аппаратуры для измерения и регистрации дальности видимости, высоты облаков), а также ряда гидрологических и океанологических приборов и установок и вышел на уровень головного промышленного предприятия по производству ГМП и оборудования для Гидрометслужбы.

Производство ртутных барометров и термометров было передано вновь организованному Клинскому термометровому заводу Министерства приборостроения.

В 1953 г. в Сафоново Смоленской области на базе ПТУ был создан новый завод ГМП, который к 1958 г. стал давать продукцию удовлетворительного качества. Первыми приборами, производство которых освоил завод, были дистанционные электрические

термометры М-54, АМ-2, аспирационные психрометры, ветроизмерительные приборы, барометры-анероиды БАМ и т. п.

Для обеспечения развития производства были существенно усилены конструкторские подразделения в институтах Гидрометслужбы (ГГО, Государственном гидрологическом институте (ГГИ), Арктическом научно-исследовательском институте (АНИИ), Государственном океанографическом институте (ГОИН), Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО)). В 1948 г. на базе Центрального конструкторского бюро в Москве был создан Научно-исследовательский институт гидрометеорологического приборостроения (НИИГМП). Опытной базой НИИГМП был определен Московский завод ГМП, который продолжал выпускать и серийную продукцию.

Конструкторский отдел ГГО совместно с экспериментальными производственными мастерскими (ЭПМ) прежде всего был занят разработкой аппаратуры для научных исследований. В частности, в первые же годы после окончания войны были созданы комплексы приборов для экспедиционных исследований пограничного слоя: контактные анемометры (М. С. Стернзат), дистанционные электрические термометры сопротивления (Д. П. Беспалов, Н. В. Кучеров). Установки для измерения распределения ветра, температуры и влажности воздуха в приземном слое, созданные на основе разработанных анемометров и термометров сопротивления, были изготовлены ЭПМ ГГО и применялись в ряде экспедиций (Каменная Степь, Аркадак, Пахта-Арал, Махталы, „Северный полюс-4“, „Северный полюс-5“ и др.).

Большой объем работ был выполнен конструкторским отделом и ЭПМ ГГО по созданию комплекса актинометрических приборов (Ю. Д. Янишевский, И. Ф. Скачкова). Актинометрические приборы выпускались ЭПМ ГГО в течение 3—5 лет, после чего вся документация и технология производства были переданы Тбилисскому заводу „Гидрометприбор“, который и обеспечивал их производство до распада СССР.

Конструкторский отдел и ЭПМ АНИИ выполняли важную работу по оснащению полярных станций специальной аппаратурой, предназначенной для развития системы наблюдений в Арктике, в частности на дрейфующих льдах. В АНИИ в 1950—1951 гг. были созданы автоматические дрейфующие радиобуи (системы

Я. Я. Гаккеля, а также Л. Н. Самсония и Ю. К. Алексеева); позднее (в 1955 г.) Ю. К. Алексеевым был разработан блок метеорологических измерений для дрейфующей радиовехи, который выпускался ЭПМ АНИИ. Впоследствии эти разработки вылились в создание дрейфующей автоматической радиометеорологической станции (ДАРМС), производство которой было освоено РОЗ ГМП. Она широко использовалась в Арктике для получения метеорологической информации на трассе Северного морского пути.

Для океанологических измерений Ю. К. Алексеевым была разработана буквопечатающая гидрологическая вертушка, которая применялась и на всех дрейфующих станциях „Северный полюс“, начиная со станции „Северный полюс-3“.

Важное значение в развитии приборостроения имело создание в г. Обнинске Калужской области Центрального конструкторского бюро гидрометеорологического приборостроения (ЦКБ ГМП) с комплексом опытного производства. Это конструкторское объединение выполнило значительную работу по совершенствованию и развитию производства автоматизированных средств и систем измерения. Здесь под руководством А. Г. Рощина и И. П. Кузьминых были усовершенствованы автоматические станции для труднодоступных районов (АРМС), разработаны варианты сетевой гидрометеорологической станции (УАТГМС-М-106) без вычислительного устройства. Образцы этих станций с комплектами датчиков были изготовлены ЦКБ ГМП и установлены для опытной эксплуатации на сети Белорусского УГМС (руководитель работ Б. Г. Рождественский).

В связи с распадом СССР в России в настоящее время производство гидрометеорологической аппаратуры осуществляют Сафоновский завод ГМП, Свердловский (Екатеринбургский) завод и промышленное предприятие с конструкторским бюро в г. Обнинске, а также экспериментально-производственные мастерские при головных научно-исследовательских институтах по видам наблюдений (ГГО, ГГИ, ААНИИ), которые обеспечивают современный уровень выпускаемых приборов в части измерительных требований.

Разработка приборов для измерения метеорологических величин

Остановимся на основных (этапных) разработках метеорологической аппаратуры, выпускавшейся промышленными предприятиями в рассматриваемый период.

Измерение скорости ветра. Применявшийся на сети гидрометеорологических станций флюгер Вильда к концу 1940-х годов практически полностью исчерпал свои возможности. Большое количество сроков наблюдений (четыре климатических и до восьми синоптических) приводило к тому, что регламент наблюдений по флюгеру практически не выдерживался, в то время как требования к определению пороговых значений опасных скоростей ветра (особенно для авиации) имели важнейшее значение в обеспечении безопасности взлета—посадки самолетов. Основные усилия конструкторов были направлены на создание дистанционного анеморумбометра. К концу 1949 г. сравнительно простой и дешевый прибор был создан практически одновременно в ГГО (В. Н. Сварчевский) и в НИИГМП (В. А. Усольцев). Этот прибор — анеморумбометр электрический (АРМЭ-1) — был предназначен для измерения ветра прежде всего на АМСГ, где количество сроков определялось интенсивностью работы аэропорта. Для измерения скорости ветра использовалась трехчашечная вертушка с тахогенератором переменного тока, для передачи положения флюгарки — схема авиационного дистанционного компаса с кольцевым сопротивлением в датчике и электромагнитным указателем. Из-за недостаточной начальной чувствительности (1,5—2,0 м/с) прибор не применялся для измерения ветра в основные климатические сроки наблюдений. Последующая модернизация АРМЭ-1 и создание на его базе анеморумбометра М-47 не повысили его начальной чувствительности: М-47 также применялся только для обслуживания авиации на АМСГ III—IV разрядов.

В 1950-е годы при измерении скорости ветра и практическом приложении результатов измерения встал вопрос о рациональном интервале времени, в течение которого производится измерение скорости ветра. Двухминутный интервал, принятый для определения скорости и максимального порыва ветра по флюгеру, обуславливался только техническими возможностями визуального

наблюдения (и то этот интервал часто практически не выдерживался). Исследования спектральной структуры турбулентности в пограничном слое атмосферы, выполненные как в нашей стране (в ГГО, Институте физики атмосферы (ИФА) АН СССР), так и за рубежом, показали, что минимальным интервалом времени измерения, который дает относительно устойчивые значения скорости (средней и максимальной) с возможным распространением их на соседние интервалы, является 10 мин. Этот интервал и был рекомендован для измерения скорости ветра во всех странах входящих во Всемирную метеорологическую организацию (ВМО).

В этом отношении важным этапом в разработке приборов для измерения ветра было создание (Н. Г. Протопопов, М. С. Стернзат) самописца скорости ветра М-12, который автоматически определял и регистрировал среднее значение скорости ветра по последовательным 10-минутным интервалам времени. Опытные образцы прибора были изготовлены в 1952—1953 гг. в ЭПМ ГГО серийное производство в 1953 г. было организовано на Ленинградском заводе „Гидрометприбор“.

В 1960 г. на основе самописца М-12 на Ленинградском заводе „Гидрометприбор“ (Н. Г. Протопопов, М. С. Стернзат, А. Ф. Застенкер) был разработан анеморумбометр М-63 для сети гидрометеорологических станций. Он, так же как и М-12, осуществлял автоматическое осреднение скорости ветра за последовательные 10-минутные интервалы времени. В 1963—1964 гг. на базе анеморумбометра авторами разработки был создан самописец скорости и направления ветра М-64.

В 1968 г. в НИИГМП (А. Л. Златин, К. Н. Мануйлов, Д. Я. Суражский) был разработан упрощенный вариант сетевого анеморумбометра М-63 (более поздняя модернизация М-63М-1) Средняя скорость в М-63М-1 определялась подсчетом числа импульсов, которые вырабатывались импульсаторами датчика за 10 мин. Мгновенная скорость определялась в результате измерения частоты следования импульсов. Для определения направления ветра измерялся сдвиг по фазе между тремя сериями импульсов — опорной, основной и сдвинутой, связанными с положением флюгарки. Указатели средней, мгновенной, максимальной скорости и направления ветра выполнены на основе стрелочных магнитоэлектрических приборов. Анеморумбометры

М-63М и М-63М-1 до последнего времени служили основными приборами для измерения параметров ветра на сети гидрометеорологических станций и АМСГ.

К настоящему времени в ГГО завершена разработка нового поколения ветроизмерительных приборов (Е. В. Романов). Применение процессора (программируемый контроллер) позволило обеспечить скользящее осреднение скорости ветра за установленный промежуток времени, а полная разгрузка винта от тормозящих усилий преобразователя — высокую начальную чувствительность.

Следует отметить, что корректное измерение малых скоростей ветра имеет важное значение также для определения формирования и переноса полей концентрации загрязняющих примесей в атмосфере.

Измерение атмосферного давления. Для измерения атмосферного давления на сети гидрометеорологических станций основным прибором до настоящего времени остается ртутный барометр (в основном чашечный). Существенным недостатком ртутных барометров является их наполнитель — ртуть, пары которой оказывают вредное воздействие на все живое, в том числе и на человека.

На протяжении всего времени применения ртутных барометров их модернизация была направлена прежде всего на повышение точности измерений. Для этого применялись более совершенные отсчитывающие приспособления, вплоть до оптических систем (катетометров) — как в эталонных барометрах ГГО, разработанных Г. И. Вильдом, так и в контрольных барометрах. Важным усовершенствованием ртутных барометров было увеличение диаметра барометрической трубки, по крайней мере в ее рабочей части.

В послевоенные годы был предпринят ряд попыток создать безртутный барометр на основе усовершенствования анероида, обеспечивающего приемлемую для сети точность измерений (не хуже 0,20—0,25 мм рт. ст.), однако существенного повышения точности измерений достигнуть не удалось.

В последние годы на основе разработок ГГО промышленной организацией авиаприборостроения разработан и освоен выпуск безртутного барометра БРС-1, который может использоваться на сети гидрометеорологических станций (в том числе и авиацион-

ных). Прибор характеризуется инструментальной погрешностью измерений в 0,33 гПа, или 0,25 мм рт. ст., что даже лучше, чем у существующих чашечных ртутных барометров.

Вычисленное атмосферное давление отображается в цифровом виде в гектопаскалях или в миллиметрах ртутного столба (в зависимости от положения переключателя), а также выводится на электрический выход прибора в телеграфном коде.

Измерение температуры. В работах по усовершенствованию приборов для измерения температуры (как воздуха, так и почвы) основные усилия были направлены на создание дистанционного термометра, обеспечивающего требуемую для сети точность измерения (по крайней мере не хуже, чем точность измерения ртутными термометрами).

Опыт разработки и применения различных конструкций термометров сопротивления (как металлических, так и полупроводниковых) для экспедиционных установок позволил к 1952 г. создать сетевую установку (М-54, М-54-1) для измерения температуры почвы на 10 глубинах взамен комплекта савиновских и почвенно-вытяжных термометров (Д. П. Беспалов, ГГО). Стабильность термочувствительных элементов (металлические термометры сопротивления) обеспечивалась исключением деформации обмотки термометра при изменении температуры за счет того, что она была выполнена в виде свободного пучка, уложенного в защитную тонкостенную гильзу.

Термометры для измерения температуры почвы в установке М-54, М54-1 изготавливались из медной (рафинированной) проволоки диаметром 0,1 мм на Сафоновском заводе „Гидрометприбор“. Для измерения температуры воздуха в автоматических станциях КРАМС, КРАМС-1 применены бескаркасные термометры сопротивления из платиновой проволоки. Бескаркасные термометры сопротивления (как медные, так и платиновые) в схеме неравновесного моста обеспечивали точность измерения температуры $\pm(0,15-0,20)$ °С при дистанции до 150—200 м.

В 1954—1956 гг. в НИИГМП были разработаны электрические дистанционные приборы для измерения температуры почвы на сельскохозяйственных полях (АМ-2, АМ-2М). Эти термометры выпускались Сафоновским заводом „Гидрометприбор“ и применялись в агрометеорологических наблюдениях. Погрешность измерения этими приборами составляла 0,5—1,0 °С.

В настоящее время основными средствами измерения температуры на метеорологических станциях с неавтоматизированными наблюдениями являются по-прежнему жидкостные термометры (ртутные и спиртовые), а для автоматических и дистанционных измерений (в М-54 и КРАМС) применяются металлические термометры сопротивления. В автоматических радиометеорологических станциях, где удовлетворяются более низкой точностью измерения, используются биметаллические или манометрические термометры.

Измерение влажности воздуха. За рассматриваемые 50 лет больше всего работ по развитию средств измерения влажности воздуха было связано с усовершенствованием конденсационных гигрометров. Одним из важных этапов в разработке современного конденсационного гигрометра (после появления конструкций Ламбрехта, Аллюара, Дюфура) было создание гигрометра точки росы М. И. Гольцманом (ГГО, 1935 г.).

В 1956—1957 гг. Н. П. Фатеев и М. С. Стернзат построили конденсационный гигрометр, зеркальце которого охлаждалось полупроводниковым холодильником.

Дальнейшие разработки в ГГО (Н. П. Фатеев, Г. П. Резников) привели к созданию гигрометра точки росы с полупроводниковым охлаждением как образцового средства 1-го разряда для измерения влажности воздуха.

Однако для применения в массовых измерениях на сети гидрометеорологических станций конденсационный гигрометр оказался слишком сложным. Необходимо было поддерживать чистоту конденсационной поверхности, что при интенсивных промышленных загрязнениях не всегда удается обеспечить.

Одним из наиболее простых в использовании был сорбционный гигрометр. На основе применения сорбционных пленок из органического полупроводника, электрическая проводимость которого изменяется с изменением количества адсорбированного водяного пара, удалось получить чувствительный элемент для измерения влажности воздуха в достаточно широком диапазоне изменения влажности и температуры воздуха.

Разработанный прибор изготовлялся в виде отдельных образцов в ЭПМ Агрофизического института. Для промышленного выпуска технология производства требовала существенных доработок.

В известной мере аналогичный прибор (гигрометр ГС-210) был создан Э. Х. Косаковым в Тбилиси в конце 1970-х годов и выпускался достаточно широко для промышленных целей. Опыт использования гигрометров ГС-210 на сети показал хорошие результаты как в отношении применения в различных климатических условиях, так и в отношении стабильности характеристик: всего на сети было задействовано до 450 приборов в течение года, которые работали вполне удовлетворительно.

Для серийного промышленного производства необходимо было решить те же технологические вопросы, что и для датчиков Агрофизического института. Однако их решение затянулось в связи с недостатками организации производства (особенно недостатками технологического обеспечения).

Значительное число различных чувствительных элементов, реагирующих на изменение влажности воздуха, было разработано для радиозондовых измерений. При этих измерениях не требуется высокая стабильность чувствительного элемента — он нужен только на один запуск: перед измерением показания датчика радиозонда приводятся к показаниям контрольного прибора, а обработка сигналов радиозонда ведется по индивидуальной характеристике датчика.

Поэтому в радиозондах достаточно широко применялись чувствительные элементы из животной пленки, которая не отличается стабильностью даже по сравнению с волосным гигрометром.

Заслуживает внимания разработанный для радиозонда в ЦАО (А. М. Балагуров, М. Б. Фридзон) чувствительный элемент, конструкция которого основана на адсорбции водяного пара микропористой оксидно-алюминиевой пленкой. К сожалению, этот чувствительный элемент не нашел широкого применения из-за недостаточной стабильности.

В этом отношении более перспективным является гигрочувствительный элемент сорбционного типа с измерением электрической емкости конденсатора, в который включена адсорбирующая пленка. Такой элемент разработан в Научно-исследовательском институте электрических измерений. Однако еще требуется обеспечить его стабильность для возможного применения в приборах с длительным сроком эксплуатации.

Измерение осадков. Работы по усовершенствованию измерения осадков были начаты В. Д. Третьяковым еще в 1943 г.

К 1946 г. был создан новый осадкомер, который в течение 1947 г. заменил дождемер с защитой Нифера на всей сети гидрометеорологических станций и постов. Новый осадкомер отличался улучшенными аэродинамическими качествами, что позволило значительно уменьшить выдувание из него собранных твердых осадков. Как показали последующие исследования и сравнения осадкомера Третьякова с зарубежными приборами, он обеспечил существенное повышение точности измерения осадков. Система поправок, вносимых в результаты измерения, разработанная под руководством Л. Р. Струзера, позволила уточнить результаты измерений сумм осадков и получить суммы осадков, согласующиеся с остальными элементами водного баланса для всей территории СССР.

Дальнейшее развитие средств измерения осадков было связано с усовершенствованием плювиографа. В 1955 г. в ГГИ (К. Д. Завьялов и др.) было разработано устройство для принудительного слива, в котором гиря, подвешенная на гибкой нити, в момент слива нажимала на шток поплавка и утапливала его. В результате уровень воды в поплавковой камере резко повышался, что обеспечивало надежность слива осадков через сифон.

Кардинально новый подход к регистрации осадков всех видов (как жидких, так и твердых) начал развивать В. Д. Третьяков, разработав весовой осадкомер. Эта работа была продолжена Н. Г. Протопоповым, но завершена она не была. Лишь в 1993—1995 гг. в ГГО (Д. П. Беспалов, С. М. Персин, С. И. Зачек) был создан весовой прибор для измерения всех видов осадков. Основу датчика составляли виброчастотный преобразователь массы в частоту и микропроцессорное устройство, которое управляло всеми процедурами измерения, вычисляло значения суммы осадков — как текущие (от начала суток), так и за установленные интервалы времени (3, 6, 12 ч), а также определяло и запоминало интенсивность выпадения осадков (по последовательным 10-минутным интервалам времени). Отображение результатов измерений осуществлялось на цифровых счетчиках. На РОЗ ГМП была подготовлена вся документация для опытного производства. Опытные образцы датчика были изготовлены в ЭПМ ГГО в 1996 г. Опытное применение их показало достаточную точность измерений (0,1—0,2 мм слоя для суточных сумм).

Измерение дальности видимости. Интенсивное развитие авиации и авиационных перевозок потребовало широкого внедрения на сети инструментальных методов определения дальности видимости и высоты нижней границы облаков. В плане развития работ В. А. Фааса и усовершенствования его дымкомера ДМ-4 В. А. Гавриловым в 1946—1954 гг. были созданы ДМ-7 и измеритель видимости ИВ ГГО (ИВ-50). Эти приборы отличались от ДМ-4 тем, что фотометрирование в них производилось при постоянной (ДМ-7) или увеличивающейся (ИВ) яркости поля зрения, что повышало надежность и точность фотометрирования.

С 1950 г. ДМ-7, а затем и ИВ-50 были запущены в серийное производство, в 1957 г. на базе усовершенствованного ИВ-50 была создана установка М-6, которая обеспечивала измерение дальности видимости как в дневное, так и в ночное время. В темное время установка работала с искусственным источником света и с отражателями.

Одновременно с созданием М-6 в лаборатории оптики атмосферы ГГО В. И. Горышиным разрабатывался фотоэлектрический регистратор прозрачности атмосферы, который был принят к производству в 1956 г. как регистратор прозрачности М-37 для АМСГ.

В 1963 г. В. И. Горышин разработал более совершенный вариант установки для регистрации прозрачности атмосферы — РДВ-1, в которой измерение светового потока, ослабленного атмосферой, производится путем компенсации его световым потоком от той же лампы-излучателя. Исключение влияния дневной засветки производится применением модулированного потока света. В 1970 г. фотометрический блок РДВ-2 был вновь модернизирован с целью повышения надежности его работы, уменьшения габаритов и потребляемой мощности, а также для повышения чувствительности и уменьшения погрешности измерения. Новый прибор РДВ-3 выпускался РОЗ ГМП с 1972 по 1982 г., им были оснащены все основные аэропорты страны и ряд зарубежных аэропортов.

В 1982 г. РДВ-3 был заменен более совершенным прибором — фотометром импульсным, разработанным в ГГО Р. А. Кругловым. ФИ-1 работал на импульсной лампе, которая имеет больший световой поток и не требует механического модулятора светового потока. И наконец, в 1996 г. на базе ФИ-1 Р. А. Кругловым

вым совместно с работниками Ленинградского оптико-механического объединения был создан фотометр ФИ-2. Новый прибор отличается прежде всего современной электронной базой и полным отсутствием механики. Он имеет цифровой интерфейс, что позволяет использовать его в современных автоматических системах обработки данных. Импульсными фотометрами к настоящему времени оснащены все метеорологические станции категоризированных аэропортов России.

Для сети гидрометеорологических станций в 1959 г. В. А. Гаврилов на базе измерителя видимости ИВ ГГО создал прибор ИДВ, который был основан на использовании метода относительной яркости. В 1964 г. В. А. Гаврилов разработал методику определения дальности видимости с ИДВ по результатам наблюдений с двумя черными объектами (щитами), которые устанавливались на расстоянии 40 и 200—300 м от наблюдателя. При этом в зависимости от измеряемой дальности видимости и наличия дополнительных естественных объектов возможны три варианта измерений: методом фотометрического сравнения, методом относительной яркости и комплексным методом. В темное время суток дальность видимости определялась по результатам измерения обратного рассеяния света от направленного пучка, создаваемого специальной лампой — фарой М-71.

В 1960 г. в НИИГМП группой конструкторов под руководством Л. Л. Дашкевича были разработаны приборы для измерения дальности видимости с использованием поляризационного метода фотометрирования (М-53, М-53А). Вместо оптического клина, применяемого в приборах В. А. Гаврилова, фотометрирование с применением поляроида обеспечивало однородную шкалу у всех экземпляров прибора и высокую ее стабильность (стабильность оптических свойств). С 1962 г. М-53 был внедрен на сеть и к 1964 г. он полностью заменил ИДВ. Методика его применения осталась той же, что и для ИДВ. М-53 до настоящего времени является основным прибором для определения метеорологической дальности видимости на сети метеорологических станций.

Измерение высоты нижней границы облаков. До начала 1960-х годов для определения высоты нижней границы облаков в основном применялись потолочный прожектор ПИ-45 в темное время суток и шары-пилоты в дневное время. С развитием авиа-

ции, повышением ее требований к обеспечению безопасности взлета и посадки самолетов остро встал вопрос о создании современной аппаратуры для оперативного определения высоты нижней границы облаков. В конце 1950-х годов в НИИГМП (С. Н. Божевилов, Л. А. Шестопалов) была предпринята попытка создать измеритель высоты нижней границы облаков на базе триангуляционного метода с прожекторным лучом. Однако разработанный прибор А-26, так же как и ПИ-45, этой задачи не решал. Значительный прогресс в разработке прибора для измерения высоты нижней границы облаков был достигнут на Московском заводе радиоэлектронной аппаратуры, где был создан измеритель на основе светолокационного метода импульсным модулированным источником света. Прибор ИВО приняли к производству в 1969 г., и он быстро нашел широкое применение, в первую очередь на АМСГ. Затем им стали оснащаться и метеорологические станции основной сети (станции типа М-2).

Однако для крупных аэропортов с интенсивным движением для обеспечения полетов в соответствии с международными требованиями необходимо было доработать прибор с целью увеличения дистанционности измерений до 10 км. Эта задача была решена ГГО в 1971 г. (Р. А. Круглов) созданием специальной дистанционной приставки к ИВО. При дальнейшей модернизации ИВО — создании ИВО-1М — приставка была включена в комплект приставки прибора для АМСГ.

Последующее усовершенствование ИВО-1М привело к созданию на его базе РВО-2 с приставкой ДВ-1М для аэродромов.

В 1985—1989 гг. в связи с повышением требований авиации к измерению высоты нижней границы облаков как в отношении частоты обновления информации, так и в отношении диапазона измерений в ГГО (Л. В. Анискин, С. М. Персин) был разработан датчик высоты облаков (ДВО). В датчике использованы излучатель и приемник световых импульсов от РВО-2; блоки управления и обработки результатов измерения построены на основе микропроцессорных устройств с дистанционной передачей информации на расстояние. В вычислительном устройстве реализована программа определения высоты нижней границы облаков по восьми измерениям с интервалом 1 с и мажоритарной выборкой высоты из этих восьми измерений. Диапазон измерения высоты облаков был расширен в соответствии с международными

требованиями и составил 15—2000 м. Информация отображается на цифровом индикаторе; предусмотрен выход в автоматическую информационную систему (автоматическую станцию).

В настоящее время все категорированные аэродромы России и СНГ оснащены этой аппаратурой.

Актинометрические измерения (измерения лучистой энергии). После окончания Великой Отечественной войны практически уже в первые месяцы перед Гидрометслужбой была поставлена задача по фундаментальным исследованиям процессов тепло-, влаго- и массообмена в пограничном слое атмосферы и приложению этих исследований к обоснованию мероприятий, проводимых с целью повышения эффективности сельскохозяйственного производства. Основой исследований являлось изучение составляющих теплового баланса деятельной поверхности, а контроль достоверности результатов заключался в проверке соответствия всех составляющих уравнению теплового баланса подстилающей поверхности. Измерение достоверных значений составляющих баланса лучистой энергии в вопросах повышения эффективности сельскохозяйственного производства имеет кардинальное значение. Поэтому разработке приборов и аппаратуры для измерения прямой, рассеянной, отраженной от поверхности Земли солнечной радиации, а также излучения Земли и атмосферы, обеспечению этими приборами крупных экспедиционных исследований и организации актинометрических наблюдений на территории регионов с интенсивным сельскохозяйственным производством уделялось первостепенное внимание.

К концу 1945 г. на сети гидрометеорологических станций актинометрические наблюдения выполнялись только в обсерваториях и состояли в основном из измерений прямой солнечной радиации. Для этого использовался биметаллический актинометр Михельсона. Изготовление актинометров Михельсона было организовано в ЭПМ ГГО, а также на московском заводе при Сельскохозяйственной академии им. К. А. Тимирязева.

Абсолютные приборы — пиргелиометры, применявшиеся в качестве контрольных приборов для актинометров, изготавливались в мастерских ГГО (С. И. Савинов), а также в Научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ) под руководством А. Н. Бойко по образцам пиргелиометра Ангстрема.

Для измерения суммарной радиации, приходящейся на горизонтальную поверхность (инсоляции), в основном применялись довоенные термоэлектрические пиранометры С. И. Савинова. С целью удовлетворения существенно увеличивающихся потребностей в актинометрических приборах в 1949—1950 гг. в ГГО были выполнены разработки всего необходимого комплекса аппаратуры и подготовлено ее производство в ЭПМ ГГО в объемах, достаточных для экспедиционных исследований и интенсивно развивающейся сети постоянных наблюдений на станциях. Руководство разработкой приборов и документации осуществляли Ю. Д. Янишевский (научно-методическое руководство и сопровождение), И. Ф. Скачкова и В. С. Алдыбаев (разработка конструкции, производство). Приборы создавались на основе термоэлектрических преобразователей и стрелочных гальванометров для измерения термо-э.д.с.

Для измерения суммарной, рассеянной и отраженной радиации был разработан пиранометр М-80 с квадратной термобатареей.

Для измерения радиационного баланса (разности между радиационным потоком, приходящим от Солнца и атмосферы, и радиационным потоком от подстилающей поверхности) был создан балансомер с двумя прямоугольными окнами — приемниками радиации.

Для измерения термо-э.д.с. каждого из приборов разработан специальный магнитоэлектрический гальванометр ГСА-1 с внутренним сопротивлением 120—130 Ом и ценой деления 0,8 мкА.

Комплект приборов (актинометр, пиранометр, балансомер и гальванометр) выпускался в 1950—1955 гг. в ЭПМ ГГО, а с 1955 г. его производство было передано Тбилисскому заводу „Гидрометприбор“. Главная геофизическая обсерватория продолжала осуществлять научно-методическое руководство производством и усовершенствованием выпускаемых приборов.

Для выполнения научно-исследовательских работ Ю. Д. Янишевский создал пиранометр повышенной точности и меньшей инерционности, в котором термобатарея была выполнена в виде ажурной звездочки. При такой конструкции исключалась зависимость чувствительности прибора от направления солнечных лучей относительно прямоугольных полей термобатарей.

В качестве образцового прибора для измерения солнечной радиации оставался принятый во всем мире абсолютный пиргелиометр Ангстрема с прямоугольными полями зрения. Пожалуй, одна из первых конструкций пиргелиометра Ангстрема с круглым полем зрения ($L = 5^\circ$) была предложена А. Н. Бойко. В 1950 г. в дополнение к принятому в ГГО образцовому пиргелиометру Ангстрема в обсерватории были разработаны и изготовлены новые образцовые пиргелиометры с прямоугольным (классическим) и с круглым отверстием ($L = 5^\circ$). Образцы этих приборов были аттестованы при сравнении с образцовым прибором ГГО, а затем при международных сравнениях в Давосе (Швейцария). В последние годы принципиально новый пиргелиометр с круглым отверстием и коническими чувствительными элементами был создан А. А. Кмито. Этот прибор отличался более высокой чувствительностью и не требовал применения высокочувствительных зеркальных гальванометров.

Следует указать на важный вклад в организацию и постановку актинометрических измерений у нас в стране И. А. Покровской и В. А. Клеванцовой, разработавших методику поверки актинометрических приборов как в естественных условиях, так и на установках с искусственным излучением.

Новое поколение актинометрических приборов на основе модернизации выпускавшихся актинометра АТ-50, пиранометра М-80М и балансомера М-10М было разработано ГГО в сотрудничестве с Тбилисским заводом (руководитель разработки С. И. Зачек) в 1980—1983 гг., эти приборы выпускались до последнего времени.

Под руководством С. И. Зачека было создано также новое поколение высокочувствительных полупроводниковых актинометрических приборов. Однако их серийное изготовление не было начато из-за неподготовленности производства.

Дистанционные метеорологические станции. При большом числе сроков наблюдения на станциях, особенно на АМСГ, возникла потребность в уменьшении числа выходов наблюдателя на метеорологическую площадку.

Для оперативного обслуживания ряда потребителей гидрометеорологической информации достаточно было иметь, кроме результатов некоторых визуальных наблюдений, данные измерений скорости и направления ветра, температуры и влажности

воздуха. При этом точность измерений даже для синоптических сроков до 1960 г. требовалась ниже, чем для климатических обобщений.

В соответствии с этим сразу же после окончания войны в ГГС и НИИГМП были разработаны (практически одновременно) дистанционные метеорологические станции для измерения температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра (В. Н. Сварчевский, В. А. Усольцев).

На основе этих станций Ленинградским заводом „Гидрометприбор“ выпускалась станция ДМС-Н-49 (1948—1949 гг.), а после модернизации и ряда технологических усовершенствований — ДМС-Н-53 (1953 г.). В станции ДМС-Н-53 использовался медный термометр сопротивления, включаемый в схему неравновесного моста. Для уменьшения влияния изменения сопротивления соединительных проводов в неравновесном мосте применена трехпроводная схема включения термометра.

В 1956—1959 гг. Ленинградским заводом „Гидрометприбор“ (А. Ф. Застенкер) была разработана и запущена в производство дистанционная станция М-49, которая отличалась от ДМС-Н-53 конструктивным выполнением (блоки температуры и влажность), а также новым датчиком скорости и направления ветра. Для измерения скорости ветра использовано ветровое колесо с горизонтальной осью вращения, а для определения направления ветра — сельсинная передача положения флюгарки.

С 1961 г. в связи с повышением требований к точности синоптической информации и введением нового кода для передачи информации в синоптические сроки дистанционные станции стали использоваться только для обеспечения оперативной информацией отдельных потребителей.

В 1951 г. в НИИГМП была разработана дистанционная метеорологическая станция для применения на морских судах (М. Е. Азбель, Г. Н. Соловьев). Станция позволяла производить измерения скорости и направления ветра относительно корабля температуры и влажности воздуха и температуры забортной воды. Скорость ветра измерялась трехчашечной вертушкой с вертикальной осью вращения, направление ветра определялось с помощью виндрозы (колесо Салейрона) и потенциметрической схемы (как в ДМС-Н-53). Для измерения температуры и влажности воздуха был разработан психрометр с термометрами сопро-

тивления и автоматическим смачиванием. Измерение сопротивления термометров производилось равновесным мостом с трехпроводной схемой включения термометров.

Для защиты датчиков от внешних воздействий использовался защитный кожух — цилиндр. При производстве измерений блок датчиков выдвигается из цилиндра специальным электродвигателем с концевыми выключателями. Станция ГМ-6 серийно выпускалась с 1955 г. и обеспечивала несколько большую точность измерения температуры воздуха ($\pm 5^\circ\text{C}$) и скорости ветра ($0,5+0,05V$) по сравнению с ДМС-Н-53 и М-49.

Автоматические метеорологические станции. Первые образцы автоматических радиометеорологических станций, созданные во время Великой Отечественной войны (АРМС-1, АРМС-2, АРМС-3 и др.), показали, что такие станции в принципе могут обеспечить измерение ряда метеорологических величин при функционировании в автономном режиме (без обслуживания) в течение года. Особые сложности в их эксплуатации отмечались в зимнее время из-за налипания и намерзания снега на элементах конструкции (главным образом на блоке термометра и ветра). Учитывая необходимость получения информации об условиях погоды на трассе Северного морского пути для метеорологического обеспечения проводки судов, было принято решение об усилении работ по созданию необслуживаемых радиометеорологических станций. Эти работы выполнялись НИИГМП совместно с Московским заводом „Гидрометприбор”.

В 1949 г. на Московском заводе было начато производство станции АРМС-3М. Она представляла собой усовершенствованный вариант станции АРМС-3 и состояла из блока датчиков температуры воздуха, скорости и направления ветра, атмосферного давления. Для измерения атмосферного давления применялся блок барокоробок, связанный рычажной передачей со стрелкой указателя. Для измерения температуры использовалась биметаллическая пластина. Стрелки указателей давления и температуры перемещались по поверхности барабана с нанесенными на нем кодовыми масками для формирования соответствующих сигналов в виде букв азбуки Морзе. Скорость ветра определялась по анемометру, вертушка которого состояла из четырех полуцилиндров (вместо чашек) и флюгарки с контактными пластинами.

Питание станции осуществлялось от батареи щелочных аккумуляторов, заряд которой поддерживал работу в течение года. Для обеспечения работоспособности батареи контейнер с ней и блоком управления станцией закапывался в землю на глубину 1,5—2,0 м.

В 1948—1952 гг. в НИИГМП была создана автоматическая радиометеорологическая станция АРМС-50. Ее отличительной особенностью было кодирующее устройство, выполненное на шаговых искателях, применяемых в телефонных станциях. Существенным недостатком станции АРМС-3 была малая мощность радиопередатчика, что часто приводило к пропускам в приеме информации. Для создаваемой станции был заказан радиопередатчик, работающий в двух диапазонах длин волн — для дневного и ночного времени.

Для станции АРМС-50 были разработаны датчик количества осадков, выпадающих между двумя последовательными сеансами передачи, и датчик наличия солнечного света в момент наблюдений („есть” — „нет”).

В результате разработка станции затянулась, и новая станция под индексом АРМС-Н (необслуживаемая) появилась только в 1952 г. Станция АРМС-50 была изготовлена только в двух экземплярах и практически была промежуточным звеном в разработке АРМС-Н.

Станция АРМС-Н (М-36) производила измерения атмосферного давления, температуры воздуха, скорости и направления ветра и количества жидких осадков за интервал между сроками измерений, а также отмечала наличие (или отсутствие) солнечного сияния в момент измерений.

Развитие метрологического обеспечения измерений

В 1832 г. в Санкт-Петербурге при Академии наук была учреждена комиссия для приведения к единообразию мер и весов в Российской империи.

Было принято решение об изготовлении образцовых мер: массы в 1 фунт и длины в 1 сажень. Величина сажени была определена в соответствии с указом Петра I в 3 аршина, а размер ар-

пина был определен в 28 английских дюймов. Величина массы в 1 фунт была установлена равной образцовому фунту 1747 г.

Изготовление образца сажени было поручено английскому метрологу Кэтеру, который после тщательного сравнения изготовленного им образца с английскими эталонами длины передал аттестованный им образец Академии наук. По образцовой мере в 1 сажень в мастерской Академии наук механиком Гиргенсоном под руководством академика А. Я. Купфера был изготовлен и откомпарирован образец прототипа меры длины, который был узаконен в 1835 г.

В 1835 г. был изготовлен прототип русского платинового фунта, представлявший собой прямой цилиндр диаметром около 29 мм и высотой 33 мм.

В 1842 г. было подготовлено „Положение о коренных основаниях Российской метрической (в смысле измерительной) системы и принятых по сему предмету распорядительных мерах”, которое было утверждено императором Николаем I в Петергофе 4 июня 1842 г. В этом Положении устанавливаются основы Государственной службы мер и весов, а также санкционируется создание специального учреждения для хранения образцовых мер — Депо образцовых мер и весов. Первым ученым — хранителем образцовых мер (1842—1865 гг.) был назначен академик А. Я. Купфер. Это назначение было не случайным, так как к тому времени А. Я. Купфер, будучи директором Нормальной магнитно-метеорологической обсерватории, уже создал первую сеть (систему) обсерваторий на обширной территории России и обеспечил высокую степень сравнимости и однородности результатов измерений, как магнитных, так и метеорологических, на всех пунктах наблюдений. Без этого невозможно проведение анализа результатов и получение каких-либо достоверных выводов. Для обеспечения этих основных метрологических требований к системе измерений А. Я. Купфер разместил нормальные (образцовые) приборы и установки в головной обсерватории, а также создал обязательные для всех обсерваторий инструкции по производству измерений. Им были организованы регулярные сверки приборов обсерваторий с образцовыми приборами и наблюдениями Нормальной обсерватории. Да и сам персонал обсерваторий регулярно проходил стажировку в Нормальной обсерватории. Дело в том, что в метеорологических измерениях без обеспече-

ния однородности и сравнимости результатов измерения каждого пункта наблюдений сами наблюдения в системе становятся бессмысленными. Это прекрасно понимали и А. Я. Купфер, и сменивший его М. А. Рыкачев, и Г. И. Вильд, и все другие руководители Гидрометслужбы, которые всегда придавали особое значение всем мероприятиям по поддержанию должного уровня метрологического обеспечения измерений в каждой обсерватории, на каждой станции или посту.

Важнейшими составляющими метрологического обеспечения, выделенными А. Я. Купфером, Г. И. Вильдом и всеми последующими руководителями системы, были разработки и сличения рабочих образцов приборов с эталонами, обеспечение единства методики и обобщения результатов измерений. А поскольку обеспечение сравнимости, однородности и достоверности результатов измерений в метеорологии имеет особое значение, то и организация метрологического обеспечения в метеорологии была поставлена особенно строго, даже по сравнению с общетехническими измерениями.

Первые образцовые приборы, с которыми сравнивались приборы всех обсерваторий, были изготовлены и аттестованы под непосредственным руководством А. Я. Купфера. К ним принадлежит прежде всего образцовый барометр, изготовленный в мастерской Академии наук Гиргенсоном (1835 г.). Это был первый в мире сифонно-чашечный барометр (автор разработки — академик А. Я. Купфер). Барометр Купфера представлял собой стальную чашку с мягким дном из замши. На крышке чашки были впаяны две стальные гильзы, в которых крепились две стеклянные трубки: одна — барометрическая с запаянным концом, вторая — короткое колено барометра, сообщавшееся с атмосферой (при перевозке и в перерывах между наблюдениями закрывалось). Между трубками крепилась линейная мера длины, которая могла перемещаться вверх—вниз с помощью кремальерного устройства. Длина меры прокомпарирована точно на 600 полулиний, или 30 английских дюймов. Отсчеты положения мениска ртути производились по одной шкале от верхнего и нижнего обреза меры. Для учета погрешности от наличия газа в барометрической трубке измерения проводились при двух уровнях ртути в коротком колене, отличавшихся друг от друга на 10 полулиний шкалы. Барометр был настолько точен, что даже в 1899 г. (чере-

65 лет) в отчете о 50-летию Главной физической обсерватории (ГФО) академик М. А. Рыкачев назвал его наиболее точным прибором из всех известных барометров. Одним из недостатков барометра Купфера была сложность производства измерений: требовалась трехкратная наводка концевой меры на нижний и верхний мениски ртути. Кроме того, в барометре применены слишком узкие барометрические трубки, что при загрязнении ртути может дать существенную погрешность за счет изменения кривизны мениска. Эти недостатки позднее были устранены в модернизации барометра Гиргенсона его преемником — механиком Краузе под руководством Купфера.

Для измерения температуры механик Гиргенсон под руководством А. Я. Купфера изготовил образцы нормального термометра, которые были поверены как при положительной ($0...+30\text{ }^{\circ}\text{R}$), так и при отрицательной ($0...-17\text{ }^{\circ}\text{R}$) температуре. Результаты проверок были обработаны по интерполяционным формулам Бесселя. Методика обработки была опубликована в первых изданиях „Инструкции для производства метеорологических наблюдений (1835—1836 гг.)”. По этим термометрам наносились шкалы всех термометров, изготавливавшихся Гиргенсоном и Краузе. Сравнения сохранившихся термометров Купфера тех времен с образцовыми термометрами 1895 г., результаты которых приведены в отчете академика М. А. Рыкачева, показали совпадение отсчетов в пределах от 0 до $+24\text{ }^{\circ}\text{R}$ с точностью до $0,1\text{ }^{\circ}\text{R}$ и в пределах от 0 до $-17\text{ }^{\circ}\text{R}$ с точностью от $0,1$ до $0,2\text{ }^{\circ}\text{R}$.

Академик Г. И. Вильд, принявший руководство ГФО после А. Я. Купфера, строго следовал основным положениям Купфера в части метрологического обеспечения однородности и сравнимости результатов наблюдений (по нашему мнению, даже более строго) и создал новые средства поверки, которыми снабдил все региональные обсерватории для проведения систематического контроля рабочих средств измерений. Здесь нельзя не упомянуть разработку нового эталонного барометра, а также образцовых барометров для регионов — инспекторских и контрольных. Эталон для измерения атмосферного давления был разработан Г. И. Вильдом и изготовлен в мастерских ГФО механиком Брауэром в 1870 г. Эталон представлял собой пару сифонно-чашечных барометров (№ 1 и 2) и был, по существу, групповым эталоном. Результаты исследований точности измерения атмосферного дав-

ления этим эталоном, который является абсолютным прибором, показывают, что он позволяет получать значения атмосферного давления с погрешностью не более 0,03 мм рт. ст.

Первая сессия Комиссии по приборам и методам наблюдения ВМО (Торонто, 1953 г.) приняла решение о рекомендации этого эталона давления в качестве одного из региональных эталонов для регионов Европы и Азии (требования к точности региональных эталонов были определены значением допустимой погрешности не более 0,05 мм рт. ст.). В результате международных сравнений барометров, которые проводились в 1956—1957 гг., в эталону ГГО были приведены барометры девяти стран, в том числе Болгарии, Венгрии, Польши, Китая, Монголии и других.

Эталон Г. И. Вильда успешно служил метрологам Советского Союза и значительного числа зарубежных стран до 1970 г., когда был изготовлен и аттестован новый эталон. Этот эталон в принципе аналогичен эталону Г. И. Вильда с последующими усовершенствованиями барометра № 2.

Точность нового эталона атмосферного давления характеризуется (по данным исследований ВНИИМа) средней квадратической погрешностью 0,005 мм рт. ст.

Заводом „Эталон” изготовлены две пары эталонных барометров. Одна пара установлена в ГГО и служит для сверки с ними образцовых барометров УГМС (через инспекторские барометры). Вторая пара хранится во ВНИИМе Госстандарта как государственный эталон.

Барометры конструкции Вильда—Турретини стали использоваться как инспекторские барометры для непосредственного сличения с ними рабочих образцов барометров метеорологических станций. Такое применение этих барометров сохранилось и до наших дней.

Существенные работы были выполнены Г. И. Вильдом и для метрологического обеспечения измерений температуры воздуха. Так, в 1886 г. он приобрел в Париже у мастера Тонелло пару ртутных термометров, аналогичных международным образцовым термометрам. Эти термометры были всесторонне исследованы в Международном бюро мер и весов в Севре (Франция), где были организованы их сличения с аттестованным международным эталоном — водородным термометром и с другим газовым термометром, наполненным азотом. В результате были получены

поправки этих термометров относительно международного эталона, и российская температурная шкала была привязана к международному эталону в Севре для положительной температуры. В 1891 г. купленный у Тонелло спиртовой образцовый термометр был также в Севре привязан к международному эталону до температуры -60°C . Этим были завершены работы по привязке российских термометров к международному эталону.

Одной из существенных заслуг Г. И. Вильда в деле метрологического обеспечения метеорологических измерений следует считать перевод с 1870 г. метеорологических измерений в России на метрическую систему измерений. Атмосферное давление с 1 января 1870 г. стало измеряться в миллиметрах ртутного столба, количество атмосферных осадков — в миллиметрах слоя воды, высота снежного покрова — в сантиметрах. Для измерения температуры была принята стоградусная шкала Цельсия. Во всех остальных измерениях, а также в практических приложениях старые русские меры были заменены на метрическую систему только в 1918 г. декретом Совета Народных Комиссаров РСФСР.

Совершенствование методики производства измерений в метеорологии имеет не менее важное значение, чем вопросы передачи единиц измерения. Часто именно здесь возникает нарушение однородности и сравнимости результатов измерений. Дело в том, что приходится измерять быстро меняющиеся метеорологические величины, причем амплитуда таких пульсаций, как правило, превышает в несколько раз точность измерений, обеспечиваемую измерительным прибором. На эту пульсационную составляющую накладываются и более медленные изменения измеряемой величины.

И наконец, полученный результат измерения содержит еще и ошибки, связанные с влиянием условий измерения, таких как тепловое излучение Солнца, атмосферы и земной поверхности, агрессивность среды, в которой работают приборы, а также с влиянием гидрометеоров и изменения других метеорологических величин. Задачу исключения (или, точнее, уменьшения) влияния этих факторов на результат измерения относят к методическому обеспечению измерений, хотя, в принципе, уменьшение погрешности измерений является метрологической задачей, и в практике метеорологических измерений этому вопросу придается важное значение.

В измерении температуры воздуха важными работами (для измерений того времени), выполненными Вильдом и сотрудниками Павловской обсерватории под его руководством, были выбор конструкции радиационной защиты для термометров на метеорологической станции и определение рациональной высоты измерения температуры над поверхностью земли. После большого числа экспериментов была выбрана деревянная жалюзийная будка (будка Вильда), в которой термометры для усиления вентиляции приводились во вращение ручным приводом. Позднее, когда Р. Ассман сконструировал психрометр с механическим вентилятором, такой психрометр изготовили в мастерской Павловской обсерватории под руководством Вильда. Профессору Н. Зворыкину было поручено исследование рациональной скорости вентиляции, при этом он также определил зависимость психрометрической постоянной от скорости вентиляции для термометров различной конструкции и обосновал рациональность скорости вентиляции около 2 м/с. Исследования Н. Зворыкина позволили уточнить психрометрическую постоянную для стационарного психрометра, а также расчеты психрометрических таблиц для определения влажности воздуха. Психрометр Ассмана с полученными уточнениями был аттестован как нормальный прибор для измерения влажности воздуха. Для сетевых измерений температуры и влажности воздуха оставалась деревянная будка Вильда. В 1912—1917 гг. по результатам исследований Охлябинина она была заменена английской будкой, которая служит и до сих пор. При этом были получены и поправки к результатам измерений в будке Вильда для сохранения однородности рядов наблюдений.

Следует также отметить важные исследования по метрологическому обеспечению актинометрических измерений, выполненные в 1891—1893 гг. О. Д. Хвольсоном в Павловской обсерватории по заказу Г. И. Вильда. Из-за значительного числа разнородных погрешностей измерений собранные Г. И. Вильдом различные актинометры давали самые разные результаты измерений, абсолютно не согласующиеся друг с другом. Проанализировав результаты одновременных измерений в течение нескольких месяцев, О. Д. Хвольсон разработал принципиально отличный „динамический” режим измерений, предварив установленные только почти через 60 лет основы регулярного теплового режима (Г. М. Кондратьев, 1950 г.). Кроме того, О. Д. Хвольсон разрабо-

тал, изготовил и исследовал новый относительный прибор — актинометр, а позднее (в 1893 г.) и абсолютный прибор — пиргелиометр, который аттестуется как эталон. Позднее (через 3—5 лет) О. Д. Хвольсон, состоявший в дружеской переписке с Ангстремом, получил от него малоинерционный пиргелиометр, который признал более совершенным. После исследования и усовершенствования пиргелиометр Ангстрема был аттестован как эталон. Пиргелиометр Ангстрема с 1905 г. и до настоящего времени используется как эталон и в международных сличениях. В 1975 г. А. А. Кмито в ГГО создал более совершенный пиргелиометр с полостными приемниками радиации, который обеспечивал и абсолютно точную апертуру вырезаемого пучка прямой солнечной радиации, однако, несмотря на результаты испытаний и аттестацию его при международных сравнениях, за международный эталон он принят не был из-за технических сложностей производства полостных приемников радиации.

Дальнейшие работы в области метрологического обеспечения измерений были направлены на совершенствование методики поверки (сличения) рабочих образцов с контрольными с целью увеличения количества поверяемых приборов. Этого требовали и рост количества станций и обсерваторий, выполняющих метеорологические наблюдения, и увеличение числа видов метеорологических наблюдений. Так, с 1900 г. появилась необходимость создания методов поверки актинометрических приборов, приборов для измерения оптических характеристик атмосферы; все шире стали применяться анемометры для более точных измерений скорости ветра.

Рост производства метеорологических приборов в мастерских Санкт-Петербурга (А. Ф. Мюллера и др.) потребовал создания бюро поверки в самом городе, которое и было сначала организовано в помещении обсерватории, а затем перенесено в отдельное здание. Были заказаны новые термостаты для поверки термометров при положительной и отрицательной температуре, гигростат для поверки гигрометров и гигрографов, установки для поверки анероидов. В 1935 г. в бюро поверки была построена аэродинамическая труба для поверки анемометрических приборов. Труба была открытого типа и занимала большой зал площадью около 1000 м². Проектировали и строили трубу специалисты Политех-

нического института. Труба обеспечивала поверку анемометрических приборов при скоростях от 0,5 до 20 м/с.

Развитие авиационных перевозок потребовало дальнейшего повышения уровня метрологического обеспечения практически всех видов метеорологических измерений и в первую очередь измерения скорости ветра, высоты нижней границы облаков, прозрачности атмосферы и вычисления дальности видимости.

В это же время повысились и требования к аттестации методов и средств метрологического обеспечения в общегосударственной службе метрологии и стандартизации. Для выполнения этих новых требований были проведены масштабные работы по ревизии как методических, так и аппаратурных решений основных метеорологических измерений и их метрологического обеспечения.

Метрологическое обеспечение применяемой на сети измерительной аппаратуры в 1975—1985 гг. приобрело особо важное значение в связи с государственной стандартизацией системы единиц измерения во всех областях науки и техники. Выполненная ревизия применявшихся эталонных, образцовых и контрольных приборов, а также поверочных установок и методик поверки (сличения) их с рабочими образцами потребовала прежде всего разработки и аттестации поверочных схем передачи единиц измерения от эталона до рабочего образца (градуировки рабочего образца прибора).

Здесь в ряде случаев пришлось разрабатывать и новые эталоны, образцовые и контрольные средства измерений, а также новые поверочные установки для сличения приборов.

Так, в поверочной схеме атмосферного давления для сличения рабочих образцов барометра с контрольным пришлось вместо инспекторского барометра разработать грузопоршневые барометры МАД-3М, ИМАД-4. Эталонные барометры ГГО (ртутные сифонно-чашечные № 3 и 4) аттестованы по первичному эталону Госстандарта СССР.

В основу поверочной схемы термометров положены образцовые платиновые термометры ПТС-10 I и II разрядов, которые градуируются по четырем реперным точкам Международной стоградусной шкалы температур. В качестве рабочих образцовых средств утверждены образцовые ртутные и спиртовые термометры, а также поверочные установки УТТ-6, жидкостные термостаты и криостаты.

Метрологические основы измерения влажности воздуха были существенно переработаны в отношении как методики вычисления влажности, так и аппаратурной реализации поверочной схемы. Так, для вычисления влажности воздуха была уточнена зависимость давления насыщенного водяного пара от температуры, расчетные формулы были приведены в соответствие международным стандартам, также была пересчитана и таблица значений давления насыщенного водяного пара для различных значений температуры. В психрометрическую формулу для расчета значений влажности при наблюдаемой температуре воздуха по психрометру введена поправка на различие теплоты испарения для льда и для воды. В соответствии с этим в 1972 г. пересчитаны психрометрические таблицы. Введенные изменения утверждены Госстандартом в виде специального ГОСТа на „Психрометрические таблицы” (ГОСТ 8.524—85).

Поверочная схема для приборов измерения влажности воздуха основана на применении сорбционно-гравиметрической установки Госстандарта, по которой аттестуются образцовые средства: гигрометры „Волна 2М”; гигрометр точки росы ГГО (ГТР ГГО), а также группа психрометров М-34. По образцовым средствам аттестуются рабочие гигрометры и психрометры, применяемые на станциях для измерения влажности воздуха. Сличение рабочих приборов с образцовыми осуществляется в гигростатах ПО-34 и ПО-18 в условиях бюро поверки.

Метрологическая аттестация актинометрических приборов производится по эталонному пиргелиомеру № 212, хранящемуся в ГГО, который аттестовывается по международному эталону. Сличение эталонов различных стран с Всемирным эталоном производится один раз в четыре года в Давосе (Швейцария) в естественных условиях. По эталонному пиргелиомеру России аттестуются образцовые актинометры бюро поверок, с которыми сличаются рабочие актинометрические приборы.

Таким образом, к настоящему времени достаточно хорошо определены метрологические основы измерений атмосферного давления, температуры, скорости ветра и актинометрических величин. Для измерений осадков и влажности воздуха требуются доработка метрологических основ измерений и создание более современных рабочих средств измерений.

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ

Предлагаемый обзор базируется на результатах гидрологических исследований, выполненных в основном в послевоенный период. После образования независимого Российского государства произошло некоторое сокращение исследований, особенно региональных, однако их преемственная связь с исследованиями в СССР сохранилась. По-прежнему лидером, определяющим пути развития гидрологических исследований, является Государственный гидрологический институт (ГГИ) — центральное научно-исследовательское учреждение Российской Федерации в области изучения поверхностных вод суши.

Как известно, прогресс в науке в значительной степени определяется теми, кто возглавляет то или иное ее направление. До 1968 г., более четверти века, лидером отечественной гидрологии был директор ГГИ Валериан Андреевич Урываев — ученый-организатор, внесший большой вклад в ее развитие. С его именем, как отмечалось во втором томе „Очерков по истории Гидрометеорологической службы России”, связаны такие важные этапы развития этой науки, как расширение и техническое оснащение гидрологической сети, создание экспериментальной гидрологии, укрепление международного гидрологического сотрудничества.

После смерти В. А. Урываева в 1968 г. директором ГГИ стал Алексей Александрович Соколов, его друг и последователь. Он руководил институтом с 1969 по 1981 г. и немало сделал для развития и претворения в жизнь идей В. А. Урываева, касающихся, в частности, совершенствования системы гидрологических наблюдений, нормирования гидрологических характеристик и международного сотрудничества. Под его руководством были выполнены фундаментальные исследования по водным ресурсам СССР, мировому водному балансу и водным ресурсам Земли, которые получили мировое признание.

После ухода А. А. Соколова на заслуженный отдых директором ГГИ в 1981 г. был назначен молодой ученый Игорь Алексеевич Шикломанов, который в трудных условиях переходного периода продолжает и развивает исследования, начатые его предшественниками.

Необходимо отметить, что если до середины XX в. практически все гидрологические исследования выполнял ГГИ, то в 1950—1960-х годах гидрологическая тематика стала активно развиваться и в других научно-исследовательских учреждениях Гидрометслужбы: в Гидрометцентре — гидрологические прогнозы, в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ) — гидрология арктической зоны России. В региональных НИГМИ были организованы гидрологические отделы, которые успешно решали задачи развития и применения гидрологических знаний для обслуживания различных отраслей экономики и рационального использования водных ресурсов регионов. Пик региональных гидрологических исследований пришелся на 1970—1980-е годы, когда в составе региональных НИГМИ действовали крупные гидрологические подразделения.

В 1960—1980-х годах было организовано более 50 крупных экспедиций, в том числе комплексных, проводивших гидрологические исследования в различных районах бывшего СССР. Об успехах отечественной гидрологии свидетельствует большее число научных публикаций в Трудах ГГИ, Гидрометцентра, ААНИИ и региональных НИГМИ (более 400 выпусков с 1951 г.), оригинальных монографий, подготовленных в эти годы. К концу 1990-х годов только крупных монографий по наиболее актуальным проблемам гидрологии было издано более 200. В начале второй половины XX в. были составлены и изданы основные нормативные документы: наставления, руководства, методические указания, регламентирующие работу гидрологической сети, часть из которых позже была переработана, но многие используются и в настоящее время. В 1970—1980-х годах была подготовлена серия нормативных документов по вопросам ведения Государственного водного кадастра. Большая работа в системе Гидрометслужбы проводилась по подготовке специалистов-гидрологов высшей квалификации. Аспирантуру и докторантуру при ГГИ, Гидрометцентре, ААНИИ по гидрологическим специальностям за прошедшие 50 лет окончили около 500 человек, более 200 из них защитили кандидатские и докторские диссертации и остались работать в системе Гидрометслужбы.

Говоря о широком размахе гидрологических исследований во второй половине XX столетия, нельзя не назвать имена представителей Центрального аппарата Гидрометслужбы, которые ока-

зывали постоянную помощь и поддержку коллективам, работающим по проблемам гидрологии. Это прежде всего руководители Гидрометслужбы в разные годы — Е. К. Федоров, Ю. А. Израэль и А. И. Бедрицкий, а также заместители руководителя С. С. Ходкин, В. И. Корзун и начальник УГМО С. К. Черкавский, на протяжении многих лет курировавшие гидрологические работы и внесшие большой вклад в развитие экспериментальной и прикладной гидрологии и международного гидрологического сотрудничества.

Всесоюзные гидрологические съезды

Большое значение для развития гидрологии имели междуведомственные Всесоюзные гидрологические съезды (ВГС), на которых подводились итоги проделанной работы и намечались перспективы дальнейших исследований. Всего во второй половине XX в. было проведено три таких съезда — III, IV и V, каждый из которых отразил определенный этап в поступательном движении гидрологической науки.

III ВГС состоялся 7—17 сентября 1957 г., почти через 30 лет после II съезда. Показателем развития гидрологических исследований за этот отрезок времени явилось участие в нем большого числа ученых и специалистов различных министерств и ведомств. На съезде присутствовали представители 406 организаций и учреждений страны — всего около 1200 человек, в том числе 35 иностранных гостей. Председателем съезда был Ф. Ф. Давитая. Основную работу по подготовке и проведению съезда провели директор ГГИ В. А. Урываев и его заместитель А. И. Чеботарев. На пленарных и секционных (9 секций) заседаниях было заслушано 427 научных докладов. Достижения гидрологической науки были показаны на выставке, на которой демонстрировался 1341 экспонат. Большое внимание на съезде было уделено необходимости совершенствования методов инженерно-гидрологических расчетов и прогнозов, повышению их надежности и увеличению заблаговременности прогнозов. Были подведены предварительные итоги изучения новых в то время водных объектов — водохранилищ, рассмотрены подходы к решению проблемы антропогенных изменений режима и баланса

вод суши и др. В решениях съезда была отмечена необходимость развития гидрологической сети в азиатской части СССР, экономика которой быстро развивалась.

Важной явилась рекомендация съезда о целесообразности создания общегосударственного межведомственного координационного органа в области комплексного использования и охраны водных ресурсов, который затем и был создан при Государственном комитете СССР по науке и технике (ГКНТ).

IV ВГС состоялся 9—13 октября 1973 г., через 15 лет после III съезда. Он был созван для обсуждения актуальных проблем гидрологии в связи с возросшим водохозяйственным строительством, широким размахом орошения и обводнения земель, а также директивным постановлением Правительства СССР по борьбе с загрязнением и истощением водных ресурсов, по межбассейновому перераспределению речного стока, по реализации „Основ водного законодательства СССР и союзных республик” и др.

Председателем оргкомитета съезда был В. И. Корзун. Основная работа по подготовке и проведению съезда выполнялась под руководством директора ГГИ А. А. Соколова. В работе съезда приняли участие представители многих министерств и ведомств, всего 1386 человек, в том числе 40 иностранных гостей.

На заседаниях съезда был заслушан 471 доклад по проблемам юдного баланса и расчетов стока, гидрологическим аспектам юдного хозяйства, гидрологическим прогнозам, взаимодействию поверхностных и подземных вод, гидрологии озер, водосрانيлищ и устьев рек, качеству вод, русловым процессам, проблемам гидрометрии и гидрофизики.

В решениях съезда была отмечена необходимость развития юдного хозяйства с учетом количественных и качественных изменений водного режима и водных ресурсов, создания автоматизированной информационной системы водного кадастра, включая кадастр использования вод.

V ВГС проходил 20—24 октября 1986 г. на фоне обострения юдной проблемы, появления признаков количественного и качественного истощения водных ресурсов, особенно в засушливых южных районах СССР. В связи с этим на съезде развернулась острая дискуссия о путях решения водной проблемы, о мерах по национальному использованию и охране вод, внедрению ресур-

соберегающих технологий, регулированию речного стока, очистке и использованию сточных вод, вариантам межбассейнового перераспределения стока и др. Большое внимание было уделено созданию единой системы учета вод и их использования в народном хозяйстве, внедрению автоматизированной системы водного кадастра.

Председателем съезда был Ю. А. Израэль. Основная работа по подготовке и проведению съезда была выполнена под руководством директора ГГИ И. А. Шикломанова и его заместителя В. С. Вуглинского. На съезде были широко представлены руководители ведущих научных и проектных организаций. Было создано 8 секций: водные ресурсы и водный баланс, система гидрологических наблюдений и водный кадастр, гидрологическое обоснование водохозяйственных мероприятий, качество вод и научные основы их охраны, теория и методы гидрологических расчетов, гидрологические прогнозы и предсказание опасных гидрологических явлений, озера и водохранилища, русловые процессы и наносы. На секциях было заслушано 42 обобщающих проблемных доклада, 48 ключевых и 530 авторских докладов.

В промежутках между IV и V съездами межведомственная и межреспубликанская координация гидрологических наблюдений и исследований осуществлялась секцией „Водные ресурсы и баланс вод”, созданной при Государственном комитете по науке и технике, председателем которой являлся директор ГГИ А. А. Соколов. Секция провела многочисленные совещания и конференции по обсуждению региональных гидрологических проблем в союзных республиках бывшего СССР (заседания секции состоялись в Киеве, Минске, Ташкенте, Ашхабаде, Фрунзе, Тбилиси, Алма-Ате и других городах).

VI Всероссийский гидрологический съезд, как и все предыдущие съезды, проходил в Санкт-Петербурге с 28 сентября по 1 октября 2004 г. Съезду предшествовала большая подготовительная работа, которую проводили Оргкомитет съезда под председательством Руководителя Росгидромета, президента ВМС А. И. Бедрицкого, Программный комитет съезда под председательством заместителя председателя Оргкомитета, директора ГГИ профессора И. А. Шикломанова и коллектив Государственного гидрологического института.

Цель съезда — выработать стратегию развития гидрологической науки и водного хозяйства на ближайшую перспективу на основе максимальной консолидации имеющегося в стране научно-технического и производственного потенциала. В работе съезда приняли участие более 500 представителей научных, проектных, учебных и производственных организаций Российской Федерации, стран Содружества Независимых Государств и ряда других стран.

На пленарной сессии съезда были заслушаны восемь заказных докладов ведущих ученых и специалистов в области гидрологии и водного хозяйства, посвященных стратегии поддержки и развития важнейших направлений гидрологической науки и практики.

На следующих шести параллельных секциях съезда были заслушаны 195 устных и представлены 288 стендовых докладов, в которых детально обсуждался широкий круг проблем в области гидрологии, водного хозяйства и гидроэкологии:

- состояние и перспективы развития системы гидрологических наблюдений и информационное обеспечение потребителей;
- наводнения и другие опасные гидрологические явления: оценка, прогноз и смягчение негативных последствий;
- водный баланс, ресурсы поверхностных и подземных вод, гидрологические последствия хозяйственной деятельности и изменений климата, уязвимость и адаптация социально-экономической сферы;
- экологическое состояние водных объектов, качество вод и научные основы их охраны;
- гидрофизические явления и процессы: формирование и изменчивость речного стока, гидрологические и водохозяйственные расчеты;
- проблемы русловых процессов, эрозии и наносов.

На двух „круглых столах” обсуждались проблемы гидрологического образования и трансграничного переноса воды, наносов и загрязняющих веществ.

В результате дискуссии участники съезда пришли к выводу, что за период, прошедший после V Всесоюзного гидрологического съезда, глобальные и региональные изменения в климатической системе и антропогенные факторы привели к существенным

изменениям в водном балансе, состоянии водных ресурсов и режиме водных объектов, качестве природных вод на территории Российской Федерации. Следствием этого явилось обострение межтерриториальных и межотраслевых споров по управлению использованием и распределению водных ресурсов. Участились и одновременно возросли масштабы и мощности опасных гидрологических явлений: катастрофических наводнений и паводков, засух и маловодья, сходов селей и лавин, нередко приводящих к гибели людей и большим материальным ущербам.

Экономический кризис 1980—1990-х годов в нашей стране крайне негативно отразился на работах в области гидрологии — сократилась наблюдательная сеть, снизилось качество гидрологических прогнозов, резко уменьшились объемы научных исследований, экспериментальных и экспедиционных работ, сократилось число тематических и учебных изданий в области гидрологии; из-за низкой зарплаты, внеурочного и опасного характера работ возникли большие сложности с наймом технического персонала для гидрологической сети. Большие опасения вызывают неудовлетворительное состояние многих водохозяйственных сооружений, возрастающие трудности проведения проектных и изыскательских работ, нехватка молодых ученых и специалистов в области гидрологии и водных ресурсов. Аналогичные проблемы существуют практически во всех остальных странах СНГ.

В то же время, по мнению участников съезда, российская гидрология сохранила свой основной производственный и научный потенциал. Стали заметны некоторые позитивные сдвиги в работе наблюдательной сети, возрос объем государственных заказов, расширилась номенклатура и повысилась оправданность гидрологических прогнозов. Новые научные достижения в области расчетов стока и водного баланса, оценки ресурсов поверхностных, подземных вод и их качества, изучения гидрологических и русловых процессов, полученные отечественными гидрологами, в том числе в совместных работах с зарубежными коллегами и в первую очередь из стран СНГ, позволили не только применить полученные знания на практике и обеспечить первоочередные потребности общества и экономики России в гидрологической информации и продукции, но и внести важный вклад в международное сотрудничество.

В сводном решении съезда, принятом на заключительном заседании 1 октября 2004 г., было отмечено, что стратегия развития отечественной гидрологической науки на ближайшую перспективу заключается в комплексном подходе к решению одобренных съездом важнейших научных, учебных и прикладных задач и в расширении межведомственного взаимодействия.

VI Всероссийский гидрологический съезд подтвердил высокий уровень российской гидрологии, ее востребованность и важную роль в решении как экономических, так и экологических задач, связанных с использованием, охраной и сохранением уникальных водных богатств нашей страны.

Система гидрологических наблюдений

Известно, что чем лучше построена сеть гидрологических постов и станций, тем больше возможности для научных исследований и обеспечения запросов народного хозяйства. Поэтому во второй половине XX в. проблема совершенствования системы нагурных наблюдений была в центре внимания ученых-гидрологов. Большая заслуга в решении этой проблемы принадлежит Д. Н. Борсуку, А. К. Проскуракову и И. Ф. Карасеву.

В годы Великой Отечественной войны сеть сильно пострадала, а на значительной территории России была полностью разрушена. Но уже к началу 1950-х годов, благодаря усилиям созданных во всех УГМС специальных оперативных отрядов (они назывались гидрографическими партиями), работавших под общим руководством А. П. Муранова, сеть была практически восстановлена до предвоенного уровня. На 1 января 1957 г. сеть уже насчитывала: в европейской части СССР — 3339 уровенных постов и 2389 гидрометрических створов для измерения расходов воды, в азиатской части — 202 поста и 1602 гидрометрических створа. Всего на территории СССР действовали 5541 уровенный пост и 3991 гидроствор. На 728 станциях производилось измерение расходов взвешенных наносов. Почти на 500 станциях велись наблюдения за испарением с водной поверхности и на 100 — за испарением с поверхности почвы.

Еще через 10 лет сеть возросла еще на 10 %. Возникли вопросы: какой должна быть численность сети? какое количество постов и станций было бы оптимальным?

Интересными и важными в этом отношении явились работы И. Ф. Карасева по определению оптимальной густоты сети гидрологических постов и станций. Для этой цели он использовал статистический метод. На основе коррелятивных связей между элементами гидрологического режима по станциям, расположенным на различном удалении друг от друга, им была рассчитана плотность сети, необходимая для интерполяции характеристик годового стока на неизученные реки с заданной точностью. Расчеты показали, что в ряде регионов и республик густота существующей сети уже соответствует оптимальной, а в отдельных случаях превышает ее. Суммарно для всей территории СССР оптимальная сеть, по расчету И. Ф. Карасева, должна состоять из 7666 постов (фактически на 1 января 1967 г. их было 5558) и 7666 гидростворов (фактически 4847). Оказалось, что для оптимизации сети необходимо увеличить число постов и гидростворов еще на 34 % (в отдельных регионах на 100 % и более). Фактический рост сети, конечно, был значительно меньше, так как он определялся не только теоретическими соображениями, но и реальными потребностями народного хозяйства и экономическими возможностями.

В 1985 г. количество пунктов наблюдений опорной гидрологической сети достигло 7152. Кроме того, в этот период действовала специализированная гидрологическая сеть в составе пунктов наблюдений за испарением с водной поверхности (50 испаромеров ГГИ-3000 и 50 испарительных бассейнов площадью 20 м²), за испарением с почвы (160 пунктов) и 16 воднобалансовых станций.

В течение последнего десятилетия произошло сокращение гидрологической сети на 30 %, вызванное экономическими трудностями страны.

Наряду с количественным ростом пунктов систематических наблюдений за уровнями и расходами воды значительное внимание уделялось повышению точности их измерения. В дополнение к наставлению по организации и производству гидрометрических работ на больших реках О. Н. Борсуком было подготовлено аналогичное руководство для малых рек (1952 г.).

В 1970-х годах в ГГИ были разработаны методики ускоренных измерений расходов воды на гидростворах, позволившие существенно снизить трудоемкость и сократить затраты времени при измерении характеристик речного стока, а также создана методика метрологической аттестации гидрологических постов. Эти и другие достижения в области гидрометрии были обобщены в монографии И. Ф. Карасева „Речная гидрометрия и учет водных ресурсов” (1980 г.). В начале 1990-х годов в ГГИ была разработана усовершенствованная методика определения количества пунктов наблюдений и структуры минимально необходимой гидрологической сети в современных экономических условиях, которая была применена УГМС при оптимизации сети.

По проблеме усовершенствования мониторинга состояния поверхностных вод суши важные выводы были получены в 1990-х годах о репрезентативности створов Государственной системы наблюдений (ГСН) за качеством воды (В. Г. Скакальский).

Опыт проектирования, строительства и эксплуатации гидрометрических устройств (лотков, плотин и т. д.) был обобщен в работе В. И. Чеботарева и А. Р. Скуе „Гидрометрические сооружения” (1955 г.), а позже в работе С. С. Гинко „Основы гидротехники” (1976 г.).

Значительное внимание уделялось экспериментально-конструкторским работам по созданию принципиально новых приборов с использованием последних достижений науки: ультразвукового эффекта, эффекта Доплера, аэрометодов для измерения расхода воды на больших реках и др.

В середине 1970-х годов заводы выпускали более 60 наименований сетевых гидрологических приборов, в том числе для измерений уровня воды, скорости и направления течения, температуры воды, стока наносов, волнения, испарения, ледового режима и др. Подавляющее число этих приборов было создано в ГГИ коллективом конструкторов, среди которых необходимо назвать имена А. М. Димаксяна, П. Н. Бурцева, К. Д. Завьялова. В числе новых разработок института, относящихся к 1990-м годам и выполненных под руководством Г. В. Рымши, — измеритель скорости потока (ИСП-1) и уровнемер поплавковый цифровой (УПЦ), которые по техническим характеристикам не уступают лучшим зарубежным образцам. В этот же период ГГИ совместно с ЦКБ ГМП был усовершенствован и модернизирован эталон ско-

рости водного потока — уникальный прямолинейный градуировочный бассейн ГГИ длиной 140 м, который широко используется для градуировки образцовых вертушек по заказам УГМС и других организаций.

На озерах и водохранилищах сеть постов и станций росла настолько быстро, как на реках. Их количество к концу 1960-х годов составляло 430, а к середине 1980-х годов возросло до 800.

В начале 1950-х годов на крупнейших озерах и водохранилищах, имеющих большое народнохозяйственное значение, были созданы гидрометеорологические обсерватории (ГМО), программы наблюдений которых составлялись индивидуально, с учетом гидрологических, водохозяйственных и других особенностей озера (водохранилища).

В 1951 г. на Цимлянском водохранилище была организована вторая, после Рыбинской, гидрометеорологическая обсерватория. В отличие от Рыбинской (созданной на действующем водохранилище), Цимлянская ГМО развернула свою работу еще до создания водохранилища, с момента начала его наполнения. Это дало возможность проследить за изменением водного режима водохранилища в процессе его формирования. Программа работ этой обсерватории предусматривала, помимо оперативного обслуживания гидрометеорологической информацией организаций, связанных с проектированием конструкций Цимлянского гидроузла, постановку широких исследований всех элементов водного баланса, течений, ветрового, волнового, уровня, термического, ледового режимов, переформирования берегов и ложа водохранилища и др. В дальнейшем озерные ГМО были созданы на Волгоградском, Братском и других водохранилищах, а также на озерах Чудско-Псковском, Байкал, Ладожском. Всего к концу 1970-х годов действовали 13 обсерваторий.

Без преувеличения можно сказать, что подобных обсерваторий, которые были созданы в СССР для комплексного гидрометеорологического изучения озер и водохранилищ, не было и нет ни в одной стране мира.

В 1950-х годах под руководством К. Е. Иванова и В. В. Романова была создана небольшая по количеству, но уникальная сеть станций на болотах (в их числе была станция на болоте Ламмин-Суо, функционирующая и в настоящее время в составе Главной экспериментальной базы (ГЭБ) ГГИ) для изучения их гидро-

метеорологического режима и, в частности, для решения проблемы влияния осушения болот на речной сток. В 1980 г. в СССР действовали 10 болотных станций и 20 болотных постов, материалы наблюдений которых широко используются для разработки методов расчета тепло- и влагообмена в болотных ландшафтах, стока с болот, обоснования осушительных мелиораций и др.

Географо-гидрологические экспедиции

Предложенный В. Г. Глушковым географо-гидрологический метод решения научных и практических задач гидрологии путем организации экспедиций в трагические 1930-е годы был объявлен „вредительским”, а его автор был арестован, сослан на Колыму и расстрелян в 1939 г. Экспедиции были прекращены, а экспедиционный сектор ГГИ ликвидирован. Однако все последующее развитие гидрологии показало, что экспедиции являются не только важнейшим, но и необходимым инструментом познания. Многие задачи гидрологии могут быть решены только при проведении экспедиций, особенно в слабоизученных регионах.

Началом „реабилитации” экспедиционного метода явились, как уже упоминалось во втором томе „Очерков по истории Гидрометеорологической службы России”, Рыбинская и Веселовская (1946—1952 гг.) экспедиции. Они были организованы в связи с необходимостью решения острых гидрологических проблем, возникших при проектировании крупных водохранилищ-морей на Волге и других реках.

Новым толчком к пересмотру взгляда на роль экспедиционного метода стала Туркменская экспедиция, выполнившая в 1950—1951 гг. уникальные исследования водных ресурсов Западного Туркменистана в связи с проектированием Главного Туркменского канала. Исследования проводились под руководством А. А. Соколова и М. С. Протасьева при активном участии Н. М. Алюшинской, И. А. Максимова и др. Они позволили впервые дать оценку не изученных прежде водных ресурсов временных водотоков и такыров. К сожалению, результаты этих исследований мало кому известны, так как публиковались в секретном порядке.

Большая роль в истории гидрологии принадлежит Экспедиции по исследованию водных ресурсов целинных и залежных земель. Организованная ГГИ в 1954 г. после постановления Правительства СССР об их распашке и освоении под сельхозугодья, она продолжалась более 20 лет. Общее руководство работами экспедиции осуществляли В. А. Урываев и А. И. Чеботарев. В них принимали участие более 200 человек, в том числе А. П. Браславский, И. А. Максимов, В. Е. Водогребский, О. А. Спенглер и др. В задачу экспедиции входило полевое обследование практически не изученных рек и озер обширного региона, выявление перспективных для водного хозяйства источников водоснабжения, разработка рекомендаций по гидрологическим расчетам при проектировании прудов и водохранилищ. Район деятельности экспедиции охватывал Целиноградскую, Кокчетавскую, Северо-Казахстанскую, Павлоградскую и Актюбинскую области Казахской ССР, а также равнинную часть Алтайского края. Для решения поставленной задачи экспедиция произвела гидрографическое обследование более 200 рек и 100 озер, организовала свыше 70 станций и постов, открыла стоковую станцию в районе г. Кустаная.

По итогам исследований было опубликовано 6 научно-справочных монографий „Ресурсы поверхностных вод районов освоения целинных и залежных земель”, явившихся настольными пособиями для водохозяйственного проектирования и строительства в целинных районах.

Экспедицией нового типа, не имевшей прецедента в прошлом по широте научной задачи и программы, была Шелонская экспедиция, организованная и осуществленная Валдайской гидрологической лабораторией ГГИ в 1962—1963 гг. под руководством В. И. Кузнецова и О. И. Крестовского. Целью экспедиции являлось детальное изучение формирования стока в период весеннего половодья во всех звеньях гидрографической сети, начиная с его зарождения на склонах и в малых водосборах (притоках р. Шелонь) вплоть до замыкающего створа в устье р. Шелонь у с. Заполье (площадь водосбора 7000 км²). Исследования велись водно-балансовым методом. Помимо гидрометрических работ, организованных на главной реке и ее притоках в большом числе створов (64 створа в 1962 г. и 54 в 1963 г.), производились маршрутные ландшафтные снегосъемки (до 200 км) для определения запасов

воды в снеге. Для изучения осадков была создана густая дождемерная сеть, оснащенная более чем 30 приборами, в том числе 4 плювиографами. В 58 пунктах в 1962 г., в 51 пункте в 1963 г. производились измерения влагозапасов в почвогрунтах в поле и в лесу. Испарение определялось с помощью 6 комплектов испарителей ГГИ-500-50, установленных на лугу, на пашне и в лесу. Велись также наблюдения за испарением с водной поверхности и с поверхности снега. Результаты исследований опубликованы в „Материалах воднобалансовых исследований весеннего половодья в бассейне Шелони” (1964 г.). Научный анализ этих уникальных материалов, к сожалению, был выполнен не полностью.

Говоря об экспедиционных исследованиях, имевших высокую научную и практическую эффективность с точки зрения решения поставленных задач в короткое время, особо следует сказать о двух замечательных экспедициях: Западно-Сибирской и Курской, каждая из которых была интересна по-своему.

Западно-Сибирская экспедиция была организована в 1964 г., когда началось интенсивное хозяйственное освоение этого региона после открытия в бассейне Оби и субполярных районах Приобья крупнейших месторождений нефти и газа, что резко повысило интерес к изучению водного режима этой отдаленной, сильно заболоченной и крайне слабо изученной в гидрологическом отношении обширной территории.

Основная задача экспедиции заключалась в получении гидрометеорологических данных и характеристик водного режима рек, озер, болот, необходимых для разработки инженерных мероприятий, связанных с осушением и освоением заболоченных земель, обустройством территорий нефтяных и газовых месторождений. Программа работ экспедиции, проводившейся вначале под руководством К. Е. Иванова, а затем С. М. Новикова, включала широкий комплекс исследований гидрометеорологического режима, морфологических, физических и гидрологических особенностей заболоченных территорий: типологию и морфологию болот, строение и физические свойства торфяных залежей, гидрографию, водный режим и водный баланс малых и средних рек, а также внутриводотных озер и многое другое. Экспедицией впервые широко использовались аэрометоды. Итоги работ экспедиции опубликованы в монографии К. Е. Иванова „Болота Западной Сибири” (1976 г.).

Экспедиционные исследования в районе Курской магнитной аномалии (КМА) были организованы в начале интенсивного освоения там богатейших запасов железных руд и в связи с возникновением при этом ряда гидролого-гидрогеологических и экологических проблем. Разработка открытым способом рудных месторождений, расположенных на большой глубине, потребовала осушения кровли, сложенной водообильной толщей осадочных пород. В ряде случаев естественный уровень подземных вод следовало понизить на 400—600 м.

Основная задача гидрологических исследований, выполнявшихся совместно с гидрогеологическими, заключалась в том, чтобы оценить возможное влияние на водный режим рек водопонижительно-дренажных работ, впервые осуществлявшихся в нашей стране в таком объеме. Работы экспедиции продолжались в течение 5 лет, с 1963 по 1967 г., под научным руководством А. И. Чеботарева и О. В. Попова. Возглавляли экспедицию И. Н. Образцов (камеральная группа) и А. Н. Попов (полевая группа). Для изучения взаимосвязи поверхностных и подземных вод были организованы широкие воднобалансовые исследования. Было открыто 40 гидрометрических створов в речных системах, дренирующих районы основных железорудных месторождений. Режим осадков и снежного покрова изучался с помощью густой сети осадкомерных пунктов и путем выполнения снегомерных съемок. Велись непрерывные наблюдения за уровнем грунтовых вод, испарением с водной поверхности и с поверхности почвы.

Исследования показали, что в районах особенно больших водопонижительных работ водный режим рек в межень претерпевает существенные изменения (реки оказались в „подвешенном” состоянии, фильтруя воду в зону осушения). Результаты работ были опубликованы в ряде научных статей Б. М. Доброумова, И. Н. Образцова, Б. С. Устюжанина и других участников экспедиции.

Большой интерес представляет также Гидромелиоративная экспедиция, работавшая в 1970-х годах в Заволжье под руководством С. И. Харченко. В ее задачу входила экспериментальная проверка предложенного ГГИ метода определения норм и режима орошения, позволяющего существенно сократить затраты воды в орошаемом земледелии.

Не менее интересной и важной была экспедиция в бассейне р. Сосны (приток Дона), работавшая в 1970-х годах под руководством Е. А. Леонова и Л. К. Вершининой. Экспедиция была организована для выяснения причин исключительно маловодного весеннего половодья 1976 г. в бассейне Дона, сформировавшегося при наличии больших запасов воды в снеге. Большое внимание экспедицией было уделено изучению условий и глубины промерзания и оттаивания почвогрунтов, являющихся одними из важнейших факторов, определяющих величину потерь стока в период снеготаяния.

В начале 1970-х годов крупные экспедиционные работы выполнялись комплексной экспедицией по изучению теплового, водного и солевого баланса орошаемых земель Средней Азии и Южного Казахстана, возглавлявшейся Э. П. Протасовым. Научным руководителем экспедиции был С. И. Харченко. Результаты работ экспедиции были использованы при разработке гидрометеорологического метода определения норм и режима орошения. Материалы экспедиционных исследований обобщены в многочисленных научно-технических отчетах, справочниках и в семи монографиях, включая монографию С. И. Харченко „Гидрология орошаемых земель” (1975 г.).

В 1975—1985 гг. широкие исследования в зоне строительства Байкало-Амурской магистрали (БАМ) выполнила комплексная гидрометеорологическая экспедиция Госкомгидромета под руководством ГГИ, в состав которой входили представители КазНИГМИ, ДВНИГМИ, Иркутского, Забайкальского, Дальневосточного и Якутского УГМС. Наряду с расширением сети стандартных гидрометеорологических наблюдений были организованы экспериментальные полигоны для детального изучения гидрологических процессов в районах распространения многолетнемерзлых пород. Деятельность экспедиции под научным руководством Б. Л. Соколова позволила существенно расширить и углубить представления о формировании ресурсов и режима вод суши в зоне БАМ, усовершенствовать методы инженерно-гидрологических расчетов, обеспечить гидрологическое обоснование строительства и последующей эксплуатации Байкало-Амурской железнодорожной магистрали.

В середине 1980-х годов организуются широкомасштабные экспедиционные исследования по комплексному изучению круп-

ных озер СССР. Под руководством ГГИ и при участии региональных УГМС в эти годы были проведены экспедиции на озерах Байкал, Иссык-Куль, Севан, Балхаш (включая бассейн р. Или и Капчагайское водохранилище). Основной целью этих экспедиций являлось научное обоснование наиболее рациональных схем комплексного использования и охраны природных ресурсов этих водных объектов, оценка степени антропогенного воздействия на них не только на момент изучения, но и на длительную перспективу.

Необходимо отметить, что на середину 1980-х годов приходится пик экспедиционных гидрологических исследований в системе Гидрометслужбы. В этот период ежегодно действовали по 10—12 крупных экспедиций на различных водных объектах страны. Основной задачей большинства экспедиций было изучение гидрологического режима в условиях влияния хозяйственной деятельности и оценка возможных последствий этого влияния на экосистему водного объекта. Наряду с уже отмеченными экспедициями в этот период были также организованы экспедиционные исследования на р. Куре — с целью выявления потерь стока, в Вологодской области — по обоснованию оптимального регулирования водного режима осушаемых земель, в горных районах Восточной Сибири — по изучению условий формирования стока горных рек с целью разработки математических моделей стока и др.

Последние крупные экспедиционные работы уже в период „перестройки” были организованы в конце 1980-х годов на водной системе Ладожское оз.—р. Нева—Невская губа—восточная часть Финского залива в связи со строительством комплекса защитных сооружений г. Ленинграда от наводнений. В них приняли участие более 30 различных научно-исследовательских, учебных и проектных организаций под руководством ГГИ. Научным руководителем этих комплексных работ был И. А. Шикломанов. Исследования должны были дать ответ на вопрос, каково текущее экологическое состояние водной системы и как оно может измениться в будущем под влиянием комплекса защитных сооружений. Разработанный по результатам выполненных исследований прогноз экологического состояния водной системы до конца XX в., вокруг которого в начале 1990-х годов велись бурные научные дискуссии, не потерял актуальности и в настоящее время — объективно подтвердилось прогнозируемое незна-

чительное ухудшение экологического состояния Невской губы под влиянием так и не достроенных защитных сооружений.

В последнее десятилетие XX в. сократился объем крупных экспедиционных гидрологических работ из-за отсутствия необходимого бюджетного финансирования. В то же время продолжается экспедиционная деятельность на договорной основе. Ежегодно ГГИ организуются полевые работы на различных объектах для решения конкретных гидрологических задач, определяемых заказчиками. В частности, в этот период были выполнены полевые работы на водных объектах Санкт-Петербурга, в Невской губе и Финском заливе для оценки их экологического состояния, а также многочисленные полевые обследования и изыскания по оценке и прогнозу русловых деформаций рек и водотоков в районах их пересечения трубопроводными системами, каналами, в местах выемок гравия из их русел и др.

Создание единой системы учета вод и их использования. Государственный водный кадастр

Данные опорной гидрологической сети Гидрометслужбы, на которой проводятся наблюдения за уровнями и расходами воды, взвешенными наносами, температурой воды, ледовыми явлениями и другими элементами водного режима, до середины XX в. практически отражали естественные их колебания, обусловленные климатическими факторами. Однако с началом быстрого роста водопотребления в народном хозяйстве в 1960-е годы наблюдения на сети стали отражать не только естественные колебания гидрологических элементов, но и их антропогенные изменения, связанные с использованием воды на хозяйственные нужды. Возникла потребность в организации специальной системы учета использования вод.

В 1975 г. по инициативе Гидрометслужбы Правительство СССР приняло постановление о создании единой системы государственного учета вод и их использования в народном хозяйстве (ГУВ). Во исполнение этого постановления, в дополнение к опорной гидрологической сети Гидрометслужбы и сети по учету подземных вод Министерства геологии, в Минводхозе была создана система учета водопотребления и водоотведения в промышлен-

ности, энергетике, коммунальном, сельском хозяйствах и в других отраслях, использующих как поверхностные, так и подземные источники. Основными целями создания единой общегосударственной системы учета вод и их использования были рассмотрение природных вод в их единстве и взаимосвязи и ликвидация существовавших ведомственных барьеров при учете различных видов вод и, как было отмечено выше, учет использования в народном хозяйстве водных ресурсов. Система ГУВ предусматривала производство измерений и первичный учет количества и качества поверхностных и подземных вод (водных объектов), регистрацию водопользователей, учет вод, забираемых из водных объектов, количества и качества сбрасываемых в них вод, а также выдачу потребителям данных первичного учета. В настоящее время система ГУВ успешно функционирует, обеспечивая учет поверхностных, подземных вод и их использования.

Систематизация, обобщение и хранение данных учета вод и их доведение до потребителей осуществляются в рамках ведения водного кадастра.

Как было отмечено во втором томе „Очерков по истории Гидрометеорологической службы России”, впервые водный кадастр в нашей стране был составлен в 1930—1940-х годах. Он оказал огромное влияние на становление и развитие гидрологической науки и обеспечение запросов народного хозяйства. Со временем, однако, потребовалось обновление материалов кадастра с использованием новых данных. Эта задача была выполнена в 1969—1974 гг. в ГГИ под руководством В. В. Куприянова при активном участии управлений Гидрометслужбы. Материалы второго цикла кадастровых работ были опубликованы в трех сериях изданий: 1. Гидрологическая изученность; 2. Основные гидрологические характеристики; 3. Порайонные монографии „Ресурсы поверхностных вод”.

При всей важности первого и второго кадастров крупными их недостатками были рутинная (ручная) технология и отсутствие взаимного обмена данными по поверхностным, подземным водам и их использованию. Для ликвидации этих недостатков и придания работам по водному кадастру государственного статуса в 1977 г. постановлением Правительства Госкомгидромету совместно с Мингео СССР и Минводхозом СССР было поручено начать ведение Государственного водного кадастра (ГВК) по единым для страны согласованным принципам и методам и создать для веде-

ния ГВК автоматизированную информационную систему. Следует отметить, что первые обоснования, общие положения и принципы построения ГУВ и ГВК, основанные на идее единства природных вод и их использования, которые легли в основу вышеуказанных постановлений Правительства СССР, были сформулированы в работах В. И. Корзуна и С. К. Черкавского в начале 1970-х годов. Первая очередь автоматизированной информационной системы ГВК (АИС ГВК) была введена в опытную эксплуатацию в 1985 г. в составе трех ведомственных подсистем: „Поверхностные воды“, „Подземные воды“ и „Использование вод“. В рамках подсистемы „Поверхностные воды“, за ведение которой отвечала Гидрометслужба, были сданы в эксплуатацию семь банков данных: „Водные ресурсы“, „Реки и каналы“, „Озера и водохранилища“, „Моря и морские устья рек“, „Качество поверхностных вод суши“, „Ледники“, „Сели“. Ввод в эксплуатацию первой очереди АИС ГВК, в разработку и внедрение которой большой вклад внесли ученые ГГИ, ВНИИГМИ—МЦД, Центрального научно-исследовательского института комплексного использования водных ресурсов (ЦНИИКИВР) и ВСЕГИНГЕО, в числе которых В. С. Вуглинский, С. И. Гусев, В. А. Семенов, А. Н. Колобаев, Л. С. Язвин и многие другие, позволил начать обслуживание потребителей кадастровыми данными на основе компьютерной технологии. В 1986 г. были начаты работы по проектированию второй очереди АИС ГВК. Они завершились в начале 1990-х годов созданием технологии обработки различных массивов данных на ПЭВМ в виде АРМов (автоматизированных рабочих мест), позволивших приблизиться к местам получения кадастровой информации и значительно ускорить процесс ее обработки. В настоящее время осуществляется дальнейшая модернизация автоматизированных технологий ведения банков данных ГВК с использованием современных ПК и высокоэффективных программных продуктов.

Развитие экспериментальных исследований стока и водного баланса речных бассейнов

Еще на заре отечественной гидрологии М. А. Великановым была высказана мысль о необходимости создания полевых экспериментальных станций на малых водосборах (балках, логах,

ручьях), на которых, как на моделях, можно было бы изучать сложную природу речного стока. Практически эта идея была осуществлена В. А. Урываевым в 1950-е годы. Одними из первых подобных станций для оценки возможного влияния на сток активно проводившихся в те годы агролесомелиоративных мероприятий были две стоковые станции в степной зоне ЕТС — Каменно-Степная и Нижнедевицкая — и одна — Дубовская — в районе проектировавшегося Волго-Донского канала. В 1950-х годах создаются также Бекибентская (Западная Туркмения), Уильская (Западный Казахстан) и Кустанайская стоковые станции. Для изучения формирования стока в горных условиях в 1964 г. были организованы исследования на станции Кызылча, расположенной в бассейне р. Ангрэн на высоте 1500 м. Общее число стоковых станций к концу 1970-х годов достигло 18.

На стоковых станциях выполнялся широкий комплекс наблюдений за всеми элементами водного баланса: атмосферными осадками, снежным покровом, потерями воды на инфильтрацию в почвогрунты, на испарение с поверхности почвы и воды и т. п. В 1970-х годах их поэтому стали чаще называть воднобалансовыми станциями (ВВС). Полученные на воднобалансовых станциях данные внесли большой вклад в понимание механизма формирования стока, роли метеорологических факторов и так называемых факторов подстилающей поверхности (уклонов, почвогрунтов, растительности и др.).

Первые результаты наблюдений на ВВС были опубликованы в монографии В. А. Урываева „Экспериментальные гидрологические наблюдения на Валдае” (1953 г.), в многочисленных статьях С. Ф. Федорова, В. С. Голубева, О. И. Крестовского и др. Материалы ВВС оказали существенное влияние на совершенствование методов инженерно-гидрологических расчетов и особенно прогнозов стока.

Однако данные наблюдений на ВВС принесли и определенное разочарование. Прямой перенос полученных на малых водосборах закономерностей на большие бассейны оказался не столь простым, как это представлялось вначале. Стало очевидным, что условия формирования стока в большом речном бассейне могут существенно отличаться от таковых на малых элементарных водосборах, каждый из которых имеет свои индивидуальные особенности.

В 1970-е годы была предпринята попытка расчета так называемых текущих (в реальном времени) водных балансов (по месяцам) для средних и больших речных бассейнов, площади водосборов которых составляли порядка 10—100 тыс. км². Для этого были отобраны около 100 бассейнов, в основном, в европейской части СССР, имеющих наиболее густую сеть наблюдений за осадками и другими элементами метеорологического режима, необходимыми для воднобалансовых расчетов. Уравнения водного баланса при этом включали до 10 различных предикторов, непосредственно не измеряемых.

Расчеты текущих водных балансов продолжались в течение 10 лет под руководством А. П. Бочкова. Хотя они и способствовали лучшему пониманию процессов формирования стока, но из-за низкой точности определения входящих в уравнение многих параметров, в первую очередь осадков и испарения, эти работы были прекращены.

В это же время были начаты работы по созданию методов корректировки осадков, измеренных осадкомерами. Было известно, что осадки измеряются с большим „недобором” по сравнению с осадками, фактически выпавшими на поверхность бассейна. В связи с этим на специальном полигоне Валдайской научно-исследовательской гидрологической лаборатории (ВНИГЛ) были организованы и проведены широкие исследования погрешностей осадкомерных приборов (руководители В. С. Голубев (ГТИ) и Л. Р. Струзер (ГТО)) с целью установления необходимых поправок к показаниям осадкомеров и разработки методики их определения. Позднее к решению этой проблемы подключился А. П. Браславский (КазНИГМИ). Были известны три вида поправок: 1) на испарение из ведра между сроками наблюдений, 2) на смачивание стенок осадкомерного сосуда, 3) на недоучет осадков, не попадающих в сосуд в ветреную погоду в силу трансформации поля ветра. Первые две поправки, как выяснилось в результате исследований, невелики и сравнительно легко и надежно определяются. Третья поправка для твердых осадков может составлять 10—30 и даже 50 % (при больших скоростях ветра) величины измеренных осадков. В оперативной практике она до сих пор не принята, но обычно вводится при воднобалансовых исследованиях. В. С. Голубевым были выполнены также исследования и испытания различных вариантов защиты отечествен-

ного осадкомера от выдувания осадков и разработан осадкомер в двойной „заборной” защите, принятый Всемирной метеорологической организацией (ВМО) в качестве эталона осадкомерного прибора. Результаты взаимных сравнений на Валдае основных конструкций осадкомеров, принятых в различных странах мира, позволили разработать методику корректировки осадков, измеряемых осадкомерными приборами, которая была одобрена ВМО и рекомендована в 1998 г. для широкого использования.

Важное значение для практического приложения экспериментальных воднобалансовых исследований имела созданная в 1970-е годы по постановлению Правительства СССР сеть экспериментальных станций для изучения водного и солевого баланса орошаемых земель. На них осуществлялась проверка существующих официальных оросительных норм и режима орошения. По результатам исследований на этих станциях в ГГИ был разработан гидрометеорологический метод, обеспечивающий экономию водных ресурсов и предотвращение засоления орошаемых земель вследствие избыточного их полива.

Работы проводились под руководством С. И. Харченко — основоположника мелиоративной гидрологии. Особенно широко они были развернуты на Дубовской воднобалансовой станции в Сальских степях и в Заволжье.

В заключение можно отметить, что воднобалансовый подход в перспективе, несомненно, будет занимать одно из центральных мест в гидрологической науке как наиболее обоснованный при решении научных и практических задач. Однако на современном этапе практическое его использование ограничено из-за низкой точности расчета отдельных составляющих, на повышение которой в первую очередь и следует обратить внимание в ближайшем будущем.

Речной сток (возобновляемые водные ресурсы) и методы расчета его характеристик

Резкое увеличение водопотребления в промышленности, коммунальном и особенно в сельском хозяйстве (в орошаемом земледелии) во второй половине XX в. явилось причиной обострения водной проблемы. В 1960-е годы в ряде регионов отчетливо наме-

вились признаки количественного и качественного истощения водных ресурсов. Вода, считавшаяся даром природы, стала природным ресурсом, использование которого необходимо учитывать и планировать на длительную перспективу.

Наиболее полные сведения о водных ресурсах СНГ и РФ содержатся, как упоминалось выше, в материалах Водного кадастра. Наряду с этим был выполнен ряд научных обобщений по водной проблеме. В их числе следует отметить монографию „Водный баланс и водные ресурсы СССР” (1967 г.), составленную под руководством А. П. Бочкова и М. С. Протасьева, монографию „Водные ресурсы СССР и их использование” (1987 г.) и монографию И. А. Шикломанова „Исследование водных ресурсов суши: итоги, проблемы, перспективы” (1988 г.). По отдельным регионам страны были выполнены оценки водных ресурсов: АННИИ — по территории арктической суши (В. С. Антонов, 1957 г.; В. В. Иванов, 1978 г.), УкрНИГМИ — по территории Украины и Молдавии (Л. Г. Онуфриенко, 1966, 1986 гг.; I. Ф. Вишневецкий, 1976 г.), ДВНИГМИ — по территории Дальнего Востока (В. Н. Глубоков, 1978 г.).

В конце 1990-х годов в ГГИ закончена работа по подготовке монографии по водным ресурсам России, которая вскоре будет опубликована.

В качестве источников для удовлетворения потребностей в воде народного хозяйства обычно рассматриваются два вида водных запасов: 1) статические (вековые), находящиеся в морях, реках, озерах, ледниках, водоносных пластах и 2) ежегодно возобновляемые.

Статические запасы воды огромны — только в озерах сосредоточено 27 500 км³ воды (из них 23 000 км³ в Байкале), в ледниках — 12 000 км³ (из них 1170 км³ в горных ледниках). Как это и странно на первый взгляд, но в гидрологии и водном хозяйстве их не принято называть водными ресурсами. Считается, что они представляют собой нечто вроде постоянного капитала, расходование которого неизбежно повлекло бы за собой обеднение (ассушение) водной оболочки Земли.

В качестве реального источника возобновляемых водных ресурсов (поверхностных и подземных) принято считать речной ток, который может быть использован как бы „безболезненно” для окружающей среды, так как в процессе круговорота воды на

Земле он не только возобновляется, но и качественно восстанавливается. Фактически какой-либо разницы между статическим (вековыми) запасами и возобновляемыми ресурсами (речным стоком), в сущности, нет. Возобновляемые водные ресурсы — это динамическая часть статических запасов. Если мы используем например, сток Волги, то тем самым наносим ущерб статическим запасам Каспийского моря. Аналогично использование во Амударьи и Сырдарьи влечет за собой частичную или полную (при полном изъятии стока) потерю Арала.

Обобщение данных по речному стоку как источнику водных ресурсов позволило сделать ряд важных выводов не только о состоянии водной проблемы, но и о вариантах ее решения. Основные из них следующие.

1. По суммарному годовому стоку (или возобновляемым водным ресурсам), равному $4700 \text{ км}^3/\text{год}$ (в эту цифру входят также ежегодно возобновляемые ресурсы озер, ледников и подземных вод, поскольку они участвуют в питании рек), СНГ занимает второе место после Бразилии. Годовой сток рек РФ равен $4200 \text{ км}^3/\text{год}$, или почти 90 % суммарного стока рек СНГ. Сток только пяти крупнейших рек РФ — Енисея, Лены, Оби, Амура и Волги — составляет почти половину суммарного речного стока СНГ.

2. Годовой сток распределен в пределах СНГ крайне неравномерно: 80 % стока приходится на северную, наименее населенную зону избыточного увлажнения, где потребность в воде наименьшая, и только 20 % — на зону недостаточного увлажнения, где потребность в воде особенно велика. Еще более неравномерно распределен сток в пределах РФ.

3. Средняя водообеспеченность (по среднегодовому стоку) в пределах СНГ на душу населения оценивается в $18,1 \text{ тыс. км}^3/\text{год}$; она наиболее высока в РФ — $30,8 \text{ тыс. км}^3/\text{год}$.

Наряду с оценкой ресурсов речного стока во второй половине XX в. большое место занимают исследования закономерностей формирования и методов расчета и прогноза его характеристик необходимых для гидротехнического и водохозяйственного проектирования и строительства.

В начале 1960-х годов была поставлена необычайно важная задача: создать надежный фонд характеристик стока, рассчитанных по многолетним рядам наблюдений, используя которые

можно было бы произвести объективную оценку существовавших в то время многочисленных, иногда противоречащих друг другу приемов и методов их расчета при отсутствии наблюдений. В конечном счете следовало отобрать лучшие из них или предложить новые решения, обеспечивающие наименьшие погрешности при расчетах характеристик стока неизученных или слабо изученных рек.

Результаты проделанной работы и полученные выводы были опубликованы в монографиях и статьях К. П. Воскресенского (1962 г.), А. А. Соколова (1966 г.), Г. А. Алексева (1962 г.), А. М. Владимирова (1966 г.), В. Г. Андреевнана (1960 г.). На их основе впервые были подготовлены общегосударственные стандарты по определению расчетных гидрологических характеристик:

— Указания по определению расчетных величин годового стока и его внутригодового распределения. СН. 371-67. — Л.: Гидрометеиздат, 1968.

— Указания по расчету максимальных расходов талых вод при строительном проектировании. СН. 356-66. — Л.: Гидрометеиздат, 1966.

— Указания по расчету минимальных расходов воды при строительном проектировании. СН. 346-66. — Л.: Гидрометеиздат, 1966.

Позднее, в 1972 г., все эти Указания были сведены в единый нормативный документ по гидрологическим расчетам — Указания по расчету основных гидрологических характеристик. СН. 435-72. — Л.: Гидрометеиздат, 1972.

Группе ученых, внесших наибольший вклад в разработку этого документа, — А. И. Чеботареву, А. А. Соколову, А. И. Охинченко, А. М. Владимирову, Б. И. Серпик — была присуждена премия Госкомгидромета имени В. Г. Глушкова и В. А. Урываева, учрежденная в 1971 г.

В дополнение к работам ГГИ по подготовке общегосударственных нормативов в области расчетов речного стока в зональных НИГМИ с середины 60-х годов активно развивались исследования по изучению условий формирования и разработке региональных методов расчета различных стоковых характеристик. Применительно к изучению максимального стока следует упомянуть работы КазНИГМИ (Ю. Б. Виноградов, 1967, 1969 гг.), ДВНИГМИ

(В. М. Лыло, 1967, 1971 гг.), ЗапСибНИГМИ (Д. А. Бураков 1981, 1983 гг.), УкрНИГМИ (А. Н. Бефани, 1967 г., В. И. Мокляк, 1968, 1971 гг., П. М. Люттик, 1971, 1986 гг.). В разработку региональных методов расчета минимального стока значительный вклад был сделан ЗапСибНИГМИ (А. М. Комлев, 1972, 1974 гг.).

В 1983 г. в ГГИ под руководством А. В. Рождественского было подготовлено новое издание нормативного документа по расчетам стока — СНиП 2.01.14-83, в котором были предложены более надежные методы расчета характеристик стока при наличии данных наблюдений и новые подходы к оценке стока при их отсутствии с учетом достижений, полученных в этой области региональными НИГМИ.

После выхода в свет этого документа работа по совершенствованию методов определения расчетных гидрологических характеристик продолжалась. В соответствии с современными требованиями к общегосударственным нормативным документам в конце 1990-х годов в ГГИ под руководством А. В. Рождественского был подготовлен новый СНиП по гидрологическим расчетам.

В дополнение к нему в настоящее время завершается подготовка свода правил по определению расчетных гидрологических характеристик, в котором будут подробно изложены рекомендуемые СНиП расчетные методики. Началась подготовка территориальных норм, которые будут учитывать специфику формирования стока в конкретных регионах.

В дополнение к работам по созданию методов определения расчетных характеристик речного стока для строительного проектирования были выполнены исследования по расчету неустановившегося движения воды в русле реки и волн попуска (ГГИ, М. С. Грушевский, 1980 г.; УкрНИГМИ, И. А. Железняк, 1966, 1978 гг.), по расчету трансформации стока в водохранилищах (УкрНИГМИ, И. А. Шерешевский, 1971, 1976 гг.) и устьевых областях крупных сибирских рек и эстуариях (ААНИИ, В. В. Иванов, 1972, 1984 гг.), по расчету стока наносов (ГГИ, А. В. Караушев, 1985 г.; ЗакНИГМИ, Г. И. Хмаладзе, 1971 г.). Значительные успехи были достигнуты также в изучении условий формирования и методов расчета селевых потоков (КазНИГМИ, Ю. Б. Виноградов, 1969 г.; ЗакНИГМИ, И. И. Херхеулидзе, 1972 г., Г. И. Херхеулидзе, 1987, 1990 гг.; ЗапСибНИГМИ, В. А. Виноградов, 1980, 1991 гг.; ГГИ, Ю. Б. Виноградов, 1995 г.).

Вторым перспективным направлением в области изучения процессов формирования стока и разработки методов его расчета является создание моделей водообмена в речном бассейне. В ГГИ в 1980-х годах под руководством Ю. Б. Виноградова была разработана детерминированная модель формирования стока „Гидрограф” с распределенными параметрами, ориентированная на использование стандартной гидрометеорологической информации. Выход модели — непрерывный гидрограф стока в замыкающем створе. Модель успешно применялась на многих водных объектах в различных природных зонах (арктическая тундра, лесная зона, горные районы Сибири и Средней Азии, лесостепь и др.). В конце 1990-х годов начато создание стандартной оболочки модели в целях ее широкой апробации при определении расчетных характеристик стока при отсутствии данных наблюдений за ним. В Гидрометцентре и региональных НИГМИ также уделялось большое внимание разработке математических моделей формирования стока и влагообмена в речном бассейне. В 1974 г. в Гидрометцентре Л. С. Кучментом и В. И. Корнем были сформулированы общие подходы к разработке моделей речного стока с распределенными параметрами. В последующие годы такие модели разрабатывались в Гидрометцентре и региональных НИГМИ применительно к разным фазам и различным условиям формирования речного стока: для равнинных лесных водосборов (В. И. Корень, В. А. Бельчиков, 1979 г.), для горных бассейнов (СарНИГМИ, Ю. М. Денисов, 1968, 1972 гг.; КазНИГМИ, В. В. Голубцов, 1973, 1989 гг.).

Основными видами гидрологических прогнозов в послевоенные годы были прогнозы объема весеннего половодья и максимальных расходов воды, половодий и паводков.

Особенно большой вклад в развитие методики прогнозов элементов весеннего половодья внесли ученые Гидрометцентра России. Их исследования были направлены на выяснение закономерностей следующих взаимосвязанных процессов, определяющих формирование весеннего половодья: а) поступление воды на поверхность бассейна (снегонакопление, снеготаяние, выпадение дождей); б) поглощение и задержание воды бассейном; в) стекающие воды, не поглощенной речным водосбором.

Обстоятельные исследования по этим проблемам были выполнены В. Д. Комаровым (1951, 1955, 1959 гг. и др.).

Наиболее полное теоретическое исследование формирования поверхностного стока и поглощения воды в речных бассейнах было выполнено Е. Г. Поповым (1956, 1969 гг.).

Значительное внимание уделялось в 1950—1960-х годах совершенствованию прогнозов ледового режима рек с использованием метода теплового баланса ((Л. Г. Шуляковский (1947, 1954 гг. и др.), В. В. Пиотрович (1958 г.)).

В 1970-е годы была разработана приближенная теория движения паводка, изучены механизм регулирования стока русловой системой, динамика запасов воды в речной сети и механизм „добегания” воды по руслу (работы Г. П. Калинина, П. И. Милюкова, А. П. Жидикова, Р. А. Нежиховского и др.), что позволило существенно повысить надежность прогнозов речного стока.

Основными видами прогнозов в последние десятилетия стали долгосрочные и краткосрочные прогнозы стока равнинных и горных рек, притока воды в водохранилища и ледовых явлений. Новые подходы в разработке прогнозов стока в 1980—1990-е годы связаны со сближением методов долгосрочного и краткосрочного прогнозирования, в частности, совместным использованием математических моделей и физико-статистических методов и с большим привлечением данных метеорологических прогнозов. Из числа работ этого направления следует отметить работы Л. С. Кучмента (1969, 1972, 1980, 1983 гг.), В. И. Кореня (1989, 1991 гг.), Ю. Б. Виноградова (1988 г.) и др. Из зональных НИГМИ проблеме совершенствования региональных гидрологических прогнозов наибольшее внимание уделялось в ДВНИГМИ (В. М. Лыло, 1964, 1971 гг.) и СарНИГМИ (Л. Н. Боровикова, 1977 г.).

В конце 1970-х годов в ГГИ начались исследования по разработке методов прогноза максимальных заторных (зажорных) уровней воды на реках при заторно-зажорных явлениях, вызывающих наводнения, наносящие большой ущерб. Такие методы, опирающиеся на результаты научных, лабораторных и теоретических исследований, были разработаны благодаря усилиям В. А. Бузина, Г. И. Болотникова, А. М. Филишова и других исследователей и получили широкое применение в практике прогнозирования половодий на многих реках, на которых формируются заторы и зажоры льда. К началу 1990-х годов под руководством В. А. Бузина были разработаны прогнозные схемы, которые были успешно внедрены при прогнозировании наивысших

заторных и зажорных уровней воды на реках Сибири, Северо-Запада ЕЧР и бассейна Верхней Волги.

Особенностью современного этапа разработки гидрологических прогнозов является все большее развитие сквозных автоматизированных систем прогнозирования, включающих блоки автоматического ввода и обработки исходной информации, модули, реализующие расчетные схемы прогноза, и интерфейсы для выдачи потребителям результатов прогнозирования.

Антропогенные изменения водоносности рек

Влияние хозяйственной деятельности на окружающую среду, и в частности на водоносность рек, во второй половине XX в. сильно возросло, что вызвало появление многочисленных исследований по этой проблеме, ставшей одной из наиболее актуальных в гидрологической науке. Начало широкой дискуссии по проблеме антропогенного изменения водности рек положила работа М. И. Львовича „Гидрометеорологическое действие лесных полос и принципы их размещения на полях колхозов и совхозов” (1950 г.), опубликованная им в связи с проектированием лесовосстановительных работ в степной зоне по „Сталинскому плану преобразования природы”. В ней он пришел к выводу, что создание лесных полос повлечет за собой существенное, на 15—20 и даже 40 %, снижение стока в бассейнах Дона, Южного Буга, Оки и других рек степной зоны. Он предположил, что „задержание” поверхностного стока лесными полосами связано с усилением „внутрипочвенного стока”. Учитывая важность проблемы, ГГИ 11—12 февраля 1952 г. организовал специальную сессию ученого совета. С докладом „К вопросу о так называемом внутрипочвенном стоке и его роли в гидрологическом режиме почв” выступил Б. И. Куделин, который сказал, что „нет такой силы, которая заставила бы перемещаться воду горизонтально внутри почвенного слоя”. В ходе дискуссии резкие выводы Куделина были несколько смягчены. Ряд ученых высказался за сохранение понятия „внутрипочвенный сток”, во всяком случае в зоне избыточного увлажнения.

Важные выводы о влиянии леса на внутригодовое распределение стока были сделаны А. Г. Булавко. Проанализировав

150-летний (с 1812 г.) ряд наблюдений на р. Неман у г. Смаленинкой, в бассейне которой примерно половина леса была сведена, он пришел к выводу, что неравномерность распределения стока непрерывно и устойчиво возрастала по мере уменьшения залесенности.

Проблема гидроклиматической роли вырубки лесов и лесовосстановления интересовала гидрологов и в дальнейшем. Выполненные в 1970—1980-х годах многочисленные экспериментальные исследования, в том числе на лесных водосборах Валдайского филиала (ВФ) ГГИ, под руководством О. И. Крестовского, С. В. Марунича и С. Ф. Федорова показали, что наиболее значительные изменения гидроклиматических характеристик происходят после проведения лесохозяйственных мероприятий на малых водосборах. В результате вырубок изменяются условия наполнения твердых осадков, меняются радиационные характеристики и тепловой режим лесных участков, перестраивается структура суммарного испарения и стока. Было показано, что вырубка, например на 25 % площади водосбора, приводит к увеличению стока в первый год на 20 %. При объемах вырубок менее 1 % площади водосбора их влияние на сток можно не учитывать.

Помимо изучения возможного влияния лесохозяйственных мероприятий на сток и гидрологический режим рек, в 1960—1980-х годах в ГГИ, Гидрометцентре и региональных НИГМИ были выполнены исследования по оценке изменений речного стока в связи с проведением агротехнических мероприятий (В. Е. Водогрецкий, В. В. Рахманов), осушением болот и заболоченных территорий (К. Е. Иванов, С. М. Новиков), орошением (С. И. Харченко, Ф. Э. Рубинова), созданием водохранилищ (Г. М. Веретенникова, И. А. Шикломанов). Однако от разрозненных исследований влияния различных видов хозяйственной деятельности на речной сток необходимо было перейти к обобщающим оценкам влияния антропогенной деятельности на водные ресурсы, поскольку к концу XX столетия произошло обострение водной проблемы как в бывшем СССР, так и во всем мире.

Главной становится проблема количественного и качественного истощения водных ресурсов в результате интенсивного водопотребления и водоотведения в различных отраслях народного хозяйства. Фундаментальные исследования по этой проблеме были выполнены И. А. Шикломановым и обобщены в его моно-

графиях „Антропогенные изменения водности рек” (1979 г.) и „Влияние хозяйственной деятельности на речной сток” (1989 г.).

В результате исследований было установлено, что на всех изученных реках южных районов страны заметное уменьшение годового стока началось примерно в 1950-х—начале 1960-х годов, до этого режим стока практически был естественным. За счет комплексного влияния антропогенных факторов к концу 1980-х годов годовое стока рек Днепра, Дона, Кубани, Терека и Сулака, Куры, Или в устьевых створах уменьшился на 26—42 % по сравнению с естественным, Амударьи — почти на 90 %, а водные ресурсы Сырдарьи оказались полностью исчерпанными. Сток Волги уменьшился на 10 %. Уменьшение стока южных рек СССР привело к снижению притока во внутренние водоемы, что крайне неблагоприятно сказалось на их гидрологическом режиме. Приток речных вод в Азовское море сократился на 32 %, что привело к негативным изменениям его экосистемы и снижению рыбопродуктивности. Каспийское море недополучало ежегодно около 40 км³ воды. Приток речных вод в Аральское море в 1981—1986 гг. составлял всего 3 км³/год, что привело к понижению его уровня почти на 20 м и экологической катастрофе в Приаралье. Прогрессирующее сокращение водных ресурсов южных рек европейской части России и Средней Азии начало сдерживать развитие орошения и других водоемких отраслей хозяйства в этих регионах. В связи с этим стал разрабатываться и широко обсуждаться грандиозный проект переброски части стока северных рек на юг.

Были развернуты широкие исследования по выбору возможных вариантов переброски стока и их научному обоснованию. Рассматривались варианты переброски стока северных рек ЕЧС (в частности, Печоры) в бассейн р. Волги и стока р. Оби в Среднюю Азию. Особенно активно велись работы по переброске стока в бассейн Волги для „спасения” Каспийского моря, поскольку в результате понижения уровня Каспия в 1970-х годах возникла серьезная угроза рыбной и другим отраслям хозяйства Прикаспия. Были выполнены исследования возможных изменений водного баланса и гидрологического режима в бассейнах рек Печоры и Оби под влиянием межзонального перераспределения стока, а также даны оценки изменений гидрометеорологических условий

в бассейнах рек Средней Азии при поступлении дополнительных объемов воды из северных рек.

Проблема переброски стока широко обсуждалась в печати, а дискуссия приобрела большую остроту. В связи с начавшимся к концу 1970-х годов повышением уровня Каспия и недостаточной научной обоснованностью самой идеи проекта переброски дальнейшие работы были прекращены. В последующем прогнозы водопотребления и снижения стока южных рек неоднократно уточнялись, поскольку темпы развития народного хозяйства оказывались ниже намечавшихся.

Однако это не меняет общего вывода о весьма существенных изменениях водных ресурсов и водного режима южных рек страны в результате так называемых безвозвратных потерь стока в процессе его использования в различных отраслях народного хозяйства и о необходимости осуществления водоохраных мероприятий в их бассейнах (внедрение водосберегающих технологий и пр.).

Одновременно с проблемой Каспия и Арала в 1970-х годах возникли ощутимые гидроэкологические проблемы, касающиеся двух других крупных водоемов Средней Азии и Казахстана — озер Балхаш и Иссык-Куль. В оз. Балхаш за счет наполнения Капчагайского водохранилища на р. Или уровень воды понизился на 3 м, что создало угрозу водоснабжения Балхашского медно-рудного комбината. На оз. Иссык-Куль в течение первой половины XX в. также наблюдалось непрерывное падение уровня, который понизился более чем на 7 м.

Для выяснения причин понижения уровней озер Балхаш и Иссык-Куль были организованы две крупные гидроэкологические экспедиции: первая под руководством С. И. Харченко, вторая под руководством В. А. Знаменского.

В результате исследований было показано, что основными причинами понижения уровня оз. Балхаш являются, с одной стороны, большие изъятия стока в бассейне р. Или на наполнение Капчагайского водохранилища, а с другой — возросшее безвозвратное водопотребление на орошение в бассейне озера. Результаты этих исследований опубликованы в монографии „Гидрологические и водохозяйственные аспекты Или-Балхашской проблемы” (1989 г.).

Среди факторов, вызвавших падение уровня оз. Иссык-Куль, немаловажную роль также сыграли большие изъятия стока на орошение.

Одной из острых гидроэкологических проблем второй половины XX в. стала проблема возможного воздействия комплексных защитных сооружений г. Ленинграда от наводнений на экологическое состояние водной системы Ладожское оз.— р. Нева— Невская губа—восточная часть Финского залива. Многие ученые опасались, что защитные сооружения могут оказать негативное влияние на санитарное состояние водной системы и Санкт-Петербург может оказаться на берегу „гнилого болота”. Тщательные многолетние исследования показали, что опасения эти напрасны. Возведенные защитные сооружения не ухудшат экологического состояния основных звеньев водной системы. Возможно лишь образование локальных загрязненных зон в непосредственной близости от дамб, перекрывающих Невскую губу.

К сожалению, пришедшее к власти в Санкт-Петербурге в начале 1990-х годов новое правительство во главе с А. А. Собчаком не стало утруждать себя ознакомлением с результатами исследований, положительными отзывами и выводами по проекту ряда компетентных комиссий и прекратило начатое строительство уникальных защитных сооружений на полдороге, вследствие чего они постепенно разрушаются. Исследования ГТИ и ряда других институтов по оценке текущего экологического состояния водной системы за последние 10 лет подтвердили правильность сделанных ранее выводов о слабом влиянии сооружений защиты на санитарно-гигиеническую обстановку в Невской губе.

В последние годы было принято решение о завершении строительства защитных сооружений. Однако выделяемых средств едва хватает на то, чтобы хоть как-то поддерживать разваливающиеся сооружения.

В заключение следует остановиться на совершенно новом аспекте антропогенного воздействия на водный режим и водный баланс суши в целом — на его изменении под влиянием прогнозируемого потепления климата в результате загрязнения атмосферы (парниковый эффект).

Поскольку климат является основным фактором, определяющим режим и баланс вод суши, гидрологи, естественно, проводят

исследования, целью которых является расчет (прогноз) возможных гидрологических последствий такого потепления.

В 1980—1990-х годах в ГГИ в отделе изучения климата, возглавляемом академиком М. И. Будыко, были получены новые данные по климатической ситуации в мире в XX столетии и причинам значительных изменений глобальной температуры воздуха.

При анализе материалов по температуре воздуха в северном полушарии за последние десятилетия были получены результаты, представляющие значительный интерес для определения климатических условий начала XXI в., поскольку при наличии устойчивых тенденций изменения температуры воздуха вероятность их сохранения в течение ближайших десятилетий достаточно велика. В частности, в ГГИ получены оценки изменения сезонных и годовой температур воздуха, осредненных за 1976—1985 и 1986—1997 гг. по отношению к средней региональной норме за период 1951—1975 гг. Результаты показывают, что в некоторых регионах, таких как континентальная часть Сибири и Аляска, тенденции изменения температуры воздуха достаточно устойчивы, в то время как во многих других районах они изменяются на протяжении десятилетия. Таким образом, простая экстраполяция современных трендов на будущее не является достаточно надежным методом прогноза климата будущего.

Разработка надежных методов прогноза антропогенных изменений климата на первую половину XXI в. остается важнейшей современной проблемой, имеющей глобальное значение.

Первые попытки оценить возможные изменения водных ресурсов при глобальном потеплении климата были выполнены в 1990-х годах в ГГИ и ААНИИ (В. И. Бабкин, В. Ю. Георгиевский, А. И. Шикломанов). Полученные к настоящему времени данные об изменении стока крупных рек России для разных сценариев потепления следует рассматривать как приближенные.

Гидрофизические исследования

Во втором томе „Очерков по истории Гидрометеорологической службы России”, относящихся к первой половине XX в., об исследованиях в области гидрофизики рассказано не было. Настоящий раздел восполняет этот пробел.

Для производства гидрофизических исследований в составе ГГИ после войны был образован гидрофизический отдел, которым руководил В. Ф. Пупкарев. Тематика отдела предусматривала исследования по широкому комплексу проблем: ледовые явления на реках и озерах, испарение с водной поверхности и с поверхности почвогрунтов, снежный покров и снеготаяние.

При изучении ледовых явлений значительное внимание было уделено процессам вскрытия и замерзания рек и озер, нарастания и стаивания ледяного покрова. Важным результатом этих работ явился „Атлас вскрытия и замерзания рек Европейской части СССР” (А. В. Шнитников, Г. Р. Брегман, 1974 г.). В 1950 г. обобщение по ледовому режиму рек СССР было выполнено Л. К. Давыдовым и Н. М. Алюшинской, а в 1970-х годах — Л. Гинзбургом (Гидрометцентр).

Особенно большой научный интерес и практическое значение имели исследования по выяснению причин и условий образования заторов и зажоров, шуги и внутриводного льда, создающих ледовые помехи в приемных каналах ГЭС, на водозаборных сооружениях, в деривационных каналах, отстойниках и т. п. Широкие экспериментальные исследования природы внутриводного (донного) льда были начаты В. Я. Алетбергом в 1921 г. На основании многочисленных экспериментов он пришел к выводу, что для образования кристаллов льда в толще воды необходимо переохладение (в сотых долях градуса) на всю глубину потока. Теоретический анализ явления внутриводного ледообразования вытолкнул В. М. Маккавеев (1931 г.).

Большое значение для определения механизма формирования внутриводного льда, шуги и зажоров льда имели работы Ф. И. Быбина на р. Свири (1931—1932 гг.), К. Е. Иванова и Э. Л. Колокольцева (1950 г.) на р. Неве. В 1970-х годах в ГГИ активно велись экспериментальные исследования заторов льда на физических моделях. Крупное обобщение по ледовому режиму рек СССР было сделано Р. В. Донченко (1987 г.). В ААНИИ в 1970—1980-х годах были выполнены работы по оценке ледового режима устьевых участков крупных сибирских рек и по разработке прогнозов сроков их замерзания и вскрытия.

В 1950—1960-х годах были проведены крупные экспериментальные исследования по изучению испарения с поверхности воды в Валдайском филиале ГГИ с использованием почвенных ис-

парителей, лизиметров и большого гидравлического испарителя площадью 5 м². Результаты этих исследований, а также теоретических разработок позволили впервые подготовить нормативный документ, не потерявший своего значения и поныне, — „Рекомендации по расчету испарения с поверхности суши” (1976 г.), составлением которого принимали участие А. Р. Константинов, П. П. Кузьмин, С. Ф. Федоров, С. И. Харченко и др. В дальнейшем в ГГИ и УкрНИГМИ стали разрабатывать математические модели процессов испарения и транспирации растительности. Начал эти работы А. П. Вершинин в начале 1980-х годов, и следующие 20 лет они активно развивались, что позволило на основании анализа и обобщения большого натурального и экспериментального материала создать математическую модель процесса испарения с почвы с учетом тепломассообмена в почвогрунтах приземном слое воздуха и растительном покрове (С. А. Лавров 1989, 1990 гг.).

С целью исследования испарения с водной поверхности в начале 1950-х годов на территории СССР было открыто множество водно-испарительных пунктов наблюдений и проведены крупные экспериментальные работы на специальном водно-испарительном полигоне Валдайского филиала ГГИ. Результаты наблюдений по континентальным и плавучим испарителям ГГИ-3000 испарительным бассейнам площадью 3 и 20 м² на сети водно-испарительных станций и полигоне ГГИ позволили выполнить широкие научные обобщения и разработать методы расчета испарения с водной поверхности, которые вошли в Указания по расчету испарения с водной поверхности, вышедшие в 1969 г. Большой вклад в их составление внесли В. И. Кузнецов (ВФ ГГИ), З. А. Викулина, В. С. Голубев (ГГИ), А. П. Браславский (КазНИГМИ).

В связи с интенсивным строительством водохранилищ в нашей стране с начала 1960-х годов развиваются исследования по оценке элементов водного баланса и гидрологического режима этих искусственных водных объектов. Результаты этих исследований были обобщены в монографии В. С. Вуглинского (1991 г.).

Исследования снежного покрова велись преимущественно в целях совершенствования методов прогноза стока в период весеннего снеготаяния. В 1950-х годах была организована специальная сеть стационарных (на метеостанциях) и периодически:

снегосъемок для измерения высоты и плотности снежного покрова и определения запасов воды в снеге.

В 1962 г. в Институте прикладной геофизики был разработан принципиально новый метод определения запасов воды в снеге, основанный на учете деформации снежным покровом гамма-излучения естественных радиоактивных элементов почв и горных пород. В период 1964—1968 гг. сотрудниками ИПГ, ИЭМ, ГГИ под руководством В. А. Урываева были проведены обширные экспедиционные исследования по оценке метрической точности метода самолетных гамма-съемок. С 1972 г. метод авиационных гамма-съемок снежного покрова стал внедряться в УГМС с целью уточнения прогнозов весеннего половодья в районах с устойчивым снежным покровом. Гамма-съемками снежного покрова в 1974—1988 гг. были охвачены значительные районы, относящиеся к территориям деятельности Северного, Уральского, Западно-Сибирского, Якутского, Красноярского УГМС. Они осуществлялись также в северных районах Казахстана. В середине 1980-х годов общая площадь, на которой проводились авиационные гамма-съемки снежного покрова, составляла более 1,5 млн. км². В конце 1980-х годов под руководством Л. К. Вершининой были выполнены крупные обобщения по результатам применения гамма-съемок и намечены пути дальнейшего совершенствования прогноза весеннего половодья с использованием этого метода. Однако из-за тяжелого экономического положения страны в начале 1990-х годов эти хотя и дорогостоящие, но перспективные работы на всей сети УГМС были прекращены.

Наиболее полное исследование физических свойств снега, формирования снежного покрова и таяния снега было выполнено в ГГИ П. П. Кузьминым в 1946—1960 гг. Его результаты изложены в трех монографиях (1957, 1960 и 1961 гг.).

В начале 1970-х годов началось изучение теплофизического взаимодействия воды с мерзлой почвой, что было крайне необходимо для совершенствования методов расчета и прогноза стока весеннего половодья. В 1971—1985 гг. сотрудниками ГГИ и Гидрометцентра был выполнен широкий комплекс теоретических, лабораторных, а также полевых экспедиционных работ на водосборах Верхней Волги, Дона и на сети воднобалансовых станций, которые позволили: разработать теорию формирования инфильтрационных потерь талого стока и теплофизический метод рас-

чета потерь талого стока для рек равнинной территории страны; определить основные водно-физические характеристики талых и мерзлых почв и создать соответствующую информационную базу данных для основных типов почв РФ; создать математические модели элементарных гидрофизических процессов — инфильтрации талых вод в мерзлую почву, промерзания почвы с учетом миграции влаги к фронту промерзания, тепломассообмена в почве с учетом фазовых превращений влаги.

Наибольший вклад в развитие этого направления внесли И. Л. Калюжный, С. А. Лавров, К. К. Павлова.

Исследования динамики русловых потоков и руслового процесса

Во второй половине XX в. большое развитие получили исследования морфометрии речных русел с целью установления количественных соотношений между размерами и гидравлическими характеристиками потока. Нарушение этих соотношений влечет за собой односторонне направленные изменения морфологии русла, поэтому их изучение открывало реальные пути прогнозирования тенденций руслового процесса. Исследования с использованием обширных русловых съемок, проведенные И. И. Якуниным, позволили уточнить предложенные ранее многими авторами так называемые гидроморфологические зависимости (1950—1953 гг.).

Интересные исследования были выполнены Н. А. Ржаницыным по строению речных систем (1960 г.). Он установил математическую зависимость для определения классов рек в бассейне, а также их длины, ширины, площади водосбора, среднего и максимального расхода воды и других характеристик рек каждого класса.

Развитие гидроморфологического направления в изучении русловых процессов в более широком плане, чем только установление гидроморфологических зависимостей, позволило существенно расширить научные представления об этой области гидрологии, дало возможность разработать ряд принципиальных положений, опираясь на которые оказалось возможным достаточно надежно прогнозировать развитие руслового процесса как в

словиях бытового режима, так и в обстановке, возникающей при инженерном воздействии на поток.

Начало этого направления в теории руслового процесса было положено М. А. Великановым (1955, 1958 гг.) и Н. И. Маккавеевым (1955 г.). Однако наиболее полное и законченное развитие оно получило в исследованиях, проводившихся в ГГИ под руководством Н. Е. Кондратьева.

В монографии 1959 г. „Русловой процесс“ (Н. Е. Кондратьев, И. В. Попов, А. Н. Ляпин, С. И. Пиньковский, Н. Н. Федоров, И. И. Якунин) были изложены основные положения теории, из которых следовало, что теория руслового процесса — это теория дискретных русловых форм. Эти положения позволили в дальнейшем системно начать разработку всех разделов теории. В следующие 20 лет качественная типизация руслового процесса была доведена до количественных критериев (Б. Ф. Смищенко, 1969 г.), выполнены массовые полевые, лабораторные и аналитические работы по исследованию русловых форм на каждом структурном уровне: микроформ (Н. С. Знаменская, Ю. М. Кореха, Б. Ф. Смищенко, З. Д. Копалиани, А. Б. Клавен, Г. Г. Мерлянс), мезоформ (В. В. Ромашин, И. В. Попов, З. Д. Копалиани, В. М. Католиков), макроформ (Н. Е. Кондратьев, И. В. Попов, Б. Ф. Смищенко, А. Б. Клавен, В. В. Ромашин, В. И. Антоновский, В. И. Замышляев, М. М. Гендельман); разработаны методы гидравлического моделирования (А. Б. Клавен); созданы оригинальные установки и приборы для проведения исследований (Н. И. Зайцев, В. С. Дудукал). Дискретные представления о природе руслового процесса позволили разработать весьма эффективную систему прогноза руслового процесса (Б. Ф. Смищенко), озволившую решать многие задачи водохозяйственной практики разрабатывать нормативные документы для разных отраслей экономики. Значительный вклад в изучение руслового процесса в реках Сибири был внесен сотрудниками ЗапСибНИГМИ, среди которых в первую очередь необходимо упомянуть В. В. Лысенко, од руководством которого были выполнены крупные исследования русловых деформаций на реках Обь и Томь.

Итоги выполненных работ были представлены в монографии „Основы гидроморфологической теории руслового процесса“ (Н. Е. Кондратьев, И. В. Попов, Б. Ф. Смищенко, 1982 г.), удостоенной премии им. В. Г. Глушкова и В. А. Урываева.

Исследованию закономерностей гидравлических сопротивлений и деформаций русел каналов и рек, используемых для переброски стока, посвящены работы И. Ф. Карасева (результаты обобщены в монографии „Русловые процессы при переброске стока”, 1975 г.).

В 1990-е годы началась разработка методов прогноза деформаций русел и берегов водоемов при пересечении водных преград нефтепроводами и продуктопроводами в связи с проблемами охраны окружающей среды, а с 1995 г. — методов гидроморфологического мониторинга речных русел — составной части комплексного гидрологического мониторинга.

В комплексе задач, рассматриваемых в гидрологии применительно к проблеме русловых процессов, важное место занимал исследования режима речных наносов, проводившиеся в ГИ вначале под руководством Г. Н. Шамова, а позднее А. В. Караушева. Итогом их многолетних исследований явились фундаментальные монографии: Г. А. Шамова „Речные наносы” (1954–1959 гг.) и А. В. Караушева „Теория и методы расчета речных наносов” (1977 г.).

В заключение нельзя не отметить попытку И. В. Попова по созданию в 1960-х годах сети натуральных наблюдений за русловыми процессами, подобной гидрологической сети. Было открыто около 10 таких станций. Просуществовали они недолго и были закрыты по причине сложности их организации и эксплуатации а также из-за недостатка финансирования.

Международное сотрудничество в области гидрологии

В середине XX в. обстановка в водном хозяйстве и гидрологии во многих странах мира коренным образом изменилась. Ростом численности населения, развитием экономики резко возросла потребность в воде в промышленном производстве, сельском, коммунальном и других отраслях хозяйства. Увеличение водопотребления и возрастающий сброс в реки и водоемы сточных вод привели к количественному и качественному истощению водных ресурсов во многих странах мира. Обострение водной проблемы явилось стимулом к организации и развитию международного сотрудничества в области гидрологии. В 1964 г.

под эгидой ЮНЕСКО была учреждена программа „Международное гидрологическое десятилетие” (МГД). Программой предусматривалось развитие сотрудничества по исследованию и оценке водных ресурсов, изучению гидрологических явлений и процессов, а также широкое содействие гидрологическому образованию и подготовке кадров гидрологов. Большая роль в развитии программы МГД и организации международного сотрудничества в области гидрологии принадлежит В. А. Урываеву.

Всемирная метеорологическая организация в этот же период учредила Программу по гидрологии и водным ресурсам, основными разделами которой стали развитие гидрологической сети, анализ и обработка данных наблюдений, развитие системы гидрологических прогнозов, разработка и совершенствование научно-методической и технической базы гидрометслужб.

Одним из основных направлений МГД была оценка водных ресурсов. Итогом сотрудничества по этой проблеме явилась фундаментальная монография „Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли”, а также Мировой атлас карт по всем элементам водного баланса, опубликованные на русском (1974 г.) и английском (1978 г.) языках. За эту работу группа ученых Госкомгидромета во главе с В. И. Корзуном была удостоена Государственной премии СССР.

По окончании МГД международное сотрудничество под эгидой ЮНЕСКО было продолжено по вновь учрежденной, теперь же бессрочной, Международной гидрологической программе (МГП).

Ученые Росгидромета активно участвовали и участвуют в настоящее время в реализации гидрологических программ ЮНЕСКО и ВМО. За полувековой период, с начала 1950-х годов и до конца века, с участием российских ученых и специалистов были выполнены многочисленные проекты и программы, проведены курсы повышения квалификации. При активном участии отечественных ученых подготовлено и распространено 18 международных руководств ЮНЕСКО по различным аспектам гидрологической науки, в частности, по расчету паводков, по расчету водного баланса крупных озер и водохранилищ, по гидрологии урбанизированных территорий, по гидрологическим расчетам при водохозяйственном проектировании, по взаимодействию поверхностных и подземных вод.

Очень плодотворным было сотрудничество придунайских стран под эгидой ЮНЕСКО, в котором принимали участие представители Гидрометцентра, ГГИ и ВНИИГМИ—МЦД. По результатам этого сотрудничества в середине 1980-х годов подготовлена капитальная монография по водному балансу р. Дуная.

В начале 1990-х годов Валдайский филиал ГГИ получил статус учебного Центра экспериментальной гидрологии ЮНЕСКО. В 1998 г. группе ученых ГГИ (Д. А. Коновалов, В. В. Голубев и др.) ВМО была присуждена премия им. Вильхо Вайсяля за вклад в развитие метеорологических исследований. Ученые Росгидромет постоянно участвуют в международных симпозиумах, конференциях, заседаниях рабочих групп и других международных мероприятиях.

В конце 1990-х годов большим коллективом ученых ГГИ по руководством И. А. Шикломанова завершён проект Международной гидрологической программы (МГП) ЮНЕСКО по оценке водных ресурсов мира. Подготовленная по его результатам монография "World Water Resources at the Beginning of the 21st Century" (Cambridge University Press, 435 p.), которая вышла в свет в 2003 г., считается крупнейшим достижением гидрологии за последние 20 лет. В монографии представлены новейшие данные о гидросфере и запасах воды на нашей планете, приведены оценки водообеспеченности, водных ресурсов и масштабов их использования по отдельным континентам и земному шару в целом. Значительный интерес представляет глава, в которой рассматриваются проблемы, связанные с возможными изменениями водных ресурсов при глобальном потеплении климата. В подготовке монографии кроме И. А. Шикломанова принимал участие большой коллектив ученых, в числе которых В. И. Бабкин, К. В. Цыценко, В. Ю. Георгиевский, Т. Е. Григоркина, И. П. Зарецкая, А. В. Измайлова, Н. В. Пенькова.

Специалисты ГГИ, Гидрометцентра, ААНИИ, ВНИИГМИ—МЦД принимают активное участие в деятельности рабочих групп по гидрологии региональных ассоциаций ВМО, различных научных и координационных советов и групп экспертов по проблемам, связанным с изучением, рациональным использованием и охраной водных ресурсов планеты. В последние годы специалистами ГГИ подготовлены Кейсбук по гидрологическим сетям в странах Региональной ассоциации-VI (Европа), второе издание

Справочного руководства ГОМС на русском языке, предложения к новому Техническому регламенту ВМО и др. В 1995 г. было подготовлено 5-е издание Руководства по гидрологической практике ВМО на русском языке.

ГГИ и другие институты Росгидромета участвуют в реализации крупнейших международных проектов, тесно связанных с проблемами гидрологии и водных ресурсов, таких как ФРЕНД (создание архива гидрологических данных), ГОМС (обмен гидрологическими технологиями), БАЛТЕКС (изучение процессов тепло- и влагообмена в Балтийском регионе) и др.

В последние годы значительно расширились связи ученых Росгидромета с коллегами из других стран. Многие российские специалисты активно участвуют в международных конгрессах, конференциях и симпозиумах в области водных проблем и окружающей среды. В свою очередь, на базе институтов Росгидромета проводятся многочисленные рабочие семинары, совещания и симпозиумы с участием представителей разных стран. В мае 1994 г. ГГИ успешно провел организованный под эгидой ЮНЕСКО крупный Международный симпозиум по проблемам изучения русловых процессов, а также рабочий семинар по проблеме заиления крупных водохранилищ. В ноябре 1995 г. в Санкт-Петербурге был организован Симпозиум по расчетам речного стока при водохозяйственном проектировании в рамках реализации IV фазы МГП ЮНЕСКО.

Активно развивается двустороннее сотрудничество институтов Росгидромета со многими зарубежными партнерами, в первую очередь с гидрологическими организациями США, Германии, Финляндии, Китая, Великобритании, Франции, Японии, в основе которого лежат взаимные интересы при решении как глобальных, так и региональных проблем в области изучения водных ресурсов.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И ПРАКТИКИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ

В настоящем разделе дается краткий исторический обзор исследований, проведенных специалистами Гидрометцентра России и многих других научно-исследовательских институтов Росгидромета и Российской академии наук в области развития методов и совершенствования практики гидрометеорологических прогнозов.

Синоптические метеорологические прогнозы

В синоптической практике 1950—1970-х годов в краткосрочных прогнозах, наряду с экстраполяцией движения, тенденций, эволюции и адвекции температуры, широко использовались многочисленные закономерности движения и эволюции синоптических объектов, открытые на базе теории И. А. Кибеля и адвективно-динамического анализа: ведущий поток, расходимость и сходимость потоков и т. п. С. П. Хромовым защищался фронтологический анализ и учение о воздушных массах. Н. И. Булеевым и Г. И. Марчуком в прогностическую работу внедрялись фундаментальные выводы гидродинамической теории, особенно факторы, связанные с переносом вихря скорости. А. Ф. Дюбюк и его многочисленные сотрудники, соратники и ученики (Б. Д. Успенский, Г. И. Морской, А. И. Самойлов, В. Р. Дубенцов, И. П. Ветлов, А. Н. Мерцалов, А. А. Бачурина, Н. В. Лебедева, Н. В. Петренко, Е. М. Орлова, О. П. Глазова и др.) в Центральном институте прогнозов (ЦИП, ныне Гидрометцентр России) углубили исследования по синоптической метеорологии, особенно по разработке теории и практики учета упорядоченных движений синоптического масштаба, фронтальных и конвективных мезомасштабных вертикальных движений, расчета количества обложных и ливневых осадков, трансформации воздушных масс, суточного хода температуры и влажности в них, физики и правил прогноза всех важнейших явлений погоды, в частности снегопадов и метелей, туманов и гололеда, гроз и шквалов и т. д.

Результаты синоптической практики и вышеперечисленных исследований всех направлений в комплексе были фундаментально обобщены и изложены в нескольких изданиях „Руководства по краткосрочным прогнозам погоды“, качество которого было на уровне мировых стандартов. В более поздние издания этого руководства были включены достижения радиолокационной, спутниковой и синоптико-статистической метеорологии. Определенную роль в этом сыграли сотрудники Гидрометцентра Б. Е. Песков, И. А. Петриченко, Т. А. Галахова, Н. И. Глушкова, А. И. Снитковский, А. А. Васильев, О. Н. Белинский и др. Широко развивались исследования по региональной синоптической теории и практике, особенно в Ленинграде, Киеве, Тбилиси, Вильнюсе, Свердловске, Омске, Новосибирске, Ташкенте, Алма-Ате, Хабаровске, Владивостоке, позже в Воронеже и др. Фундаментальные результаты изложены в региональных дополнениях к руководству и научных статьях в Трудах НИИ, Гидрометцентра и журнале „Метеорология и гидрология“.

Выдающуюся роль в развитии синоптической метеорологии и практики прогнозирования погоды в 1960—1980-е годы сыграл А. Н. Мерцалов, который разработал количественные синоптические правила во всех сферах прогнозирования погоды и внес основной вклад в создание оперативной расчетной схемы краткосрочного прогноза погоды. Эта схема долгое время была на уровне мировых стандартов и в настоящее время остается базой для развития отечественных сверхкраткосрочных прогнозов погоды (наукастинга). Преимущества этой прогностической схемы заключаются в максимальном использовании, наряду с важнейшими достижениями синоптики и гидродинамики, всей фактической информации, в результате чего, уступая постепенно гидродинамическим методам в прогнозах за пределами 12—18 ч, она во многом опередила наукастинг за рубежом при прогнозах на 6—12 ч.

В 1970—1990-е годы синоптическая метеорология, в основном за рубежом, сосредоточилась на детальном анализе с использованием всех средств информации отдельных синоптических процессов для выявления принципиально новых прогностических факторов и закономерностей. Советские синоптики во главе с М. А. Петросянцем внесли большой вклад в исследование ат-

мосферы тропических регионов. Н. П. Шакина и др. углубили фронтологический анализ, большая роль которого признается и в гидродинамических моделях.

В последние 5 лет синоптические методы краткосрочного прогноза погоды постепенно уступают гидродинамическим и статистико-гидродинамическим. Однако они начали активно применяться в интерпретации гидродинамических моделей среднесрочных прогнозов заблаговременностью до 3—5 суток, особенно при прогнозе экстремальных явлений на территории России.

В настоящее время во многом параллельно развивается спутниковое и радиолокационное (в том числе мобильное), гидродинамическое и статистическое информационно-прогностическое обеспечение. Остается достаточной по количеству, хотя и сокращается, традиционная синоптическая информация. В прогностический комплекс все эти элементы объединяются на современных больших и малых компьютерах через гидродинамические и статистические модели в краткосрочных прогнозах и через гидродинамические, экстраполяционные и синоптические расчеты — в сверхкраткосрочных. По-прежнему на конце этой технологической цепочки остаются в оперативной работе и развиваются в исследованиях комплексные синоптико-микrokлиматические и прикладные метеорологические методы, фактическая информация об экстремальных явлениях погоды от потребителя, окончательные решения по которым выносит высококвалифицированный синоптик, ученый и практик одновременно. Краткосрочные и среднесрочные ориентировочные гидродинамико-статистические и гидродинамико-синоптические прогнозы экстремальных явлений используются в основном для усиления готовности к их возникновению, производства дополнительных наблюдений и прогностических расчетов меньшей заблаговременности, но большей точности по пространству и времени.

Таким образом, отечественные ученые внесли большой вклад в развитие синоптической метеорологии на всех стадиях ее полуторавековой истории. Практические результаты разрабатывавшихся ими синоптических методик не уступали, а во многом и опережали достижения зарубежных метеорологов.

Гидродинамические прогнозы погоды

Поиски путей и подходов к прогнозу погоды как задаче гидродинамики

Создание и последующее развитие гидродинамических методов прогноза метеорологических величин были подготовлены исследованиями по широкому кругу проблем теоретической метеорологии, начало которым было положено в 1920-х годах в Главной геофизической обсерватории (ГГО). Большое влияние на эти исследования оказал А. А. Фридман, идеи которого оказались исключительно плодотворными для последующего создания численных методов прогноза. Достаточно указать на выполненные им оценки относительного вклада слагаемых в уравнениях динамики атмосферы применительно к крупномасштабным погодообразующим процессам, на его выводы о значимости вертикальных движений в этих процессах. Фридман первым детально исследовал уравнение вихря скорости, которое впоследствии приобрело фундаментальное значение в современных методах прогноза, и приступил к построению замкнутой системы уравнений динамики атмосферы.

Укажем некоторые из числа важнейших проблем теоретической метеорологии, в решении которых в 1920—1930 гг. А. А. Фридманом и учеными его школы были получены фундаментальные результаты, также сыгравшие большую роль в последующем создании гидродинамических методов прогноза: исследование статистических характеристик крупномасштабной атмосферной турбулентности (А. А. Фридман, Л. В. Келлер), устойчивость фронтальных поверхностей и образование фронтальных циклонов (Н. Е. Кочин, Е. Н. Блинова, А. А. Дородницын, М. И. Юдин), движение атмосферных фронтов (Н. Е. Кочин, И. А. Кибель), нелинейные колебания поверхностей раздела в атмосфере (И. А. Кибель), общая циркуляция атмосферы (Н. Е. Кочин, Л. В. Келлер, А. А. Дородницын, Б. И. Извеков, М. Е. Швец) и др. Результаты этих исследований были подытожены и обобщены в двухтомном учебном пособии „Динамическая метеорология” (1937).

Здесь же, в ГГО, в конце 1930-х годов И. А. Кибелем были выполнены исследования, которые привели к созданию первых

прогностических схем. В этих исследованиях был указан малый параметр при производных по времени в уравнениях движения атмосферы, зависящий от соотношения пространственных и временных масштабов атмосферных процессов на вращающейся Земле, и дано разложение поля скорости ветра по степеням этого параметра. Существенным было также и то, что И. А. Кибель выделил атмосферный пограничный слой и как следствие показал возможность рассматривать свободную атмосферу как адиабатическую и невязкую среду. На этой основе им была построена первая в мировой практике методика краткосрочного гидродинамического прогноза давления и температуры воздуха у поверхности Земли в пунктах, допускающая ее практическую реализацию в повседневной прогностической работе. Исследование этой методики, проведенное в начале 1940-х годов, подтвердило, что теория правильно воспроизводит ряд основных факторов, определяющих изменение метеорологических величин во временном масштабе порядка 24 ч. Были подготовлены и разосланы в бюро погоды инструкции по составлению прогнозов по этой методике. Подчеркнем, что, помимо непосредственного практического значения, использование И. А. Кибелем при решении данной задачи известного факта близости ветра к геострофическому и условия квазистатичности крупномасштабных атмосферных движений сыграло определяющую роль в развитии теории и методов прогноза в рамках квазигеострофического приближения.

Работу И. А. Кибеля „Приложение к метеорологии уравнений механики бароклининой жидкости” (1940) следует рассматривать как одно из двух фундаментальных исследований, идеи которых открыли путь к созданию современных методов гидродинамического прогноза. Вторым фундаментальным исследованием стала работа Росби (1939), в которой линеаризованное уравнение вихря скорости на вращающейся Земле было применено для предвычисления волн давления в средней тропосфере. Позднее этот подход был использован в работах Е. Н. Блиновой, развившей методы среднесрочного и долгосрочного прогноза в северном полушарии. Значительным вкладом в изучение свойств крупномасштабных атмосферных движений явилась работа А. М. Обухова „К вопросу о геострофическом ветре” (1949) по анализу приспособления движения в атмосфере к геострофическому. В дальнейшем этот анализ сыграл существенную роль для построения баротропной

прогностической модели атмосферы на основе использования нелинейного уравнения вихря скорости. Позднее в работах И. А. Кибеля „О приспособлении движения воздуха к геострофическому” (1955) и А. С. Мони́на и А. М. Обухова „Малые колебания атмосферы и адаптация метеорологических полей” (1958) было дано теоретическое обоснование механизма этого приспособления в бароклиновой атмосфере.

Так создавался теоретический задел для последующей разработки схем гидродинамического прогноза, не утративший своего значения до настоящего времени. Подробные сведения по теории и практике гидродинамического прогноза изложены в монографиях.

Гидродинамические модели прогноза на основе квазигеострофического приближения

Последующее развитие гидродинамических методов прогноза на первом этапе состояло в усовершенствовании методики, основанной на работе И. А. Кибеля (1940). Среди результатов, полученных в 1940-х годах в ЦИПе, следует отметить модификацию постановки задачи, приведшую к уравнениям, близким к уравнениям вихря скорости и притока тепла в политропной атмосфере (Н. И. Булеев). Было уделено внимание прогнозу осадков, для которого имеет большое значение расчет вертикальных скоростей. Важный вклад в решение этой задачи внес А. Ф. Дюбюк, получивший формулу для расчета составляющей вертикальной скорости на верхней границе пограничного слоя. Вскоре с учетом созданного к этому времени теоретического задела исследования переключились на постановку задачи прогноза с использованием нелинейных уравнений вихря и притока тепла в квазигеострофическом (или квазисоленоидальном) приближении. К концу 1940-х — началу 1950-х годов на этой основе были разработаны одноуровневые и многоуровневые схемы прогноза барического поля и вертикальных токов соответственно для моделей баротропной и бароклиновой атмосферы. Из-за отсутствия необходимых вычислительных средств первые практические реализации этих схем основывались на использовании приближенных графического или графоаналитического методов, примененных со-

ответственно в ЦИПе и ГГО (Н. И. Булеев, М. И. Юдин). Достигнутая эффективность этих прогнозов позволила использовать их в качестве консультативного материала в оперативной практике.

Качественно новый этап в развитии прогностических моделей связан с появлением первых универсальных ЭВМ (1950-е годы), инициатором и энтузиастом применения которых для целей прогноза был И. А. Кибель, активно изыскивавший возможности доступа метеорологов к этим машинам, весьма дефицитным в то время.

В 1954 г. С. Л. Белоусовым первой на ЭВМ была реализована одноуровневая (баротропная) схема прогноза геопотенциала поверхности 700 гПа. В этой схеме тенденции изменения геопотенциала рассчитывались с помощью упрощенного локального решения разностного аналога уравнения вихря. Прогностические расчеты по этой схеме производились на машине БЭСМ-2 в Институте точной механики и вычислительной техники АН СССР. Позднее аналогичная схема была реализована на ЭВМ „Стрела” А. Ю. Биркганом и А. Н. Любимовым (1958). Первая бароклиническая схема была реализована на ЭВМ „Стрела” С. А. Машковичем. По этой схеме производился расчет прогнозов приземного давления и высоты AT_{500} на основе двухуровневой модели атмосферы с использованием функций влияния, полученных Н. И. Булеевым и Г. И. Марчуком. Из-за трудностей доступа к ЭВМ и большой трудоемкости подготовки исходных данных вручную оперативные расчеты по этим схемам производились лишь эпизодически.

В конце 1950-х годов были начаты оперативные расчеты прогностических карт барической топографии по трехуровневой схеме, разработанной П. К. Душкиным и Е. Г. Ломоносовым. Вскоре эти прогнозы оказались точнее соответствующих прогнозов, составлявшихся синоптическим методом. Позднее прогнозы по этой схеме были дополнены расчетом полей облачности и осадков с использованием методики предвычисления влажности, разработанной в ГГО М. Е. Швецом.

В 1961 г. в Гидрометцентре СССР были начаты расчеты прогнозов высот поверхностей 850, 500 и 300 гПа по схеме С. Л. Белоусова, заменившие соответствующие прогнозы синоптичес-

ким методом. В результате последующего развития схемы было обеспечено увеличение числа уровней, а также включение расчета вертикальных скоростей и траекторий воздушных частиц. Позднее повышение успешности прогноза приземного давления по данной схеме было достигнуто путем его совмещения с прогнозами приземного давления по субрегиональной синоптико-гидродинамической схеме, разработанной А. Н. Мерцаловым. В такой конфигурации схема оперативно использовалась вплоть до ее замены схемой на основе полных уравнений гидродинамики.

В 1960—1962 гг. в Гидрометцентре СССР И. Г. Ситниковым была разработана одноуровневая схема прогноза поля AT_{500} на ограниченной территории на срок до 3 суток с использованием итерационного решения уравнения для расчета тенденций геопотенциала на шагах по времени. Схема использовалась в оперативной практике в 1963—1964 гг. Позднее она была адаптирована для расчета ведущего потока с целью оперативного прогноза траекторий тропических циклонов.

Использование ЭВМ стимулировало работы по совершенствованию физической основы гидродинамического прогноза. В этом направлении коллективом исследователей, руководимым И. А. Кибелем, в 1950-х годах были выполнены работы по включению в постановку задачи прогноза эффектов приземного трения, орографии, наличия фронтов и др. Результаты, полученные В. В. Быковым, В. П. Садоковым, С. В. Немчиновым и другими, обобщены в монографии И. А. Кибеля „Введение в гидродинамические методы краткосрочного прогноза погоды” (1957).

К числу основных результатов работ этого направления, выполненных в 1960-х годах под руководством М. И. Юдина в ГГО, относится создание агеострофической схемы прогноза полей ветра, температуры и вертикальных скоростей на уровнях 850, 500, 00 и 200 гПа с использованием трехуровневой сетки (авторы Г. И. Юдин и К. В. Пятыгина). Позднее эта схема была использована для предвычисления перемещения барических центров. Там же Г. В. Руховец и Б. М. Ильин разработали малопараметрическую пятиуровневую схему прогноза приземного давления, геопотенциала и вертикальных скоростей с использованием данных о приземных барических тенденциях. В основу схемы положена

идея А. М. Обухова об оптимальном представлении вертикальных профилей метеорологических величин в виде разложения ряда по естественным ортогональным функциям. Начиная с 1970 г. схема использовалась в качестве оперативной в Северо-Западном УГМС, а позднее — и в Белорусском УГМС. Результаты, полученные в этом и других направлениях в 1950-х — начале 1960-х годов в ГГО, обобщены в монографии М. И. Юдин „Новые методы и проблемы краткосрочного прогноза погоды (1963).

В 1960-е годы в работы по созданию схем гидродинамического прогноза активно включился коллектив ученых Вычислительного центра Сибирского отделения Академии наук СССР (ВЦ СО АН), руководимый Г. И. Марчуком. Первой из построенных здесь схем прогноза была пятиуровневая квазигеострофическая схема для ограниченной территории, в которой система разностных уравнений модели решается методом последовательных приближений с прогонкой по вертикали. Начиная с мая 1964 г. прогнозы приземного давления и геопотенциала по этой схеме использовались в оперативной работе Западно-Сибирского УГМС вплоть до ее замены схемой на основе полных уравнений, разработанной в ВЦ СО АН.

Вскоре оперативные гидродинамические прогнозы по квазигеострофическим схемам начали рассчитываться также в Ташкенте (САНИГМИ), Тбилиси (ЗакНИГМИ), Минске (Белорусское УГМС) и других городах. Большое значение для внедрения гидродинамических прогнозов имело создание методов объективного анализа и других компонентов обработки информации на ЭВМ. Данные по этим работам изложены в монографии С. Л. Белоусова, Л. С. Гандина и С. А. Машковича „Обработка оперативной метеорологической информации с помощью ЭВМ” (1968).

Важным практическим итогом работ этого периода было повышение успешности синоптических прогнозов погоды благодаря повседневному использованию синоптиками продукции гидродинамических прогнозов метеорологических полей. Для прогнозов по Москве это повышение успешности начиная с середины 1960-х годов было отмечено В. А. Бугаевым („Новое в прогнозировании погоды”, 1972).

Прогноз на основе системы полных уравнений гидродинамики

Успехи, достигнутые к началу 1960-х годов, дали импульс развитию более совершенных прогностических моделей, не использующих гипотезу квазигеострофичности крупномасштабных атмосферных движений и основанных на полных уравнениях, т. е. квазистатических уравнениях, не упрощенных за счет предположения о квазигеострофичности, но с сохранением условия квазистатичности. В теоретическом плане этот переход был подготовлен уже упоминавшимися исследованиями процесса приспособления полей ветра и давления к геострофическому балансу. Практическая возможность перехода к моделям на основе полных уравнений, требующих значительно большего объема вычислений (в первую очередь из-за необходимости использовать малые шаги по времени для устойчивого счета), возникла благодаря появлению более производительных ЭВМ. Если квазигеострофические модели могли быть реализованы на универсальных ЭВМ первого поколения (т. е. ламповых), то для прогноза на основе полных уравнений эти ЭВМ были уже малоприспособны.

В первых работах этого направления, выполненных в Гидрометцентре СССР под руководством И. А. Кибеля, устойчивость счета при использовании сравнительно больших шагов по времени (порядка одного часа и более вместо нескольких минут, как это требуется с учетом скорости распространения волн, не имеющих значения для прогноза, но описываемых уравнениями) достигалась благодаря тому, что разностные уравнения движения записывались неявно по линейным членам. Первыми на основе этого подхода были разработаны трехуровневая схема для прогноза геопотенциала и ветра (автор С. А. Бортников) и пятиуровневая схема прогноза геопотенциала, вертикальной скорости и количества осадков (автор В. М. Кадышников). В 1965—1970-х годах в различных конфигурациях эти две схемы были внедрены в практику соответственно для целей метеорологического обеспечения авиации и для прогноза погоды.

Вторая из двух названных прогностических схем в последующие годы прошла ряд модификаций и усовершенствований и в настоящее время является основой региональной оперативной модели в Гидрометцентре России. С учетом многолетнего опыта

ее использования в последние годы В. М. Лосевым здесь разработана модель регионального прогноза нового поколения с разрешением сетки 50 км на 15 сигма-уровнях, область расчета — массив 157×241 точек сетки. Боковые граничные значения эволюционных зависимых переменных определяются по выходной продукции оперативной спектральной модели. Новая модель ориентирована на ее оперативную реализацию в Гидрометцентре России с помощью многопроцессорной суперЭВМ CRAY.

Вслед за внедрением первых двух рассмотренных схем прогноза по ограниченной территории в Гидрометцентре СССР в 1971—1973 гг. были разработаны и реализованы в оперативной практике три полушарные схемы прогноза полей геопотенциала и других метеорологических величин, авторами которых являются Л. В. Беркович, Д. Я. Прессман и М. С. Фукс-Рабинович и С. О. Кричак. Схемы различаются по физическому наполнению, числу уровней и методам численного решения прогностических уравнений. Первая из указанных схем составляет основу нынешней оперативной неадиабатической многоуровневой полушарной модели краткосрочного прогноза. В модели используется „расштанная” сетка с шахматным расположением узлов, что значительно сокращает время счета. Выходная продукция модели в сочетании с расчетами по модели атмосферного пограничного слоя используется для прогнозирования характеристик погоды в пунктах и решения ряда прикладных задач. Многолетние усовершенствования модели со времени ее создания обеспечили неуклонный рост успешности прогнозов. В частности, оценки оперативных прогнозов приземного давления и AT_{500} на 72 ч для территории Европы и Западной Сибири в 1987 г. оказались на уровне оценок 24-часовых прогнозов в 1981—1982 гг.

Интенсивные работы по созданию методов прогноза на основе полных уравнений проводились в ВЦ СО АН. Существенно новым здесь было использование метода расщепления исходной системы уравнений на ряд подсистем, отвечающих физическим процессам с различными пространственно-временными масштабами. Применительно к метеорологическим задачам метод был разработан Г. И. Марчуком. Такой подход позволяет использовать различные шаги по времени для интегрирования различных подсистем, чем обеспечивается экономия вычислений. Метод расщепления предоставляет широкие возможности для построения сложных вы-

ислительных алгоритмов на основе синтеза элементарных алгоритмов, легко реализуемых на ЭВМ.

Коллективом ученых ВЦ СО АН, руководимым Г. И. Марчуком, на этой основе была разработана оперативная неадиабатическая модель краткосрочного прогноза для ограниченной территории (В. П. Дымников, Г. Р. Контарев и др.), заменившая в 1970 г. ранее использовавшуюся в Западно-Сибирском УГКС квазигеострофическую схему. Позднее на этой основе был построен полушарный вариант неадиабатической модели прогноза Каленкович и Пененко).

Высокую эффективность созданной модели подтверждает, в частности, выполненный Г. Р. Контаревым в 1973 г. эксперимент по сравнению оперативных схем прогноза Национального метеорологического центра США и ВЦ СО АН для ограниченной территории (26 × 22 точки) с использованием ресурсов ЭВМ и системы усвоения и анализа данных службы прогнозов в США. В результате показатели успешности прогнозов по обеим моделям (23 примера) оказались на одном уровне.

В нынешней конфигурации данная модель реализована в сигма-системе координат (15 уровней) на сферической сетке из 66 × 34 узлов с шагом 1,66° по широте и 1,25° по долготе для области 0—80° с.ш., 40—146,6° в.д. В модели учитываются орография, планетарный пограничный слой, сухая и влажная конвекция и гидрологический цикл в системе атмосфера—почва. Модель интегрирована в систему оперативного мониторинга качества окружающей среды для Сибирского региона (Климова и Римин).

Вслед за успешной практической реализацией моделей крупномасштабного прогноза на основе полных уравнений естественным развитием методов гидродинамического прогноза является освоение мезомасштабных и локальных моделей, предусматривающих, в частности, прогнозирование элементов погоды. Пространственно-временные масштабы процессов, которые при этом должны быть воспроизведены, уже не допускают применения условия квазистатичности, заложенного в моделях на основе полных уравнений. Именно такую перспективу для перехода от прогноза метеорологических полей к прогнозу погоды теоретически обосновал И. А. Кибель. В работах этой направленности в гидрометцентре России воспроизведение процессов локального масштаба строится на основе методов теории глубокой (трехмер-

ной) конвекции. К настоящему времени на этой основе Д. Я. Прессманом и сотрудниками построена негидростатическая модель для области размером 290×290 км с шагом сетки 10 км на 15 уровнях в атмосфере и пяти — в почве; задание боковых граничных условий эволюционных зависимых переменных производится по прогнозу с помощью региональной модели разрешением 50 км. Проведенные модельные расчеты подтверждают эффективность построенного алгоритма.

Гидродинамические модели локального прогноза в последнее время находят широкое применение в задачах оценки антропогенного воздействия на окружающую среду. Работы в данном направлении активно ведутся в ВЦ СО АН под руководством В. В. Пененко. Такой расчет воздействия на мезоклимат выполнен для региона Томского промышленного района.

Спектральные методы

К началу 1990-х годов спектральные прогностические и климатические модели заняли доминирующее место в основных метеорологических центрах, почти полностью заменив глобальные и полушарные конечно-разностные модели. Остановимся на разработке и применении спектральных методов решения прогностических уравнений и соответствующих моделей в нашей стране.

Начало исследований в упомянутом направлении связано работой Е. Н. Блиновой по теории волн давления и температуры и центров действия атмосферы, в которой было дано решение линейных уравнений, удовлетворяющее произвольному начальному распределению метеорологических величин. Линейная ризация была проведена относительно зонального течения с скоростью, отвечающей случаю „твердого вращения“ атмосферы относительно Земли (индекс циркуляции $\alpha_1 = \text{const}$). Решением было найдено спектральным методом с использованием разложения рядов по сферическим функциям и представляло совокупность волн, перемещающихся со скоростями, зависящими от размеров волн и индекса циркуляции. Существенным было то, что впервые в задаче численного прогноза использовалось уравнение вихря и рассматривалась совокупность волн, а не отдельные решения, как в работах Росби и Гаурвица.

В 1946—1948 гг. в отделе динамической метеорологии ЦИПа на основе результатов, полученных Е. Н. Блиновой, была разработана практическая схема прогноза (Н. А. Багров, С. А. Машкович, А. С. Монин, Г. И. Морской, Я. М. Хейфец). Для практической реализации спектральных моделей важное значение имела подготовка таблиц полиномов Лежандра, выполненная Я. М. Хейфецем (1947). Более полные таблицы были рассчитаны позднее С. Л. Белоусовым. Первые опытные прогнозы H_{500} на несколько суток произвели большое впечатление: барические образования на карте полушария „жили”, развивались, перемещались, трансформировались весьма правдоподобно, во многом соответствуя наблюдавшимся процессам. И хотя точность этих прогнозов оставляла желать лучшего, полученные результаты стимулировали дальнейшие исследования. Была введена зависимость индекса циркуляции от географической широты (Машкович, 1948) и тем самым учтен обмен энергией между зональным течением и его возмущениями. Значение такого обобщения было подчеркнуто А. С. Мониным (1951), проанализировавшим преобразование энергии в атмосферной циркуляции и показавшим необходимость правильного учета сдвига скорости зонального потока. Важным этапом был переход к трехмерным моделям (Е. Н. Блинова, 1952; Я. М. Хейфец, 1952). Были учтены орография (Ш. А. Мусаелян) и термическая трансформация (Е. М. Добрышман), предложена методика прогноза осадков (Е. М. Добрышман). В 1951 г. Е. Н. Блинова разработала модель для прогноза средних месячных аномалий температуры, основанную на идее о том, что в линейной задаче при наличии турбулентного трения влияние исходного состояния со временем затухает и аномалии формируются под действием меридиональных вторжений теплых и холодных воздушных масс, их широтного переноса зональным течением и термической трансформацией.

На основе разработанных моделей в ЦИПе в течение ряда лет оперативно составлялись среднесрочные и месячные численные прогнозы, которые использовались синоптиками в качестве вспомогательной информации.

В дальнейшем развитии линейных моделей важную роль сыграло появление ЭВМ, использование которых позволило улучшить горизонтальное разрешение и физическое содержание моделей. Две из разработанных моделей — двухуровневая (М. Б. Галин, 1963) и трехуровневая — использовались длительное время

для расчета оперативных среднесрочных прогнозов барического поля, причем трехуровневая модель применялась для составления рекомендованных курсов торговых судов.

На основе линейных спектральных моделей начиная с работ Е. Н. Блиновой интенсивно развивалась гидродинамическая теория климата (Е. Н. Блинова, Г. И. Марчук, 1958; Е. М. Добрышман, 1956; Г. П. Курбаткин, 1957; С. А. Машкович, 1950, 1956 Ракипова, 1957 и др.).

Однако наиболее важным этапом развития спектральных прогностических моделей был переход к решению нелинейной задачи. В конце 1940-х — начале 1950-х годов предпринимались попытки учесть нелинейные эффекты в прогностических моделях. Так, Е. Н. Блинова (1949) использовала для прогноза индекса циркуляции уравнение вихря, осредненное по долготе. При этом для вычисления осредненных нелинейных членов этого уравнения использовался прогноз незональных компонент движения по линейной модели. Попытка учета нелинейных эффектов для всего спектра волн была предпринята С. А. Машковичем (1952—1953). Он использовал метод последовательных приближений, причем в качестве первого приближения брал решение для линейного случая. Основная идея состояла в том, чтобы представить нелинейные члены в виде разложения в ряды по сферическим функциям и затем решать линейные уравнения с известной правой частью. Центральное место при этом занимал способ спектрального представления нелинейных членов. Были применены два подхода, во многом сходные с современными методами коэффициентов взаимодействия и спектрально-сеточного преобразования, хотя техника расчетов заметно отличалась.

Впоследствии был разработан ряд спектральных моделей с коэффициентами взаимодействия (Эльзассер, 1966; И. Г. Вейль, 1970; С. А. Машкович и И. Г. Вейль, 1970; Г. П. Курбаткин, 1970 и 1973, и др.). Аналогичные методы были применены для решения полных уравнений (Мерилис, 1968; И. Г. Вейль, 1977).

Другой путь расчета коэффициентов разложения нелинейных членов в ряды по сферическим функциям заключается в вычислении производных, входящих в якобиан F , путем дифференцирования рядов, суммирования этих рядов в узлах сетки и последующего вычисления значений F в узлах. Затем сеточные значения вновь разлагаются в ряды, и решаются линейные спек-

тральные уравнения с известной правой частью. С. А. Машкович (1954) использовал такой подход, применяя метод последовательных приближений с результатами линейного прогноза в качестве первого приближения для вычисления нелинейных членов. Эта процедура напоминает современный метод спектрально-сеточного преобразования (часто сокращенно называемый методом преобразования), но существенно уступает ему по технике расчета.

Метод спектрально-сеточного преобразования в современном виде сформулирован благодаря исследованиям Орзага (1970), Элиассена и Макенхауера (1970). Широкому его применению способствовало появление высокопроизводительных ЭВМ. При использовании разностной схемы по времени этот метод позволяет эффективно рассчитывать нелинейные члены по данным за предыдущий временной шаг.

При реализации метода преобразования существенную роль играет точность вычисления коэффициентов разложения, т. е. вычисления соответствующих интегралов. В методе коэффициентов взаимодействия интегралы вычисляются точно по аналитическим формулам; погрешности, если отвлечься от ошибок округления, здесь отсутствуют. Однако в методе преобразования интегралы приходится находить численно, причем процедура разложения в ряды повторяется многократно. Необходима большая точность, чтобы возникающие погрешности не исказили результаты. Положение спасает то обстоятельство, что подынтегральные выражения имеют полиномиальную структуру и, следовательно, интегралы могут быть вычислены точно с помощью квадратур Гаусса. Было оценено число сеточных узлов, необходимое для точного интегрирования: при рядах с $0 \leq m \leq M$; $m\gamma \leq n\gamma \leq m\gamma + J = N$ для расчета интегралов по λ нужно использовать $k_1 > 3M + 1$ узлов, а для интегралов по θ требуется $k_2 \geq M + \frac{3}{2}J$ гауссовых широт.

Сопоставляя оба рассмотренных метода, следует иметь в виду, что при увеличении пространственного разрешения быстро увеличивается объем таблиц коэффициентов взаимодействия и число операций. Так, для метода коэффициентов взаимодействия и метода преобразования число операций пропорционально N^5 и N^3 соответственно, а объем таблиц — $0,226N^5$ и N^2 .

Применение спектральных моделей дает определенные преимущества по сравнению с разностными моделями (отсутствие нелинейной вычислительной неустойчивости, уменьшение ошибок в перемещении волн и др.), поэтому они широко использовались в различных исследовательских и прикладных целях. Так, модель со среднеклиматическими ограничениями и избыточными степенями свободы (Г. П. Курбаткин и др., 1970) имела целью уточнение воспроизведенных ультрадлинных атмосферных волн. Для этого заранее рассчитывались „климатические источники”, определяющие годовые вариации метеорологических величин. Исследовалась роль горизонтального разрешения и чувствительность моделей к ошибкам исходных данных (Г. П. Курбаткин и др., 1973; С. А. Машкович и др., 1972). Среди приложений можно указать исследования по четырехмерному усвоению данных, в том числе с применением динамико-стохастического подхода (Д. М. Сонечкин, С. А. Машкович, Кордзахия, 1975).

Определенное внимание уделялось малокомпонентным моделям. Важные теоретические исследования систем гидродинамического типа выполнил А. М. Обухов. Результаты этих исследований, а также лабораторных экспериментов обобщены в монографии „Нелинейные системы гидродинамического типа” (1974).

Аналитическое решение двухуровневой малокомпонентной модели показало, что в нелинейном случае возникает колебательный процесс, тогда как в линейной задаче отмечается потеря устойчивости. Галин и Киричков (1979) в рамках сходной модели с учетом ньютоновской температурной релаксации изучали взаимодействие зональной циркуляции с волнами и формирование циркуляции Хэдли.

В прогностических целях использовались также модели с обобщенными сферическими функциями. Опираясь на аппарат обобщенных сферических функций, М. И. Юдин сформулировал основы построения модели с учетом особенностей движений разных пространственных масштабов.

К началу 1980-х годов в Гидрометцентре СССР был накоплен большой опыт создания спектральных моделей с использованием как метода коэффициентов взаимодействия (И. Г. Вейль, 1977; С. А. Машкович, 1979), так и метода спектрально-сеточного преобразования (Г. И. Анжина, 1976). Однако в оперативной практике

они не использовались в основном из-за отсутствия необходимых вычислительных ресурсов.

Значительными шагами на пути создания оперативной прогностической системы гидродинамического среднесрочного прогноза в Гидрометцентре СССР были установка в 1984 г. на порядок более мощной по сравнению с CYBER-172 универсальной ЭВМ ИТАСНІ и реализация неадиабатической полусферной спектральной модели общей циркуляции атмосферы.

Прототипом этой системы послужила спектральная модель Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП), которая заметно превосходила по своим прогностическим характеристикам модели других зарубежных центров, была построена на принципах структурного программирования и тщательно документирована. В Гидрометцентре СССР неадиабатическая спектральная модель была реализована на ЭВМ ИТАСНІ и внедрена в оперативную практику в варианте Т40L15 (треугольное усечение рядов по 40 сферическим гармоникам и с 15 сигма-уровнями по вертикали).

Треугольное усечение рядов обеспечивает изотропность аппроксимации дифференциальных уравнений в любой точке сферы, а также дает более точное по сравнению с другими типами усечений представление энстрофии (квадрата потенциального вихря) в пространстве спектральных коэффициентов.

В качестве вертикальной координаты взята сигма ($\sigma = p/p^*$, где p — давление, p^* — приземное давление). Использование сигма-координаты позволяет учесть влияние орографии в спектральной модели и обойти трудности, связанные с формулировкой нижнего граничного условия по вертикали в традиционной изобарической системе координат.

В спектральной модели толща атмосферы ($0 \leq \sigma \leq 1$) разбита на k слоев, разделенных $k-1$ уровнями. Основные прогностические переменные — вихрь, дивергенция скорости, температура, отношение смеси — приписаны к серединам слоев, в то время как вертикальная скорость $\dot{\sigma} = d\sigma/dt$ — к границам между ними (вычислительная сетка Лоренца). Сетка Лоренца дает возможность удовлетворить кинематическим граничным условиям, а также построить сохраняющуюся квадратичные инварианты ап-

проксимацию слагаемых, описывающих вертикальную адвекцию. Применяется конечно-разностная аппроксимация уравнения гидростатики, которая согласована с аппроксимацией уравнения термодинамики таким образом, чтобы обеспечить сохранение энергии при адиабатическом безвязкостном движении воздушных масс.

Поскольку из-за переноса кинетической энергии по спектру в область высоких частот в спектральной модели могут нарастать амплитуды самых коротких волн вблизи границы усечения, то вдоль сигма-поверхностей вводится линейная горизонтальная диффузия четвертого порядка, которая эффективно параметризует сток кинетической энергии в процессы подсеточного масштаба.

Расчет вертикальных турбулентных потоков импульса, тепла и влаги в приповерхностном слое атмосферы основан на автотельных функциях Бузингера, вид которых следует из теории подобия А. С. Мони́на—А. М. Обухова. Различаются два предельных с физической точки зрения случая устойчивой и неустойчивой стратификации. Для каждого из них по эмпирическим данным подобраны соответствующие параметры соотношений между скоростью ветра, температурой, влажностью и турбулентными потоками. Вычисление потоков в свободной атмосфере осуществляется по характерной для турбулентных схем второго уровня замыкания зависимости коэффициента турбулентного обмена от градиентного числа Ричардсона.

Процессы влажной конвекции в модели трактуются по схеме Куо. Областью конвекции считается зона конвергенции влаги, обусловленная адвекцией и турбулентным обменом при условии существования в ней неустойчивой стратификации. Количество образующихся за единицу времени облаков (балл) определяется избытком внутренней энергии облачной массы над энергией окружающего воздуха, который обеспечивается конвергенцией водяного пара.

Появление слоистой облачности происходит в тех точках модельной сетки, в которых имеется перенасыщение водяного пара. Излишки водяного пара конденсируются с выделением тепла. При этом осадки возникают только при выполнении хотя бы одного из условий: а) температура воздуха на вершине облака меньше -12°C (в этом случае выпадает вся сконденсированная

влага); б) полное содержание жидкой воды во всех облачных слоях превосходит 2 мм (в этом случае дождь уносит ровно столько жидкой воды, чтобы осталось 2 мм). Условие (а) характеризует возрастание скорости конденсации за счет образования ледовой фазы, в то время как условие (б) отражает увеличение скорости слияния водяных капель в мощных облаках с большим количеством капель разных размеров.

Параметризация радиации в модели основана на гипотезе о независимости процессов рассеяния излучения от процессов его поглощения. Наличие облачности допускается в любом слое атмосферы, при этом предполагается, что облака занимают весь слой по вертикали и их оптические свойства определяются с учетом постоянства отношения содержания жидкой фазы к насыщающей влажности водяного пара.

Исчерпывающее описание базовой спектральной модели, особенностей организации ее программного обеспечения, а также характеристика созданной для оперативного использования инфраструктуры — базы данных, пре- и постпроцессинг даны в монографии Г. П. Курбаткина, А. И. Дегтярева, А. В. Фролова „Спектральная модель атмосферы, инициализация и база данных для численного прогноза погоды” (1994).

В последующие годы полусферная спектральная модель T40L15 получила дальнейшее развитие. В частности, была разработана схема учета торможения зонального потока вертикально распространяющимися гравитационными волнами, генерируемыми неоднородностями орографии подсеточного масштаба, введен суточный ход солнечной радиации (Астахова, Круглова, 1991), предложены новые схемы вертикальной интерполяции данных из изобарической в сигма-систему координат и обратно, схема „почва—растительность—атмосфера”.

Результаты исследований прогностических возможностей модели T40L15 можно подытожить следующим образом. Полусферная спектральная модель T40L15 дает практически полезный прогноз барического поля в свободной атмосфере на срок до 4—5 суток летом (5—7 суток зимой), давления у земли на сутки меньше, осадков в интервале от 24 до 86 ч. При этом при неизменном вертикальном и горизонтальном разрешении модели отмечается устойчивое повышение качества гидродинамических среднесрочных прогнозов по сравнению с 1986 г. за счет усовер-

шенствования самой модели и повышения точности восстановления начальных полей в рамках схемы оперативного объективного анализа. С 1 апреля 2001 г. в оперативной работе используется глобальная спектральная модель T85L31 высокого пространственного разрешения, позволившая вплотную приблизиться по качеству прогнозов к ведущим мировым метеорологическим центрам.

Установка в конце 1996 г. в ГВЦ Росгидромета суперЭВМ CRAY Y-MP8E позволила более чем в 20 раз сократить время счета оперативного сеанса по полусферной спектральной модели T40L15 по сроку 12 ч UTC и ввести дополнительный сеанс для обслуживания авиации по сроку 00 ч UTC. Были созданы глобальные варианты спектральной модели высокого пространственного разрешения T40L31 и T85L31 (Фролов, Важник, Цветков, Астахова, 1999). Внедрение модели T85L31 потребовало тщательного исследования ряда научно-методических вопросов — подготовки спектрально-согласованного рельефа и климатических полей характеристик состояния подстилающей поверхности (температуры и влажности почвы, альбеда, шероховатости), настройки блоков параметризаций подсеточных физических процессов к высокому горизонтальному и вертикальному разрешению.

Гидродинамический прогноз элементов погоды

И. А. Кибель уже в 1950-х годах обозначил программу развития гидродинамических методов, назвав при этом основные направления ее реализации на пути построения моделей мезомасштабного и локального прогноза. Не рассматривая здесь широко применяемые в настоящее время и весьма эффективные решения проблемы прогноза элементов погоды статистическими методами, отметим, что интенсивные исследования в указанном направлении уже привели к обнадеживающим результатам.

В то же время при современном уровне доступной вычислительной техники, возможностей систем наблюдения и передачи данных и наших знаний о физических параметрах атмосферы и подстилающей среды весьма перспективным представляется решение рассматриваемой задачи на основе гидродинамического

моделирования крупномасштабных атмосферных процессов с последующим применением локально-адаптированных параметризаций для воспроизведения процессов меньших пространственно-временных масштабов.

В рамках названного подхода в Гидрометцентре России в последние годы под руководством Л. В. Берковича была построена система локального прогнозирования элементов погоды, использующая неадиабатическую гидродинамическую модель атмосферы, модель атмосферного пограничного слоя и полуэмпирические соотношения для расчета параметров, которые не могут быть воспроизведены явно в моделях (облачность различных ярусов, радиационные факторы изменения приземной температуры воздуха и др.). В настоящее время данная система обеспечивает предвычисление на сроки до 48—84 ч с дискретностью 3 ч следующих метеорологических величин и характеристик погоды в пунктах и точках сетки для территории России и Европы:

- атмосферное давление, температура воздуха, относительная влажность воздуха, скорость и направление ветра (включая скорость ветра при порывах);

- количество облаков нижнего, среднего и верхнего ярусов;

- 12-часовые суммы обложных и конвективных осадков за день и за ночь;

- вертикальные профили температуры, ветра и коэффициента турбулентности в нижнем 2-километровом слое.

На этой же методической основе для Москвы названные характеристики рассчитываются с детализацией по шести регионам города и ближайших окрестностей.

Оперативное использование метода показало практическую результативность данной системы прогнозирования. Отметим лишь, что к числу факторов, обеспечивающих оперативную эффективность системы, относится и то, что она реализована на ЭВМ различных уровней производительности, включая персональные ЭВМ, задействованные в рамках автоматизированного рабочего места синоптика (АРМС). Технология АРМС позволяет синоптику быстро получать в наглядном виде необходимые прогностические данные, освобождая его от выполнения ряда расчетов и построений, и благодаря этому предоставляет более широкие возможности для использования индивидуальных синоптических знаний и опыта в прогностической работе.

Обсудим практическую ценность созданной системы с точки зрения нынешнего уровня мировой практики в этой области. Прежде всего, отметим известную „уникальность” ее выходной продукции. Это, в частности, относится к рассчитываемым прогнозам вертикальных профилей метеорологических величин в нижнем слое атмосферы и к прогнозам по районам большого города: в научной литературе и официальных документах в настоящее время нет данных о подобного типа расчетах где-либо еще. В то же время эти прогнозы весьма эффективны. Так, рассматриваемые профили метеорологических величин позволяют успешно воспроизводить такое мезомасштабное явление, как струйное течение со скоростью более 15 м/с в пограничном слое, и связанную с ним температурную инверсию в верхней части этого слоя. В Москве струйное течение в пограничном слое наблюдается довольно часто: до восьми случаев в месяц в зимнее время. Успешный прогноз названных явлений важен для целей метеорологического обеспечения взлета и посадки воздушных судов, прогноза условий загрязнения воздушного бассейна в городе и других прикладных задач.

Эффективность прогноза элементов погоды с детализацией по районам большого города подтверждается, в частности, тем, что прогнозируемые различия температуры воздуха в центре города и в ближайшем пригороде соответствуют по знаку фактическим различиям, хотя и меньше последних по абсолютной величине. Отчасти это занижение связано с тем, что в модели в явном виде не учтены антропогенные факторы, приводящие к различиям метеорологических величин в городе и в пригороде (городской „остров тепла” и др.). Найти оптимальный подход к учету этих факторов — одна из важнейших проблем совершенствования прогнозов с детализацией по районам большого города.

В целом достигнутая к настоящему времени успешность прогнозов элементов погоды в пунктах соответствует их успешности в других метеорологических центрах. В частности, успешность прогнозов максимальной и минимальной температуры и ветра в среднем близка к оценкам для соответствующих прогнозов, рассчитываемых на основе статистической интерпретации продукции крупномасштабных прогнозов в метеорологической службе США.

Подчеркнем, что прогнозирование элементов погоды в пунктах на основе данного подхода допускает дальнейшее развитие в направлении параметрического представления вклада различных факторов, не учитываемых в настоящее время (гидрологический цикл в системе атмосфера—почва, атмосферная конвекция, наличие атмосферных фронтов и др.). Исследования в этих направлениях ведутся весьма активно.

Развитие систем объективного анализа и усвоения данных

Объективный анализ есть задача восстановления значений метеорологического поля в некоторой области пространства по данным конечного числа наблюдений, содержащих ошибки. Недостаточность реально имеющейся метеорологической информации, порождающая неединственность решения, привела к возникновению большого числа различных методов объективного анализа. Эти методы различаются размерностью решаемой задачи (1-, 2-, 3- или 4-мерный объективный анализ), областью анализа (весь земной шар или ограниченная территория, тропосфера, стратосфера, планетарный пограничный слой, тропическая зона и пр.), масштабом анализируемых атмосферных процессов (планетарный, синоптический или мезомасштаб), анализируемой метеорологической величиной (температура, ветер, влажность и др.), характером используемых метеорологических наблюдений (прямые: аэрологические и синоптические или косвенные: спутниковые и наземные дистанционные) и назначением целей объективного анализа (для гидродинамического прогноза погоды, диагностических исследований, синоптического прогноза, климатического анализа и пр.).

Исторически первыми были эмпирические методы. Сюда относится метод взвешенного среднего (называемый в статистике методом ядерного сглаживания) и его итерации — метод последовательных коррекций и полиномиальная интерполяция лосальными многочленами низкой степени.

Им на смену пришли теоретически более обоснованные статистические методы, применение которых позволило существенно повысить точность объективного анализа. Эти методы основаны на введении вероятностной модели анализируемых полей,

рассматриваемых как случайные поля, и вероятностной модели случайных наблюдений. Метод получения наилучшей в среднеквадратическом смысле линейной несмещенной оценки, родственной методам линейного регрессионного анализа, называется оптимальной интерполяцией. Этот метод ввел в метеорологическую практику Л. С. Гандин (1963), исходя из основополагающих работ А. Н. Колмогорова и Н. Винера по теории случайных процессов и метеорологических работ. Метод оптимальной интерполяции, позволяющий использовать дополнительную информацию об анализируемых метеорологических полях в виде оценок их пространственных ковариаций, оказался исключительно продуктивным на практике. Оптимальная интерполяция позволяет учитывать взаимное пространственное расположение и особенности используемых наблюдений, в частности дисперсии и пространственно-временные корреляции их ошибок, а также усваивать данные косвенных измерений.

Аналогичные оптимальной интерполяции методы применяются не только в метеорологии, но и в других науках о Земле, в частности в океанологии. В геологии и гидрологии аналогичные методы называются геостатистическими, или кригингом.

Метод оптимальной интерполяции развивался от двумерного варианта к трехмерному и четырехмерному, от одноэлементного анализа к многоэлементному (одновременное использование наблюдений различных метеорологических элементов). Вводились все более сложные вероятностные модели анализируемых метеорологических полей, параметры этих моделей оценивались по реальным данным. Увеличивалось количество „влияющих на наблюдения” (от локальной оптимальной интерполяции к „букс-методу” и глобальным вариантам оптимальной интерполяции). Усложнялись методы контроля метеорологических наблюдений, в которых также широко применялся и применяется метод оптимальной интерполяции.

В Гидрометцентре России в течение ряда лет в оперативной практике используется локальная многоэлементная схема оптимальной интерполяции, в настоящее время — в трехмерном варианте. Ведутся также работы по оцениванию параметров статистической структуры полей первого приближения, использованию вариационных методов при объективном анализе, созда

ию эффективных методов и схем усвоения спутниковых данных термического зондирования атмосферы.

Параллельно статистическим методам объективного анализа развивались и другие, в частности спектральные. Большое распространение получили вариационные методы объективного анализа. Они отличаются использованием при объективном анализе дополнительной информации в виде требования гладкости анализируемых полей и/или требования выполнения тех или иных дифференциальных или разностных уравнений. Здесь первой была работа Сасаки (Sasaki, 1970). Между вышеперечисленными методами имеются многочисленные связи. Большинство из них можно интерпретировать как точный или приближенный вариант статистического метода.

В большинстве схем объективного анализа усвоение данных наблюдений производится как коррекция некоего опорного поля „первого приближения”. Первые схемы объективного анализа использовали в качестве таковых поля климатических норм. Затем появилась идея использовать в качестве „первого приближения” поля численного прогноза, стартовавшего в некоторый предшествующий момент времени. Так появились схемы дискретного четырехмерного усвоения данных „прогноз—анализ”, активно применяющиеся в настоящее время. Использование оптимальной интерполяции на этапе анализа позволяет частично оптимизировать процедуру усвоения данных как текущих, так и прошлых (через поле „первого приближения”) наблюдений. Более полная оптимизация возможна в схеме усвоения, реализующей так называемый фильтр Калмана (Kalman, 1960). Впервые предложил применить фильтр Калмана в метеорологии Джонс (Jones, 1965), в нашей стране следует отметить работы Д. М. Сочеткина в 1970-е годы. В схеме усвоения на основе фильтра Калмана статистика ошибок „первого приближения” на этапе анализа не задается априори, а прогнозируется на каждом цикле усвоения. Фильтр Калмана является мощным и очень перспективным методом усвоения, однако он предъявляет чрезмерные на сегодняшний день требования к вычислительным ресурсам. Эффективные аппроксимации, позволившие бы применить фильтр Калмана в оперативной практике, до сих пор не найдены, хотя во всем мире ведется интенсивный поиск в этом направлении.

Вычислительно более эффективным, хотя потенциально и менее мощным, чем фильтр Калмана, методом усвоения оказался предложенный относительно недавно метод четырехмерного вариационного усвоения (4D-var) с использованием сопряженных уравнений, введенных в метеорологическую практику Г. И. Марчуком. Главными достоинствами этого метода по сравнению с дискретными схемами усвоения являются более адекватное использование асинхронных наблюдений, а также возможность эффективного усвоения многочисленных новых косвенных наблюдений, главным образом спутниковых. Схема усвоения на основе 4D-var близка к внедрению в оперативную практику ЕЦСПП Предшественник 4D-var — трехмерная вариационная схема объективного анализа (3D-var) — является в настоящее время оперативной в ряде ведущих метеорологических центров мира.

Таким образом, на сегодняшний день основным методом четырехмерного усвоения метеорологических наблюдений по-прежнему является дискретное усвоение „прогноз—анализ”, будущее же, по всей видимости, за 4D-var и фильтром Калмана. Помимо этих схем, развиваются и другие, с меньшим потенциалом но значительно более простые в разработке и дешевые в эксплуатации. Здесь следует упомянуть схему „повторных вставок” и схему динамической релаксации, часто применяемую для усвоения квазинепрерывных во времени наблюдений (радары и пр.).

В последние годы в Гидрометцентре России разработана и реализована полусферная система четырехмерного усвоения данных о состоянии атмосферы, позволяющая усваивать все доступные данные наблюдений. Система включает в себя циклическо (через каждые 6 ч) выполнение следующей последовательности основных блоков:

— подготовка данных наблюдений с их предварительным контролем и пересчет ошибок полей первого приближения, т. е. определение на данном цикле усвоения степени доверия к экстраполированной с помощью модели информации для объективного анализа;

— квазитрехмерный многоэлементный объективный анализ. Схема анализа имеет боксовую структуру, что позволяет одновременно обрабатывать большое количество данных. В рамках этой схемы при необходимости формируются „супернаблюдения”, т. е. данные, полученные на основе нескольких близко рас-

положенных наблюдений и обладающие повышенной точностью. В рамках этой же схемы проводится более строгий статистический контроль;

— переход от переменных объективного анализа, заданных в узлах географической сетки на стандартных изобарических уровнях, к переменным гидродинамической модели, заданным в узлах гауссовой сетки на сигма-уровнях;

— нелинейная инициализация по нормальным модам, позволяющая согласовать в начальных данных высокочастотные колебания с целью подавления роста их амплитуд в начальный момент интегрирования модели;

— расчет по спектральной 15-уровневой модели атмосферы с разрешением T40, обеспечивающей гидродинамическую экстраполяцию на 6 ч информации с предыдущего срока усвоения с заполнением при этом районов, где нет данных наблюдений;

— переход от переменных гидродинамической модели, заданных в узлах гауссовой сетки на сигма-уровнях, к переменным объективного анализа, заданным в узлах географической сетки на стандартных изобарических уровнях;

— архивация и статистическая обработка результатов численных экспериментов.

В настоящее время усваиваются данные аэрологического зондирования, синоптических, морских, спутниковых и самолетных наблюдений.

По совокупности результатов в средних широтах северного полушария можно сказать, что система усвоения данных Гидрометцентра России сравнима по качеству с аналогичными системами усвоения ведущих метеорологических центров. В тропиках и в южном полушарии из-за гораздо меньшего объема данных наблюдений, получаемых Гидрометцентром России, точность объективного анализа хуже, чем у ведущих зарубежных метеорологических центров.

Интерпретация продукции гидродинамических моделей для среднесрочных прогнозов погоды

Вопросу среднесрочных прогнозов погоды ввиду его важности для жизнедеятельности современного общества уделяется большое внимание в метеорологических исследованиях.

После того как в конце 1960-х годов схемы гидродинамического краткосрочного (до 48 ч) прогноза полей давления в тропической сфере стали устойчиво достигать приемлемого уровня оправданности, началась разработка объективных методов интерпретации этих прогнозов в терминах элементов погоды (см. подраздел „Гидродинамический прогноз элементов погоды“). При этом предполагается наличие синхронного соответствия между характером крупномасштабных синоптических макропроцессов (расчитанных по гидродинамической схеме) и соответствующим ему в этот же момент времени характером погоды.

Применяемые методы интерпретации гидродинамических прогнозов можно разделить на две группы. К первой относятся способы синоптической интерпретации (Песков, Тихомирова 1980; Снитковский, 1983). В задачу прогнозистов в этом случае входит анализ результатов гидродинамической модели и подготовка на их основе прогностических карт положения фронтов областей осадков, полей приземной температуры воздуха, ветра и других элементов погоды. На основе последних составляется текст прогноза общего пользования и ответы на специализированные запросы. Одной из самых сложных задач, встающих при этом перед прогнозистом, является эффективное усвоение и использование большого объема поступающих данных. Объединяя на основе знаний и собственного профессионального опыта все находящуюся в его распоряжении информацию, синоптик должен сформулировать в сжатые оперативные сроки прогностические указания. Соответствующая технология взаимодействия ЭВМ и прогнозиста получила за рубежом наименование man-machine mix (МММ).

Вторая группа методов интерпретации численных прогнозов включает в себя объективные численные методы. Работы в данном направлении интенсивно велись как за рубежом (США, Великобритания, ФРГ, Италия и др.), так и в СССР.

За последние годы методы объективной интерпретации продукции гидродинамических моделей атмосферы (ГДМА) для среднесрочных прогнозов элементов погоды получили дальнейшее интенсивное и успешное развитие и в нашей стране, и за рубежом.

Вслед за появлением мощных компьютеров ($10 \cdot 10$ флоп) началась разработка современных ГДМА высокого пространственного разрешения, содержащих достаточный уровень точности параметризации процессов подсеточного масштаба. Такие модели базируются, как правило, на системах непрерывного усвоения глобальных данных метеорологических наблюдений. Интервал успешного их интегрирования (по анализу оправдываемости прогнозируемых полей циркуляции) можно оценить в 6—7 дней, например для северного полушария в зимний период. Несмотря на это, прогностические значения элементов погоды у поверхности земли, полученные в ходе численного интегрирования моделей — „модельный” прогноз погоды, — и до сих пор обладают недостаточной оправдываемостью с точки зрения использования в оперативной практике. Это чаще всего связано с несовершенством уравнений, решаемых на определенном шаге по времени, относительно искомых элементов погоды для извлечения их из полей основных неизвестных, подвергающихся интегрированию по времени в системе уравнений большой модели.

Однако успешность расчета элементов погоды (РЭП), как уже отмечалось, увеличивается в случае построения уравнений для выхода из модели на основе последовательной статистики.

Большое распространение в современных методах интерпретации находит математическая статистика — регрессионный анализ (часто в совокупности с дискриминантным) — задача наилучшего представления одной величины (предиктанта) посредством вектора других величин (предикторов); при этом определяется и количественная мера тесноты связи между предикторами и предиктантом. При таком подходе можно осуществить расчет синхронных (статистических) связей между прогностическими полями, полученными по гидродинамической схеме (основными предикторами — левые части переопределенной системы уравнений множественной регрессии), и элементами погоды (предиктантами — правые части уравнений). Именно использование синхронных связей (применимых благодаря хорошей оправдываемости современных ГДМА) и может обусловить успех объективного прогноза элементов погоды.

Для успешной работы системы статистической интерпретации (статистический постпроцессинг) необходимо создать соответству-

ющую базу данных — накопить архив фактических значений прогнозируемых метеорологических величин в пунктах прогноза, также архивы полей циркуляции объективного анализа и прогностических полей за длительный период (до 3—7 лет).

В Гидрометцентре России к настоящему времени разработана современная перспективная методология численной статистической интерпретации результатов расчетов по гидродинамической модели атмосферы (методология предусматривает полностью адаптивный алгоритм — самообучающийся на географический район прогнозирования и текущий синоптический макропроцесс).

За последние годы в Гидрометцентре России созданы:

— методология построения численных статистических моделей для прогноза элементов погоды с использованием современных математических алгоритмов, применяемых в ведущих зарубежных метеоцентрах; разработаны метод центрального типирования синоптических макропроцессов, алгоритм динамического формирования выборок. Эти прогностические (статистические модели полностью адаптивны (реализован алгоритм „самообучения” на географический район прогнозирования, текущие синоптические макропроцессы и день года); их построение основано на последовательном применении дискриминантного анализа и пошаговых регрессионных алгоритмов с динамическим отбором предикторов на каждом этапе;

— алгоритм по усвоению, контролю и восстановлению данных метеорологических наблюдений (уровня II) для их сбора и архивации в среднесрочной проблемно-ориентированной базе данных (СПОБД-ПЭВМ), используемой при численной интерпретации;

— справочно-информационная база (SNOB, SNOBIK) для комплектации и распространения прогностической продукции пользователям.

В результате выполнения научных исследований осуществлено изучение климатического режима и пространственно-временной структуры основных метеорологических величин (температуры, осадков, облачности, ветра, влажности и т. д.), позволяю

щее корректно осуществить построение всех вышеуказанных численных алгоритмов.

Кратко остановимся на основных чертах адаптивного прогностического алгоритма.

Центральное типирование атмосферных макропроцессов. Статистическая модель строится (автоматически на ЭВМ) заново (выборки формируются динамически) для каждой даты и каждого пункта прогноза; при этом всегда рассматривается ограниченный географический район, ориентированный таким образом, чтобы пункт прогноза был расположен в его центре. В окончательном варианте, после серии численных экспериментов с различными пространственными размерами района, протяженность его выбрана равной примерно 2500 км. Выборки формируются с упорядочением по аналогичности к текущему макропроцессу, предсказанному по гидродинамической схеме.

Непрерывность прогностических полей по территории. Расчет элементов погоды исключает осложнения, связанные с несопряжением изолиний прогностических полей над различными географическими областями страны. Созданный единый архив метеорологических полей — предикторов и предиктантов — позволяет исключить априорное районирование и решать прогностические уравнения регрессии, удовлетворяя принципу пространственной непрерывности. Непрерывность понимается в том смысле, что двум пунктам, расположенным достаточно близко друг от друга, будут соответствовать матрицы предикторов, отличающиеся одна от другой минимальным значением коэффициента перекоса. При уменьшении расстояния между пунктами прогноза значение коэффициента перекоса между матрицами, соответствующими этим пунктам, будет также уменьшаться.

Сезонная классификация. Для формирования статистических обучающих выборок к рассмотрению привлекаются даты того сезона года, к которому принадлежит период прогноза. Интервал между датами можно выбирать равным около 90 дней. Более длинный интервал желателен в связи с увеличением за счет этого начального объема выборок. Это полезно и с физической точки зрения, так как встречаются синоптические ситуации,

когда атмосферные процессы, характерные для одного сезона обнаруживаются в смежном.

Оптимизация заблаговременности архивов, используемых для формирования обучающих выборок. Как известно, для построения обучающих выборок регрессионных моделей используются концепции MOS или PP. Для малой заблаговременности (24—36 ч) концепция MOS имеет несомненные преимущества так как обучение статистической модели на выборках, состоящих из гидродинамических прогнозов, позволяет учитывать систематические ошибки гидродинамической схемы. Однако опыт оперативного использования полей гидродинамических прогнозов показывает, что у ГДМА присутствуют, наряду с систематическими ошибками, ошибки случайного характера; кроме того сами систематические ошибки приводят в процессе интегрирования модели по времени при разных исходных ситуациях в дальнейшем к несистематическим ошибочным решениям. „Уход“ схемы несистематическим образом от развивающегося в действительности атмосферного процесса с заблаговременностью прогноза увеличивается. Таким образом, накапливая архивы гидродинамических прогнозов (например, на 5—7-е сутки), мы заведомо предопределяем обучение на неадекватных связях с несистематической неадекватностью. В этом случае, если мы составляем прогноз элементов погоды по спрогнозированному гидродинамической моделью полю, т. е. рассчитываем статистические связи между архивами гидродинамических прогнозов и предиктантом использование архива гидродинамических прогнозов для достаточно большой заблаговременности становится неэффективным. Таким образом, невыгодно использовать „некачественный“ архив. Под термином „некачественный“ понимается архив, содержащий прогностические поля метеорологических величин с существенно несистематическим характером несоответствия их фактическим полям. Выходом в этом случае является использование архивов объективных анализов или архивов прогнозов, но с меньшей заблаговременностью (MOS-1), так как при этом можно, с одной стороны, частично исключить систематический крен присутствующий в прогнозах большой заблаговременности, с

другой — уменьшить вклад несистематических ошибок, снижая заблаговременность архивов.

В настоящее время в Гидрометцентре России в рамках работ по Программе освоения ЭВМ CRAY внедрена оперативная схема прогноза температуры воздуха и осадков на 6 суток по дням для территории СНГ и Западной Европы. Эти оперативные прогнозы передаются ежедневно в оперативные отделы Гидрометцентра России и во все УГМС Росгидромета. В дальнейшем планируются развитие системы численной интерпретации для получения большего числа прогнозируемых величин (облачности, ветра и т. д.) и существенное повышение надежности и точности прогностической продукции за счет использования в основном продукции ГДМА Гидрометцентра России.

Долгосрочные прогнозы погоды

Синоптические методы

Создание отечественной школы методов долгосрочного прогнозирования погоды датируется 1915 г., когда в „Геофизическом сборнике” была опубликована статья Б. П. Мультановского „Влияние центров действия атмосферы на погоду Европейской России в теплое время года”. В этой работе впервые была выдвинута гипотеза о влиянии центров действия атмосферы на макропогоду рассматриваемого региона. В последующих исследованиях Б. П. Мультановским вводится понятие вторичных центров действия атмосферы, влияние которых на синоптические процессы очень велико. Школой Мультановского принято расчленять атмосферные процессы на естественные синоптические периоды (е.с.п.) и естественные синоптические сезоны (е.с.с.), а пространство северного полушария — на естественные синоптические районы (е.с.р.). С. Т. Пагава, последовательно развивавший это научное направление, обосновал принципы такого разбиения. В течение е.с.п. (средняя продолжительность которого 5—6 дней) на пространстве е.с.р. наблюдаются однородные синоптические ситуации. Естественный синоптический сезон в основном состо-

ит из аналогичных е.с.п. Отдельные е.с.п., значительно отличающиеся от остальных, являются предвестниками последующих е.с.с. По ним можно определять основные особенности макромасштабных атмосферных процессов будущих е.с.с. Было установлено (Пагава, 1966), что синоптические сезоны испытывают небольшие ежегодные смещения по времени в ту или другую сторону в зависимости от особенностей процессов каждого года, и поэтому продолжительность их бывает неодинакова в разные годы. Помимо понятия предвестников, в синоптический метод метеорологического долгосрочного прогнозирования вводится понятие реперных указаний. Наиболее ярким примером реперного процесса является перемещение по ультраполярной траектории усиливающегося антициклона в течение нескольких суток. Оказалось, что этот процесс очень информативен. В частности, если за 90 суток до ультраполярного вторжения синоптическая ситуация была обратной, то по истечении 90 суток вновь повторится ультраполярный процесс. Существует еще целый ряд правил, позволяющий предвидеть макромасштабные метеорологические процессы на 90 и 150 дней вперед.

Последователями школы Мультиановского (В. Г. Шипковым, Е. И. Борисовой, Л. Г. Борисовой) были обнаружены другие реперные указания (стационарные антициклоны, квазипериодические процессы, климатические репера).

Еще один „столп“ синоптического метода долгосрочного прогноза школы Мультиановского — использование принципа аналогичности. Суть этого принципа сжато формулируется следующим образом: если наблюдаются два аналогичных синоптических процесса, то можно ожидать, что они обусловлены аналогичными причинами, которые и в дальнейшем будут способствовать подобному развитию синоптических процессов.

Применение описанных выше основных приемов (их перечень, разумеется, значительно шире) позволил разработать и внедрить в практику методологию синоптического долгосрочного прогноза на е.с.с. в 1922 г., на месяц в 1933 г.

В послевоенные годы развитие метода было связано с научным анализом новых информативных предикторов в месяцах предшествующих прогностическому периоду. Исследования про

демонстрировали целесообразность использования в прогностических схемах данных о термическом состоянии океанов, циркуляционных условиях в тропосфере и стратосфере, температурном режиме нижней тропосферы.

В Гидрометцентре России в оперативном режиме составляются долгосрочные прогнозы на основе изложенной методологии.

Большой вклад в становление и развитие отечественных методов среднесрочных прогнозов (до 1980-х годов они назывались долгосрочными прогнозами малой заблаговременности) внес А. Л. Кац. В основу этих методов были положены типизация атмосферных процессов с использованием количественных показателей (индексов циркуляции) и прогностические свойства тенденций е.с.п. В последующем А. Л. Кацем были предложены методы синоптико-статистической интерпретации гидродинамических прогнозов. Это направление продолжил и развил П. П. Васильев (см. подраздел „Интерпретация продукции гидродинамических моделей для среднесрочных прогнозов погоды“).

Заметное усовершенствование методов среднесрочного прогнозирования, в основе которого лежит значительное повышение качества гидродинамических моделей общей циркуляции атмосферы, дало возможность группе исследователей (Д. А. Педь, В. П. Садоков, В. Ф. Козельцева, 1991) использовать тесную линейную связь между средней декадной и средней месячной температурой воздуха. В этой же прогностической схеме в качестве предикторов использованы и другие информативные метеорологические параметры (температура поверхности Северной Атлантики, индексы циркуляции, система Эль-Ниньо—Южное колебание и т. п.). С 1990 г. этот метод используется в оперативной практике Гидрометцентра России.

В Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте под руководством Г. Я. Вангенгейма в середине 1930-х годов был разработан, а в 1940-х годах внедрен в производственную деятельность метод долгосрочного прогноза фонового режима атмосферного давления, температуры и осадков. Значительное усовершенствование метода было выполнено А. А. Гирсом (1960). В основу этого направления положена типизация атмо-

сферных процессов северного полушария. Все многообразие циркуляционных механизмов удалось свести к трем основным типам и девяти подтипам. Развитие атмосферных процессов во времени состоит из ряда стадий, представленных типами атмосферной циркуляции северного полушария и комплексом характеристик атмосферы и гидросферы. Существуют стадии различной продолжительности (от нескольких суток до 30 лет). Все они взаимобусловлены и являются стадиями единого процесса. Анализ последовательности форм циркуляции в предшествующем периоде, знание ряда закономерностей текущей циркуляционной эпохи, фон стадий позволяют составлять долгосрочные прогнозы длительных тенденций (на год). Прогнозы составляются в декабре предшествующего года и выпускаются в январе в виде бюллетеня, содержащего прогностическую информацию на каждый месяц текущего года.

На пути к долгосрочному прогнозу погоды (динамико-стохастический подход)

Проблема долгосрочного прогноза погоды (ДПП) в силу ее потенциально огромной практической значимости всегда привлекала внимание отечественных метеорологов. В донаучный период ДПП в России, как и в других странах мира, основывались на разнообразных астрологических и тому подобных источниках. Наука о ДПП стала зарождаться в России с конца XIX — начала XX в. и довольно четко оформилась в трудах Б. П. Мультановского — знаменитого первооткрывателя (в Европе и Америке были свои первооткрыватели) атмосферных ритмов. Как ритмические Мультановский рассматривал время от времени происходящие резкие вторжения масс очень холодного воздуха из Арктики на европейскую часть России, так называемые ультраполярные антициклонические вторжения. На основе предположенных ритмов в масштабах месяца—сезона и развитого им учения о е.с.п. Мультановский разработал методику практических месячных и сезонных предсказаний погоды. Энтузиазм автора методики и его последователей был так велик, что в числе прогнозируемых с большой заблаговременностью элементов по

годы вошли даже такие редкие и опасные явления, как шторм, гололед и другие, которые и на сутки вперед в те времена предсказать было проблематично. Документальных свидетельств тех лет почти не осталось, но легенды, бытующие в кругах синоптиков, приписывают Мультиановскому ряд крупных успехов в его предсказаниях. Разработанный им синоптический метод ДПП без каких-либо идейных изменений, лишь дополненный использованием данных барической топографии, лежал в основе последующих разработок С. Т. Пагавы и других синоптиков-долгосрочников. Практически он используется в Гидрометцентре России до настоящего времени как основа оперативных ДПП.

Метеорологи, применявшие в своей работе статистические методы обработки данных метеорологических наблюдений, часто критиковали метод Мультиановского и даже отказывали ему в научности на том основании, что ритмы Мультиановского не обнаруживались при аккуратном спектральном анализе метеорологических рядов. Успехи же Мультиановского в практических предсказаниях объяснялись его развитой интуицией. Надо отметить, что существование такой интуиции у некоторых людей, даже не знакомых с основами метеорологии, не подлежит сомнению. Известны многочисленные примеры удачных прорицаний хода погоды на очень долгие сроки. Например, прорицатель Алимов многие годы выпускал долгосрочные прогнозы, по своей детальности, а зачастую и точности превосходившие официальные долгосрочные прогнозы. Разумеется, все такие прорицатели как-то пытались „научно” обосновать свои предсказания. В этом отношении Мультиановский, возможно, — всего лишь один из наиболее удачливых „прорицателей погоды”, а синоптический метод ДПП — свод канонов таких прорицаний.

Заметим, однако, что в подобных канонах, и не только в метеорологии, но и в других областях науки, где имеют дело с очень сложными объектами анализа, таких как медицина и т. п., могут содержаться и рациональные зерна. В методе Мультиановского — это само учение о ритмах. Согласно современным представлениям о динамике атмосферы, опирающимся на достижения математической теории нелинейных динамических систем со сложным, кажущимся случайным поведением, ритмы, т. е. периоды времени, когда атмосфера ведет себя почти периодически, повторяясь в своих состояниях, а затем переходит на время к ка-

кой-то другой периодичности и так до бесконечности, есть свойство, типичное для турбулентных движений жидкости. Атмосфера же, согласно современным представлениям, идущим от пионерских работ А. А. Фридмана, Н. Е. Кочина и И. А. Кибеля, может рассматриваться как жидкость, находящаяся в турбулентном движении.

Настоящим началом науки о ДПП следует считать предложение в работах 1939—1943 гг. Росби и его сотрудников, особенно Гаурвица и Старра, за рубежом и Е. Н. Блиновой в СССР использовать уравнение вихря скорости в его так называемом галеркинском представлении на сфере (спектральный метод) для моделирования динамики планетарных волн в поле давления в свободной атмосфере. В этих первых работах делались огромные упрощения, но практическая важность проблемы ДПП давила на исследователей, заставляя их необоснованно форсировать события. Отсюда попытки Блиновой разработать практический метод месячного ДПП.

Математический аппарат тех лет позволял исследовать решения уравнения вихря только ценой его линеаризации, что, как теперь известно, полностью исключает анализ долгопериодных колебаний планетарных волн в атмосфере. Но Блинова (1946) обнаружила одно частное решение самого нелинейного уравнения вихря, которое имеет место, если в начальном состоянии атмосферы присутствуют планетарные волны только одного и того же зонального волнового числа, зональный поток происходит по типу так называемого твердого вращения атмосферы.

Интересно, что это решение она нашла, исправляя ошибочный результат работы американца Крейга, а также будучи, по-видимому, под сильным воздействием работы Эртеля (1943), где это решение фактически уже было найдено в более широком, чем метеорологический, контексте.

Опираясь фактически только на найденное частное решение как на методическую основу, Блинова реализовала линейную схему баротропного прогноза геопотенциала на среднем уровне атмосферы на месяц вперед, которая считалась оперативной. Прогноз не был успешным, но схема широко рекламировалась как практический успех советской геофизической гидродинамики. Впрочем, спекулируя по поводу якобы достигнутых успехов в решении проблемы численного гидродинамического ДПП, на-

званной Г. И. Марчуком „проблемой века”, было предостаточно и в последующем.

Убедившись в бесперспективности линейного прогноза под влиянием прогремевших в 1960-е годы работ А. А. Андропова и его коллег по горьковской математической школе диссипативных нелинейных колебаний, Блинова пыталась искать более общие решения нелинейного уравнения вихря (метод выделения главных волн). В работе 1968 г. она нашла, что в нелинейном уравнении вихря (при отсутствии диссипации и внешних сил, т. е. в консервативном, не диссипативном случае) возникает колеблющееся решение, тогда как линеаризация этого уравнения приводит к неограниченно растущему, т. е. физически бессмысленному решению. Блинова истолковала это как признак автоколебаний планетарных волн (в духе школы Андропова). Хотя это было ошибочным толкованием новых математических терминов, Блинова работала в правильном направлении. Однако математический аппарат тех лет все еще был неадекватен сложной проблеме ДПП.

Эпохальными для проблемы ДПП были начавшиеся в 1970-е годы работы по изучению гидродинамической неустойчивости крупномасштабных атмосферных процессов, инициированные в основном нуждами бурно развивавшейся техники численного краткосрочного прогноза погоды на основе системы уравнений гидро- и термодинамики в квазигеострофическом приближении, а потом и на базе системы полных уравнений. Хотя большинство этих работ рассматривали неустойчивость анализируемых решений к малым возмущениям (линейная задача), для чего существовал развитый математический аппарат, пионерская работа Томпсона (1959) о неопределенности начального состояния как факторе, обуславливающем пределы успешного расчета будущих полей давления, положила начало более содержательному, нелинейному рассмотрению задачи.

В то время были успешно выполнены работы по физическому моделированию развития турбулентности в кольцевых вращающихся сосудах, наполненных подогреваемой с края жидкостью (имитация нагрева воздуха у экватора). Лоренц в замечательной серии работ (в том числе знаменитой работе 1963 г. о „странном аттракторе Лоренца”) дал объяснение результатов физического моделирования, явившееся базой для понимания природы и ха-

рактера долгопериодных колебаний в системе общей циркуляции атмосферы. В 1980-е годы нелинейные проблемы геофизической гидродинамики широко обсуждались также ведущими отечественными учеными А. С. Мониним, А. М. Обуховым и их сотрудниками и учениками.

К сожалению, проблема была слишком сложна (и сложно излагалась), чтобы сразу увлечь специалистов по практическим ДПП. Более привлекательной для них оставалась наглядная идея о решающей роли внешних воздействий в долгопериодной динамике атмосферы. Особенно увлекала отечественных метеорологов мысль, что океаны с их огромной теплоемкостью являются главным дирижером этой динамики. Г. И. Марчук (1974) облек эту идею в привлекательную форму так называемых сопряженных уравнений динамики атмосферы с внешними источниками. Однако надежды на появление успешного метода сезонных ДПП на базе этих уравнений не оправдались. Фактически даже не приступали к программной реализации метода ДПП на их основе, поскольку, несмотря на изощренную форму представления сопряженных уравнений, их использование означало лиnearизацию задачи ДПП.

Было ясно, что таким путем задачу не решить. Поэтому параллельно с большим коллективом, работающим над сопряженными уравнениями, в Гидрометцентре СССР в начале 1980-х годов были созданы две небольшие группы, одна из которых (руководитель И. В. Тросникова) должна была развивать популярную на Западе идею о всемерном усложнении физики и детализации модели полных уравнений гидротермодинамики атмосферы на базе мощных ЭВМ с целью постепенного увеличения предела полезных прогнозов сначала на средние сроки, а затем, по возможности, и на месяц. Источником увеличенной предсказуемости, думалось, будут меняющиеся в начальных данных внешние воздействия на атмосферу. В первую очередь считалось важным описать и учесть теплообмен атмосферы с океаном в рамках полной нелинейной модели. Вторая группа (руководитель Д. М. Сонечкин) начала развивать (в приложении к проблеме ДПП) идеи детерминированного хаоса — нового направления в математической теории динамических систем (работы математиков В. И. Арнольда (1978), Л. П. Шильникова (1981), Рюэля и Такенса (1981)), в котором наблюдение метеорологом Лоренцем его „стран-

ого аттрактора” оказалось крайне важным (отсюда название этого направления — динамико-стохастический подход к проблеме (ПП).

Первое из этих двух направлений (детализированные модели атмосферы) оказалось в первые годы слабо реализуемым в Гидрометцентре СССР из-за отсутствия надлежащих ЭВМ. Да и за рубежом, несмотря на многочисленные и дорогостоящие длительные интегрирования моделей, преодолеть примерно недельный предел предсказуемости, обусловленный неустойчивостью всех масштабов атмосферных движений, не удалось. „Сигнал” меняющихся внешних воздействий полностью искажается при длительных интегрированиях из-за неправильно описываемых нелинейных взаимодействий движений разного масштаба. Не пошла даже адаптация в этих интегрированиях идеи прослеживания эволюции во времени ансамбля начальных состояний атмосферы, выбираемого так, чтобы учесть возможные ошибки фактических начальных данных.

Первоначальной целью работ группы Сонечкина как раз было адаптировать применительно к моделям средней сложности, доступным для реализации в Гидрометцентре СССР, идею ансамблевого прогнозирования, впервые высказанную В. И. Татарским (1969) и затем Эпштейном (Epstein, 1969) в США. Это неожиданно привело к усовершенствованию объективного анализа метеорологических полей — необходимого предварительного условия численного интегрирования уравнений всякой прогностической модели. Уравнения Татарского—Эпштейна были использованы, чтобы оптимально согласовать априори имеющуюся информацию о текущем состоянии атмосферы (например, краткосрочный прогноз на этот момент времени) с вновь поступившими данными метеорологических наблюдений в этот момент и тем самым улучшить априорную оценку начального состояния при прогнозе. Получился нелинейный вариант фильтра Калмана, полученного в начале 1970-х годов в теории автоматического управления. Сейчас такое согласование, называемое вариационным, признано и широко используется за рубежом (с примерно 10-летним запозданием по сравнению с работой Д. М. Сонечкина 1993), выполненной в Гидрометцентре СССР, и, разумеется, без ссылок на нее).

Очень скоро стало ясно, что в таких хаотических нелинейных динамических системах, как реальная атмосфера, члены прогнозируемого ансамбля быстро разбегаются по всему фазовому пространству модели, что, собственно, и означает потерю предсказуемости при прогнозе погоды за счет сколь угодно малых ошибок начальных данных, даже если сама модель совершенна. Начальные же вариации внешних воздействий, впоследствии медленно меняющихся на интервале прогноза, оказались связанным очень сложным образом с вызываемыми ими вариациями в прогнозируемых состояниях атмосферы. Все эти эффекты были давно изучены в статистической физике (работы Н. С. Крылова Я. Г. Синая). В 1980-е годы они начали применяться при разработке методов поддержания управляемой термоядерной реакции (работы Г. М. Заславского и др. в СССР).

Это привело к осознанию необходимости качественного исследования долгопериодной динамики атмосферы на очень простых моделях (американцы говорят toy-models — игрушечных) сохраняющих лишь самые основные свойства реальных прогнозных моделей общей циркуляции атмосферы — их квадратичную нелинейность, влияние вращения Земли, почти адиабатичность процессов вне планетарного пограничного слоя). Засчет упрощений можно тщательно проследить в численных экспериментах все или почти все режимы движения (аттракторы) свойственные этим простым моделям. Пионером их введения метеорологии был Лоренц. Чарни и его ученики, Вийн-Нильсен и другие за рубежом, а в СССР М. Б. Галин применили эти модели для изучения смен режимов общей циркуляции атмосферы, частности блокирований, к сожалению, делая упор на элемент количественного сходства в решениях простых моделей с поведением реальной атмосферы. Это породило иллюзию у части метеорологов, что эти простые модели годятся для практических ДПП.

В работе Д. М. Сонечкина (1984) было проведено полное качественное исследование режимов движения в 14-компонентной модели течения жидкости во вращающемся канале, введенной Лоренцем еще в 1965 г. Было найдено, что большая редукция размерности аттрактора этой модели по сравнению с числом за висимых ее переменных обусловлена временной синхронизацией долгопериодных колебаний всех этих переменных. Применен асимптотического метода нелинейной механики к уравнениям

модели показало, что синхронизация объясняется резонансами коротостей Росби—Гаурвица движения модельных волн. Она обусловлена геометрией области, в которой задано течение, и наличием силы Кориолиса.

После этого было найдено (Власова и др., 1993; Сонечкин и др., 1993), что синхронизация есть свойство движений планетарных волн в реальной атмосфере. Масштаб синхронизации определяется как обратная величина малого параметра — индекса зональной циркуляции Блиновой. Он равен характерному времени бегания Земли воздушными частицами в западно-восточном переносе умеренных широт (20—30 дней), что совпадает с последней, наиболее точной оценкой теоретического предела предсказуемости изменений погоды ото дня ко дню, полученной Лоренцем (1983) на основе анализа оправдываемости прогнозов ЕЦСПП.

Только что упомянутая потеря предсказуемости может быть следствием разрушения несинхронизированных движений планетарных волн. Эти движения не наблюдаются в реальной атмосфере, вероятно, из-за своей большой неустойчивости. В этом смысле квазисинхронность есть такое же свойство внутренней организации недельных и более долгопериодных атмосферных движений, как квазигеострофичность есть свойство движений всех масштабов более нескольких часов. Но они неизбежно возникают в модельных решениях из-за ошибок в начальных данных. Это открывает путь для прогноза погоды за современный предел предсказуемости через принудительную синхронизацию движений волн, рассчитываемых в модели, т. е. как бы специальную инициализацию модели, подобно тому как инициализация гравитационных волн позволила исключить потерю предсказуемости в течение первых суток интегрирования модели полных уравнений.

С начала 1990-х годов первая версия так называемой квазисинхронной модели интегрируется на 40 дней вперед, выдавая среденные по последовательным пятидневкам поля поверхности 500 гПа внутропических широт северного полушария (Сонечкин и др., 1995). Эти поля субъективно интерпретируются в терминах хода температуры воздуха и осадков в течение предстоящего месяца для Москвы (Сонечкин, Самров, 1995).

Гидродинамические методы

История развития методов гидродинамических долгосрочных прогнозов погоды (ГДПП) в нашей стране делится на три периода. Скорее всего, не случайно на границы этих периодов приходится и появление новых поколений ЭВМ. Первой вычислительной машиной в ЦИПе была специализированная машина „Погода” (несколько сотен операций в секунду), которая эксплуатировалась до 1960 г. До начала 1970-х годов использовались машины серии „Минск” (20 тыс. операций в секунду). С 1972 г. основной машиной стала БЭСМ-6 (до миллиона операций в секунду), которую сменила машина CYBER-205. В 1980-е годы в эксплуатации находились машины класса ЕС-1045, ЕС-1066 (20—30 млн. операций в секунду), основным звеном в оперативной практике стала машина класса IBM-370 фирмы „Hitachi”. На рубеже 1980—1990-х годов вводится в строй ЭВМ семейства „Эльбрус” заявленной производительностью несколько сот миллионов операций в секунду. Для отечественной вычислительной техники это был последний рубеж. В начале 1990-х годов в распоряжении исследователей и прогнозистов появились персональные компьютеры со все увеличивающейся производительностью (за 5 лет их производительность выросла примерно на два порядка), а с середины 1990-х годов в Гидрометцентре России стал функционировать многопроцессорный вычислительный комплекс CRAY Y-MP8E „Эльбрус” был демонтирован.

Первый период охватывает примерно 35 лет: с 1943 г. до конца 1970-х годов. Его можно назвать классическим как по широте задач, так и по оптимизму основных действующих лиц. Главным идеологом данного периода была Е. Н. Блинова, исследовавшая в Гидрометцентре СССР вопросы планетарной динамики атмосферы и гидродинамического прогноза погоды. Началом работ по ГДПП принято датировать 1943 г., после опубликования ее статьи „Гидродинамическая теория волн давления, температурных волн и центров действия атмосферы”. Было использовано уравнение Фридриха для вихря скорости, уравнение баланса для функции тока и давления и, наконец, уравнение притока тепла. Исходные уравнения были линеаризованы относительно „основного состояния”, в качестве которого принимался зональный перенос в средней тропосфере. Решения искались в спек

гральной форме, что, по признанию Блиновой (1979), было вызвано „причинами экономии времени” в условиях отсутствия вычислительной техники. На основе изложенной теории были составлены первые ГДПП, сначала на несколько суток, а затем и на несколько десятков суток. Предсказывались высоты изобарических поверхностей 500 и 700 гПа.

Впоследствии усилия Блиновой и других исследователей были направлены на обобщения, уточнения и видоизменения первоначальной постановки проблемы ГДПП. Уже в 1947 г. С. А. Машкович предложил учет „горизонтальной бароклинности” (снос поля давления полем температуры), до 1949 г. Блинова обобщила решение введением свободной поверхности (добавив к функции тока потенциал скорости). В 1951 г. была реализована схема прогноза средней месячной температуры воздуха на уровне моря с заблаговременностью 40 суток, и с 1952 г. началось регулярное составление прогнозов по данной методике. В 1952—1953 гг. Е. М. Добрышманом была разработана схема прогноза средних месячных полей осадков, к которой в 1955 г. были добавлены прогнозы средних месячных полей вертикальных скоростей. Одновременно с этим С. Л. Белоусов предложил методику расчета месячных полей вертикальных токов и парциального давления. К середине 1970-х годов Блинова разработала метод выделения „главных волн”, позволяющий учесть нелинейные взаимодействия глобальных физических факторов, особенно тех, которые входят в краевые условия. Более или менее очевидная перспектива дальнейшего развития методов прогноза (переход к примитивным уравнениям для бароклинных сред со все более точной параметризацией подсеточных процессов) сдерживалась неизбежно растущими вычислительными затратами. Вполне возможно, что и решение некоторых методологических проблем (например, то же „выделение главных волн”) не было адекватным реальному поведению атмосферы. Отметим, что идеи Блиновой дали толчок разработкам методов ГДПП и анализа крупномасштабных элементов атмосферной циркуляции в ВЦ СО АН (Г. П. Курбаткин, 1973) и Институте физики атмосферы АН СССР.

Второй период охватывает примерно 10 лет: 1980—1989 гг. В это время в сфере гидродинамического моделирования большая часть внимания уделяется среднесрочным прогнозам и модели-

рованию климатических изменений. Этот период совпадает с бурным развитием мощных вычислительных машин класса CRAY и „Эльбрус”. Начинается активное сравнение моделей общей циркуляции атмосферы, разработанных в мировых метеорологических центрах в сериях длительных интегрирований (программа ВМО AMIP). В то же время деятельность по гидродинамическому прогнозированию на длительные сроки (в первую очередь на месяц и сезон) в нашей стране значительно сокращается. Энтузиазм сменяется скептицизмом, вызванным не в последнюю очередь неудачами опытных испытаний разработанных схем. Следует отметить, что некоторые отечественные синоптики стали критически относиться и к методологии краткосрочного гидродинамического прогноза, по крайней мере к той, которая практиковалась в нашей стране. В Гидрометцентре СССР разрабатываемые под руководством Машковича спектральные модели использовались для среднесрочного прогнозирования. В области ГДПП активно работала лишь группа Д. М. Сонечкина. Но эта деятельность носила несколько изолированный характер из-за несколько агрессивно внедряемых жаргонизмов теории динамических систем. Результатом явилась малокомпонентная модель атмосферной циркуляции, адаптированная для целей долгосрочного прогноза циркуляции среднего уровня. С февраля 1988 г. данная модель проходила оперативные испытания.

В это время в мировых метеорологических центрах в Европе (ЕЦСПП, Франция, Англия), США, Канаде и Японии ГДПП на сроки от 10 дней до сезона переживал необычайно бурное развитие. Прогнозирование проводилось как в экспериментальных, так и в квазиоперативном режимах. В качестве объектов долгосрочных прогнозов становятся такие элементы крупномасштабной циркуляции и климатической системы атмосфера—океан, как блокирующие ситуации, явления Эль-Ниньо и Южное колебание. Оценивается роль внутренней динамики атмосферы и внешнего форсинга в формировании низкочастотной изменчивости атмосферы. Строятся разнообразные механизмы долгопериодных регулярных структур. Все же основным в мировых тенденциях представляется формулирование к середине 1980-х годов проблемы ГДПП как проблемы „динамического прогнозирования с увеличенным сроком действия прогнозов” (программа deterministic extended range forecasting — DERF). Два обстоятельства вызвали

оживление в исследованиях возможностей такого „удлинения“: успех ЕЦСПП в среднесрочном прогнозе и появление теорий низкочастотной изменчивости. Не вдаваясь в детали происходившего в мировой теории и практике динамического долгосрочного прогнозирования, отметим некоторые важные элементы процесса.

Во-первых, используемые модели (по самой идеологии DERF) стали мало отличаться от оперативных среднесрочных. Например, в ЕЦСПП в 1986 г. проводились эксперименты по двухмесячному прогнозу по модели класса T106. Во-вторых, были уточнены роль и место линейных моделей. Наряду со способностью воспроизводить черты общей циркуляции атмосферы (и океана), они могли воспроизводить квазилинейный отклик атмосферы на внешний форсинг на временных масштабах порядка сезона. Как оказалось в последствии, линейные модели, или линеаризованные варианты больших моделей общей циркуляции атмосферы „касательные модели“), являются мощным средством анализа так называемых быстрорастущих мод циркуляции. Наконец, в-третьих, возникла тесная связь динамической методологии с синоптической и климатической теориями. Дело в том, что если на средних интервалах качество прогноза основных метеорологических величин и элементов погоды сильно зависит от начальных данных, то уже во второй прогностической декаде качество прогноза оказывается функцией самой прогностической переменной, сезона, интервала осреднения, региона, термобарического режима и пр. А если это так, то, имея, в частности, информацию о связи модельных процессов и реальных синоптических ситуаций в некотором осредненном смысле, можно предсказать качество динамического прогноза для тех регионов, где такая связь устойчива. Таким образом, возникает проблема „прогноза качества прогноза“, или априорное оценивание. Это приводит, в свою очередь, к необходимости исследовать способность моделей воспроизводить устойчивые режимы атмосферной циркуляции. Иногда эти усилия оцениваются довольно пессимистично. Например, специалисты по ГДПП в ЕЦСПП пришли к середине 1980-х годов к выводу, что предсказывать качество прогноза не менее трудно, чем саму реальную атмосферу.

Третий период охватывает последнее десятилетие XX в. Этот период можно назвать временем оживления. В стране появились

мощные персональные компьютеры и рабочие станции. В Гидрометцентре России стала функционировать суперЭВМ CRAY Y-MP8E. Примерно с середины 1990-х годов в Гидрометцентре России и ГГО начались активные испытания месячных прогнозов погоды на основе спектральных моделей атмосферы, построенных на примитивных уравнениях гидротермодинамики и учитывающих основные физические процессы подсеточного масштаба.

В ГГО в экспериментальном режиме эксплуатируется модель класса T30L14 как в глобальном, так и в полусферном варианте. Объективные анализы для северного полушария принимаются по сети связи из Гидрометцентра России, прогнозы даются на месяц с нулевой заблаговременностью. Методика прогнозирования основана на ансамблях начальных данных. Проводятся эксперименты с аналогичной моделью с горизонтальным разрешением до T42. Данная модель участвует в испытаниях по программам ВМЦ (AMIP, AMIP II) по численным экспериментам с интегрированием на длительные сроки (10—20 лет).

В Гидрометцентре России проводятся в данный период испытания схемы мультимодельного прогноза погоды сроком на месяц с нулевой заблаговременностью и осреднением по первым 10, 20 и 30 суткам. Объектами прогноза являются полусферные поля циркуляции (высоты изобарических поверхностей H_{500} , H_{850} , H_{1000}), поля температуры на высоте поверхности 850 гПа и у поверхности земли (T_{850} и T_s соответственно) и давление воздуха на уровне моря p_0 . При выдаче выходной прогностической продукции потребитель снабжается таблицей достоверности прогнозов построенной на основе некоторого набора экспертных оценок. Вычислительное ядро схемы составляют спектральные модели общей циркуляции атмосферы, имеющие разрешение T21 и T41, 15 sigma-уровней и достаточно полный набор параметризаций подсеточных физических процессов. Исходным материалом схемы являются результаты интегрирований модели T41L15 на 30 суток от пяти соседних начальных дат по так называемой LAF-методике. Оперативные испытания данной схемы были проведены в 1999—2000 гг.

Отметим, наконец, что в Гидрометцентре России проводились численные эксперименты с моделями низкого разрешения класса T21L15, а также с одноуровневыми моделями, имеющими квазибароклинный форсинг. Проведены исследования зарожде

ния, поддержания и разрушения крупномасштабных режимов атмосферной циркуляции в таких моделях, а также их сопоставление с режимами в реальной атмосфере.

Необходимо упомянуть вкратце несколько важнейших тенденций в развитии ГДПП в мировых метеорологических центрах за последнее десятилетие XX в.

В начале 1990-х годов были подведены итоги „удлиненного” прогноза по моделям общей циркуляции атмосферы на срок до 30 дней. Были обобщены систематические ошибки, присущие большинству моделей, на данном интервале заблаговременности. В общем и целом месячные прогнозы оценивались как неудовлетворительные.

Основные усилия в сфере ГДПП стали постепенно переноситься на масштабы сезонов. При этом ввиду перехода к интегрированию по ансамблю начальных состояний проблематика прогноза стала формулироваться в вероятностной форме, что привело к внедрению новых показателей качества прогноза.

Планирование и проведение численных экспериментов стали испытывать явное влияние „социального заказа” на долгосрочное прогнозирование не переменных модели, а „погодных явлений” типа региональных осадков, аномалий температуры подстилающей поверхности, зон экстремального ветра и так называемых импактов, т. е. тех метеорологических величин, которые непосредственно влияют на экономическую, социальную сферы деятельности человека (урожаи, уровень заболеваний, наводнения). В частности, в связи с этим возникла необходимость формализации такого понятия, как „явление”.

К середине 1990-х годов был завершен проект ВМО (PROVOST) по сравнению сезонных гидродинамических прогнозов, проведенному несколькими европейскими центрами. При этом прогнозы рассчитывались на 15-летний период (1979—1993) по данным реанализа ЕЦСПП.

В конце десятилетия большое внимание было уделено возможностям прогнозировать такие экстремальные явления, как, например, Эль-Ниньо в 1997—1998 гг., разрушительные последствия которого ощущались на протяжении 1998 г. по всему северному полушарию. На данном конкретном примере вполне очевидно, что долгосрочное прогнозирование исключительно гидродинамическими методами малопродуктивно. Требуется объ-

единение всех наличных методик — эмпирических, статистических и гидродинамических. При этом формулировка прогноза должна быть вероятностной, а сам прогноз должен проходить стадии априорных оценок с определением меры достоверности, как это делается, например, в схемах принятия решения с оптимизацией в условиях множества методик и моделей.

Специализированные гидрометеорологические прогнозы и специализированное гидрометеорологическое обслуживание

Гидрометеорологические прогнозы характеризуют будущее состояние атмосферы, поэтому требования к ним со стороны различных отраслей экономики весьма разнообразны.

В связи с этим в руководящих документах Гидрометслужбы прогнозы погоды всегда делились на прогнозы общего назначения, содержащие основные метеорологические величины и предназначенные для населения и широкого круга пользователей, и специализированные, содержащие информацию, необходимую лишь для конкретно обслуживаемой отрасли народного хозяйства. При этом для более эффективного оперативного обслуживания составлялись специальные соглашения и планы, в которых наряду с организационными мерами отражались содержание и объем гидрометеорологической информации.

Различные отрасли обладают разной степенью чувствительности к гидрометеорологическим факторам в зависимости от характера производственной деятельности и технологических процессов. В связи с тем что требования к прогностической информации некоторых отраслей невелики, их можно удовлетворить организационными мерами, без существенных финансовых затрат. В то же время имеются отрасли, требования которых настолько велики, что зачастую опережают существующие возможности прогнозирования и вызывают необходимость проведения дополнительных научных исследований и разработки специальных прогностических методов. Традиционно к ним относятся авиация, морские отрасли, водное хозяйство и сельское хозяйство. Промежуточное положение занимают железнодорожный и автомобильный транспорт, лесное хозяйство, топливно-энергетический комплекс.

Следует отметить, что после перехода страны к рыночной экономике введено понятие специализированного гидрометеорологического обеспечения (СГМО), под которым понимается обеспечение потребителя прогнозами и другой информацией по его заказу и за счет его средств.

Переход гидрометеорологического обеспечения на платную основу способствовал дальнейшему повышению качества обслуживания и извлечения максимальной пользы от предоставления гидрометеорологической информации. Длительный опыт бесплатного обслуживания на основании лишь одних генеральных соглашений с различными министерствами и ведомствами доказал его слабую эффективность. Несмотря на жесткий контроль за выполнением таких соглашений, гидрометеорологическая информация, включая специализированные прогнозы, часто игнорировалась хозяйственными руководителями, а в ряде случаев даже использовалась для оправдания невыполненных работ. С другой стороны, жесткие финансовые и кадровые ограничения не позволяли оперативным прогностическим организациям Гидрометслужбы расширять сферы обслуживания, и многие требования оставались без ответа или считались второстепенными. Взимание платы за СГМО дает возможность Росгидромету иметь внебюджетные поступления средств, позволяющих частично компенсировать постоянный недостаток бюджетного финансирования. Именно поэтому в системе Росгидромета СГМО осуществляется в основном коммерческими организациями, которые не имеют в качестве основной цели извлечение прибыли, а используют полученные средства для уставных целей, в том числе и для дальнейшего совершенствования и поддержки СГМО, включая развитие методик специализированных прогнозов.

Кроме повышения качества обслуживания, СГМО способствует улучшению согласованности между требованиями потребителей к прогнозам и существующими возможностями прогнозирования.

Осуществление метеорологического обеспечения авиации является наилучшим примером согласованности и взаимопонимания между метеорологами и потребителем. Причиной этого является общее стремление к обеспечению безопасности полетов.

Именно поэтому возникающие новые требования в авиации неизбежно приводят к разработке метеорологами новых прогно-

тических методик. При этом такая согласованность осуществляется не только на национальном, но и на международном уровне.

Основной целью морского метеорологического обслуживания также является обеспечение безопасности людей и судов в море. Первой международной конвенцией по охране человеческой жизни на море предусматривалось обеспечение всех судоходных линий и рыболовных зон информацией о погоде, включая прогнозы погоды, передаваемые циркулярно по радио.

Сельское хозяйство также занимает одно из первых мест по чувствительности к погодным условиям, хотя процесс реагирования на них, в отличие от авиации и морского флота, здесь более растянут во времени. В значительной степени сохранность посевов зависит и от гидрологических прогнозов (половодья, внезапных паводков и др.).

После перехода на СГМО появился дополнительный стимул разработки специализированных прогнозов — экономический, что, несомненно, приведет в конечном счете к расширению спектра методик прогноза и их адаптации к конкретному потребителю.

Авиационные прогнозы

Авиация является самым требовательным потребителем метеорологической информации. Развитие авиационной техники сопровождается непрерывным изменением (и в конечном счете повышением) требований к метеорологическому обеспечению авиации. Несовершенство наблюдательных средств, ошибки прогноза оплачиваются дорогой ценой.

Метеорологическое обеспечение гражданской авиации, осуществляемое Гидрометцентром России, включает задачи обеспечения потребителя авиационными прогнозами, оперативной метеорологической информацией, климатической информацией. Здесь разрабатываются методы прогноза условий полета воздушных судов (ВС) по маршруту, их взлета и посадки. Результаты разработок суммируются в издаваемых в Гидрометцентре России руководствах и методических пособиях. Также проводится оперативная работа.

Прогноз условий полета по маршрутам. Полеты современной гражданской авиации выполняются преимущественно в верхней половине тропосферы и нижней стратосфере. В связи с этим авиационные прогнозы для полетов по маршрутам включают прогноз ветра и температуры на уровнях 300, 250, 200 гПа, а также составление прогностических карт так называемых особых явлений. На этих картах указывается положение струйных течений и скорость максимального ветра, положение зон активной конвекции, зон умеренной и сильной турбулентности, зон слоистой облачности и обледенения, фронтальных разделов у земли, а также высота тропопаузы. Прогноз каждого из элементов карты особых явлений представляет собой самостоятельную и сложную задачу.

Вся перечисленная прогностическая продукция, в прошлом получавшаяся синоптическими методами, все в большей степени базируется на выходных данных численных прогностических моделей и рассчитывается на ЭВМ. Работы по созданию компьютерных („автоматизированных“) методов прогноза особых явлений начаты в 1960-е годы и продолжаются сейчас. В настоящее время такие методы разработаны практически для всех элементов карты особых явлений, выпускаемой для обеспечения полетов авиации в верхней тропосфере и нижней стратосфере. Методы основаны либо на результатах статистической обработки больших объемов специальных наблюдений или других эмпирических данных, либо на использовании известных закономерностей динамики атмосферы.

Охарактеризуем вкратце отдельные методы в исторической последовательности их разработки.

Прогноз турбулентности в ясном небе. Первый вариант метода, разработанный в 1970-е годы Г. С. Булдовским, С. А. Бортниковым и М. В. Рубинштейном, и значительно более совершенный позднейший вариант, развитый Т. В. Лешкевич под руководством А. А. Васильева, основаны на обработке больших выборок рапортов экипажей самолетов гражданской авиации о наличии турбулентных зон на маршруте полета. Метод Т. В. Лешкевич превосходит по своей детальности и физической содержательности аналогичные методы, применяемые за рубежом, и учитывает природную повторяемость турбулентности над

различными географическими районами и синоптические условия ее развития.

Прогноз максимального ветра и струйных течений. Метод, разработанный А. Р. Ивановой под руководством Н. П. Шакиной, основан на построении непрерывных профилей скорости ветра по модельным данным на изобарических поверхностях. Он полностью соответствует мировому уровню.

Прогноз зон активной конвекции. Метод, разработанный Е. Н. Скриптуновой и Н. П. Шакиной, позволяет выделить зоны развития ливней, гроз, града и шквалов и рассчитать высоты верхних границ конвективных облаков по прогностическим полям геопотенциала, температуры и влажности. В основу алгоритма положен известный „метод частицы”, используемый для этих целей во всех мировых прогностических центрах. Способы расчета и представления результатов соответствуют мировым стандартам.

Прогноз высоты тропопаузы основан на новом принципе, вытекающем из исследований динамики фронтальных зон. Разработанный метод использует в качестве исходных данных прогностические поля геопотенциала, температуры и ветра. По точности он превосходит аналогичные методы, используемые в других прогностических центрах мира.

Прогноз зон вероятного обледенения воздушных судов для обеспечения полетов по маршруту. Метод, предложенный К. Г. Абрамович и И. А. Горлач, позволяет выделять слои, в которых содержится переохлажденная влага, внутри облачных слоев, выделяемых по прогностическим данным о геопотенциале, температуре и влажности. Метод соответствует мировому уровню.

Одной из последних разработок Гидрометцентра России является не имеющий аналогов *метод объективного выделения фронтальных зон* по результатам объективного анализа или численного прогноза геопотенциала, ветра, температуры и влажности (Н. П. Шакина, Е. Н. Скриптунова, А. Р. Иванова, Г. Ю. Калугина, 1998). Метод представляет собой результат объективизации опыта синоптиков Гидрометцентра России по фронтологическому анализу карт погоды и включает в качестве основного этапа

детальную (24 класса) объективную классификацию ситуаций в поле приземного давления.

Кроме карты особых явлений для полетов в верхней тропосфере и в нижней стратосфере, при оперативном обеспечении авиации строится также прогностическая карта особых явлений для обеспечения полетов на малых высотах. Переход к ее компьютерному построению является наиболее актуальной задачей Гидрометцентра России в настоящее время.

Прогноз условий взлета и посадки воздушных судов. Методы прогноза метеорологических условий взлета и посадки воздушных судов являются в большинстве своем локальными, статистическими и разрабатываются на материале наблюдений в конкретных аэропортах. Тенденция к созданию методов прогноза, полностью реализованных на ЭВМ, наметилась в 1970-е годы. Так, *метод прогноза высоты нижней границы облаков* для Московского аэроузла был разработан Н. Н. Гусевой под руководством К. Г. Абрамович и в соавторстве с М. В. Рубинштейном. Позже аналогичный метод был развит Н. Н. Гусевой для Верхне-Волжского управления. И. А. Горлач разработала *метод прогноза обледенения* для аэропорта Внуково с использованием мезомасштабной модели.

Задача *о диагностике и прогнозе сдвига ветра* в нижнем слое изучалась В. Г. Глазуновым (1988); продвижение в этой области тормозится отсутствием необходимых измерительных средств. Отметим, что в зарубежных аэропортах, оборудованных современной наблюдательной техникой, зоны сдвига ветра непосредственно обнаруживаются наблюдениями.

В целом прогнозирование условий взлета и посадки и, в частности, его методические основы не соответствуют мировым стандартам, главным образом потому, что в аэропортах отсутствуют современные средства измерения, в том числе дистанционные (доплеровские радары, профилемеры, автоматизированные системы датчиков).

В оперативной практике авиационных прогнозов в последнее время отмечается быстрый рост компьютерного оснащения, появление автоматизированных методик, переход к безбумажным технологиям, что в общем уменьшает отставание от уровня передовых стран. Однако резкая нехватка измерительной техники, деградация наблюдательной сети сильнейшим образом тормозят

не только совершенствование оперативной практики, но и разработку прогностических методик, в особенности для условий взлета и посадки воздушных судов.

Гидрологические прогнозы

Первые гидрологические прогнозы в России были составлены более 100 лет назад — прогнозы уровней р. Волги для обеспечения судоходства, но соответствующая служба была создана после катастрофического наводнения 1908 г. и получила развитие в 1920—1930-е годы в связи с развернувшимся гидротехническим строительством. Научное обоснование и разработка методов прогнозов, руководство оперативной работой местных подразделений службы осуществлял Государственный гидрологический институт (ГГИ), а в годы Великой Отечественной войны и в последующий период — ЦИП (Гидрометцентр СССР и России). Основная особенность предложенного основателями русской школы гидрологических прогнозов Б. А. Аполловым, М. А. Великановым, Л. К. Давыдовым, М. И. Львовичем и другими направления — генетический анализ гидрологических процессов и явлений с помощью методов водного и теплового баланса, гидрофизических исследований и географического обобщения, позволивший создать общие методы, применимые к прогнозам для огромного числа рек страны.

Хотя организационное оформление службы гидрологических прогнозов в России произошло в начале 1920-х годов, наиболее существенные теоретические и экспериментальные исследования процессов формирования речного стока были выполнены в 1940—1950-х годах, когда были разработаны научные основы методов краткосрочных прогнозов гидрографа, а также долгосрочных прогнозов весеннего стока. В это же время на базе создания стоковых станций проводились экспериментальные исследования частных процессов формирования речного стока (инфильтрация влаги в почву, склоновое стекание).

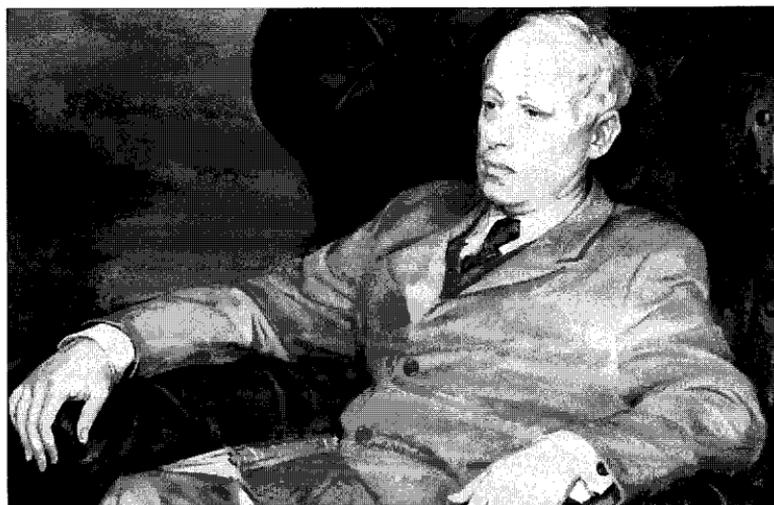
Краткосрочные прогнозы паводочного стока. Значительную роль в развитии этого направления сыграли работы М. А. Великанова, который путем упрощения уравнений мелкой воды получил выражение в виде интеграла свертки, связывающее водопоступление со стоком в нижележащем створе реки. Продолжением



Илья Афанасьевич Кибель — основоположник отечественной школы гидродинамических краткосрочных прогнозов погоды.



Виктор Антонович Бугаев — инициатор создания Всемирной службы погоды в рамках ВМО, внедрения в практику прогнозов погоды численных методов и спутниковой информации.

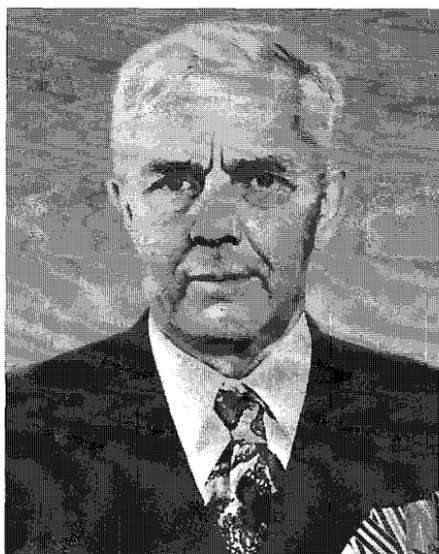


Михаил Иванович Будико — крупный ученый в области теплового баланса Земли, обосновал необходимость исследований антропогенных воздействий на климатическую систему в глобальных масштабах как межгосударственную задачу.

Художник М. Девятов. Фото А. В. Цветкова.



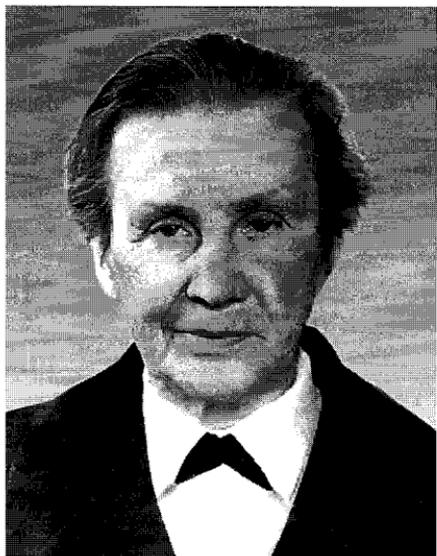
Владислав Яковлевич Никандров — основоположник одного из наиболее сложных направлений физики атмосферы—активных воздействий на облака и туманы.



Юрий Дмитриевич Янишевский — создатель комплекса актинометрических приборов для сети метеорологических станций. Приборы, созданные под руководством Ю. Д. Янишевского, до сих пор используются в Гидрометслужбе.

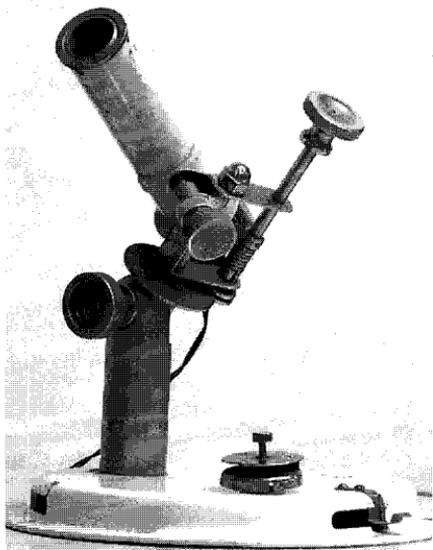


Пиранометры Савинова—Янишевского.
а) пиранометр для сети актинометрических станций, разработан в ГГО Ю. Д. Янишевским и И. Ф. Скачковой в 1953 г.;
б) прецизионный пиранометр с исключением азимутального эффекта, разработан Ю. Д. Янишевским в 1963 г.
Фото А. В. Цветкова.

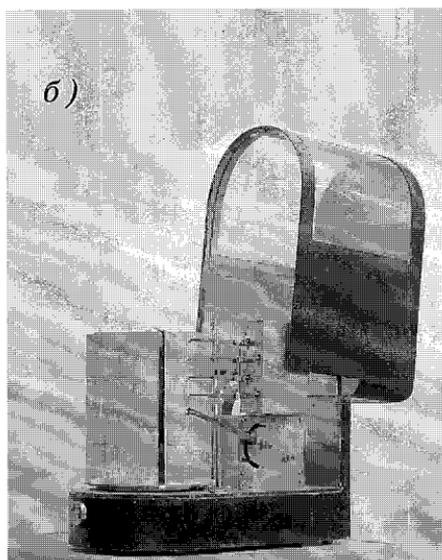
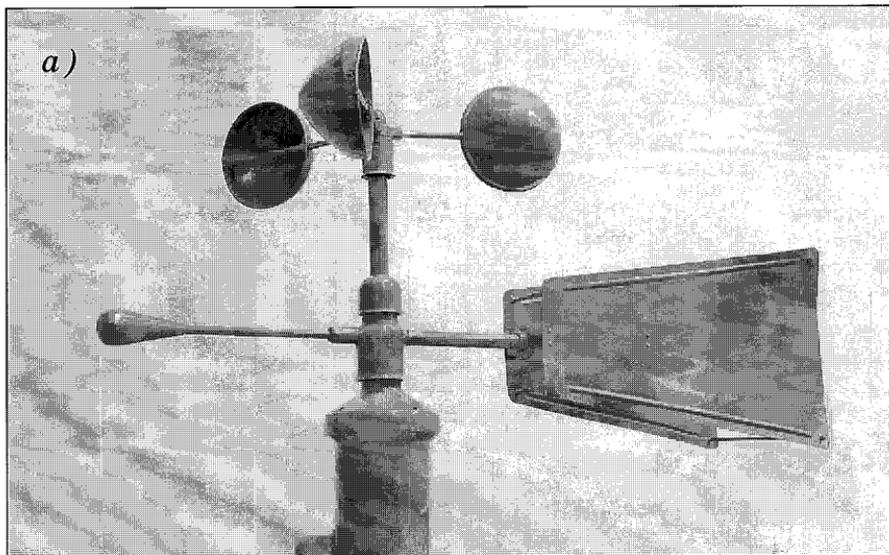


Галисия Васильевна Покровская — известный климатолог, внесла весомый вклад в развитие исследований по климатографии емного шара. Ею предложен и реализован инсолято-климатологический метод долгосрочных прогнозов погоды с использованием гелиогеофизических связей.

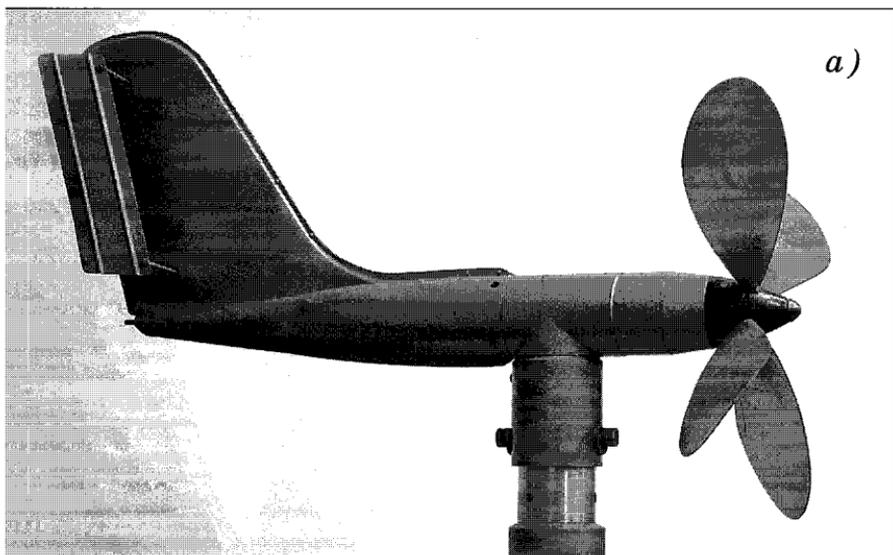
Ида Артуровна Гольцберг — известный агрометеоролог, создатель целой серии справочных пособий по оценке агроклиматических ресурсов. Основоположник нового научного направления в климатологии — оценка роли микроклимата для различных практических приложений.



Актинометр термоэлектрический Ю. Д. Янишевского, разработан в ГГО в 1952 г. Ю. Д. Янишевским и И. Ф. Скачко-вой. Фото А. В. Цветкова.



Электромеханический самописец ветра М-12
Разработан в ГГО (1954 г.), руководитель
разработки — Н. Г. Протопопов. а) датчи
скорости и направления ветра, б) регистратор
Фото А. В. Цветкова.



б)



Сетевой анеморумбометр М-63. Блок датчиков скорости и направления ветра. Совместная работа ГГО, НИИ ГМП и Ленинградского завода «Гидрометприбор» в 1958—1960 гг. (Н. Г. Прокопцов, Д. Я. Суражский и А. Ф. Застенкер). а) датчик скорости и направления ветра, б) пульт анеморумбометра.
 Фото А. В. Цветкова.



Михаил Исаакович Юдин — выдающийся ученый, один из основателей отечественной школы динамической метеорологии. Внес крупный вклад в развитие теории атмосферной турбулентности, численных методов прогноза погоды, авиационной и сельскохозяйственной метеорологии, статистических методов анализа и прогноза метеорологических полей и долгосрочных метеорологических прогнозов.



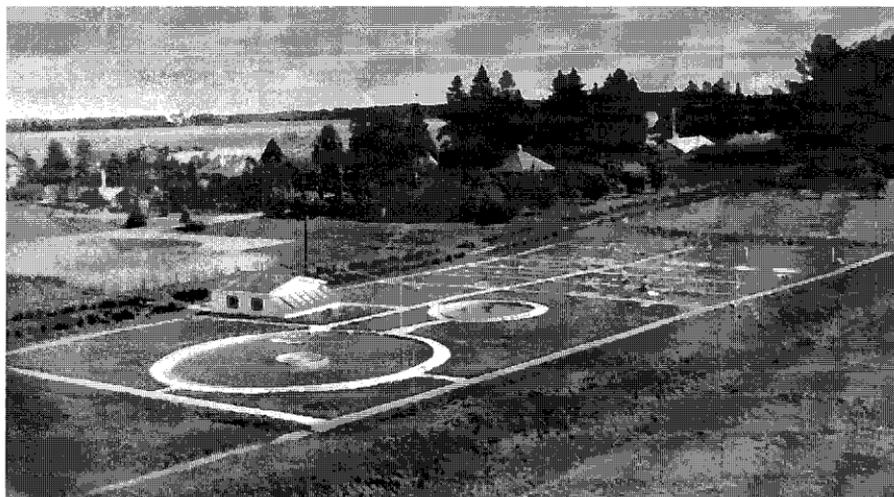
Валериян Андреевич Урываев — директор Государственного гидрологического института с 1942 по 1968 г.



Олег Алексеевич Дроздов — выдающийся климатолог и географ, основоположник отечественной школы методов климатической обработки метеорологических наблюдений. Широко известен своими работами по теории интерполяции и рационализации сети, влагообороту в атмосфере, засухам и динамике увлажнения на территории СССР, исследованиями по изменению климата и в области горной климатологии.



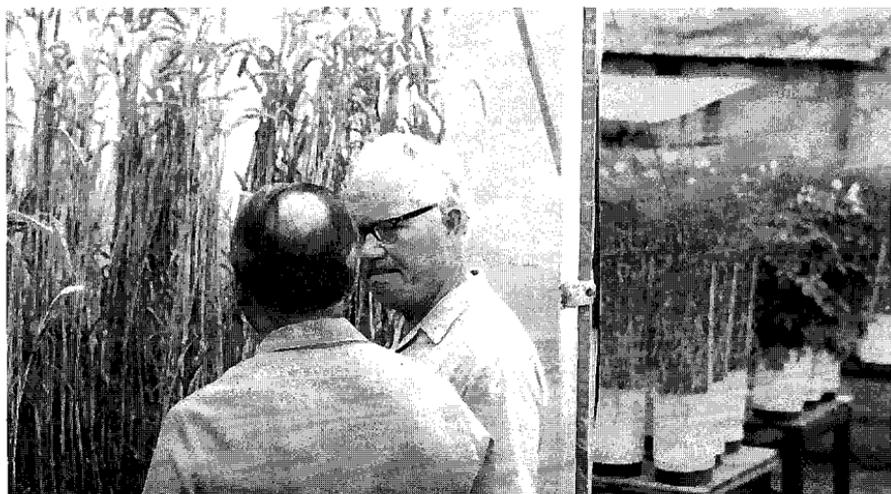
Ученый совет Государственного гидрологического института. 1979 г.
Слева направо, первый ряд: К. П. Воскресенский, В. В. Куприянов, В. А. Румянцев, А. А. Соколов (председатель совета, директор ГГИ), И. А. Шикломанов, С. М. Новиков, С. И. Харченко; *второй ряд:* О. В. Попов, В. А. Знаменский, И. В. Попов, Б. М. Доброумов, Г. П. Левченко, Ю. Б. Виноградов, Б. Ф. Сниценко, А. В. Рождественский, Г. С. Клейн, В. С. Голубев, В. В. Гончаров.



Водно-испарительная площадка Валдайского филиала Государственного гидрологического института.



Изучение русловых процессов на модели в русловой лаборатории Главной экспериментальной базы Государственного гидрологического института.



Заведующий отделом сельскохозяйственной метеорологии Института экспериментальной метеорологии проф. А. И. Коровин (*справа*) и проф. А. Р. Константинов на экспериментальной агрометеорологической площадке. Обнинск, 1968 г.



Заведующий отделом агрометеорологических прогнозов Центрального института прогнозов проф. Ю. И. Чирков *в центре*) А. В. Процеров (*слева*) и Е. С. Уланова (*справа*) за подготовкой оперативной агрометеорологической информации.



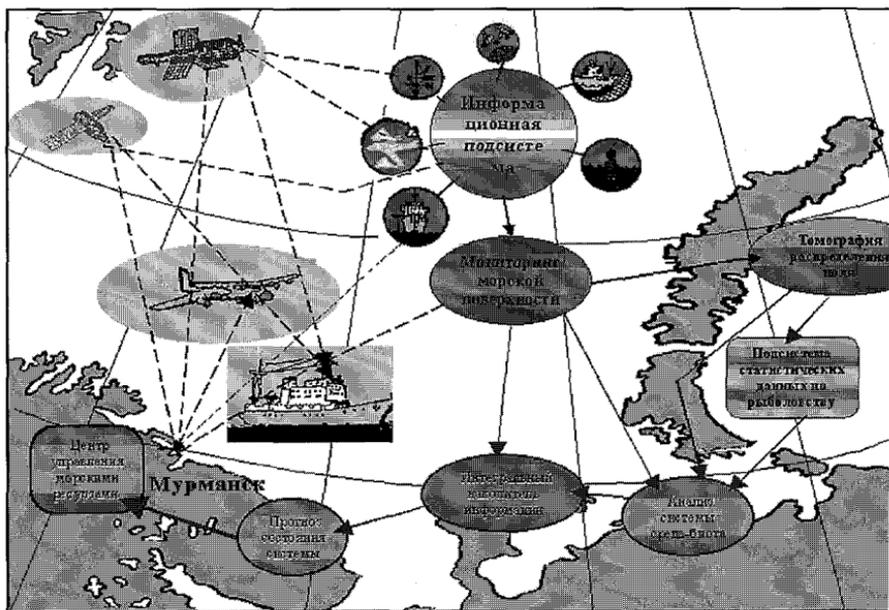
Участники семинара по гидрометеорологическому обеспечению сельского хозяйства Нечерноземной зоны России.
Москва, ФНЦ 1990 г.



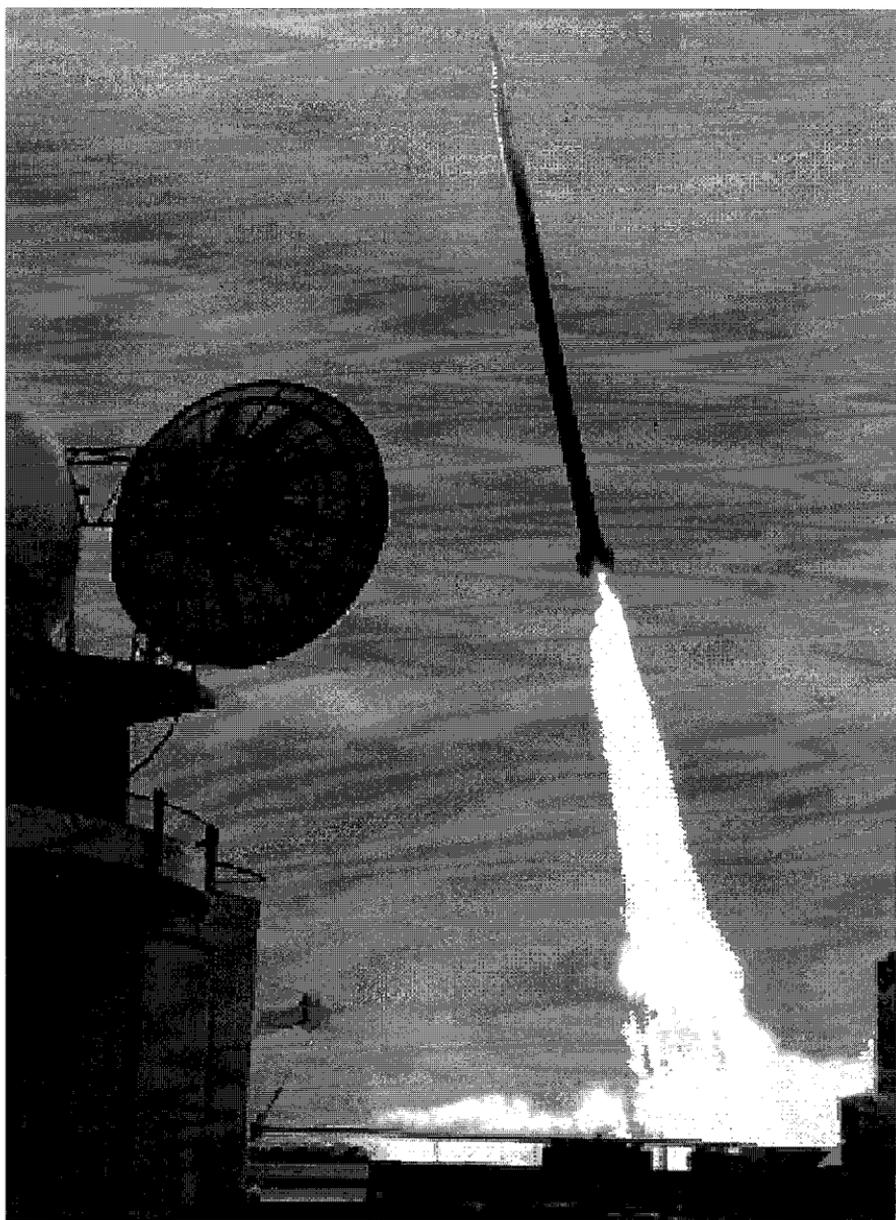
Дрейфующий буй, предназначенный для изучения подповерхностных течений.



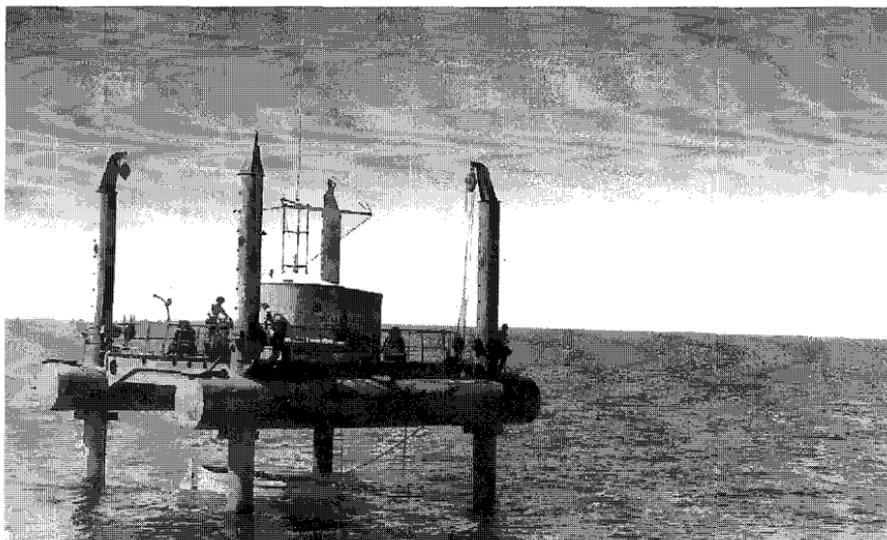
Научно-исследовательское судно „Академик Рыкачев”.



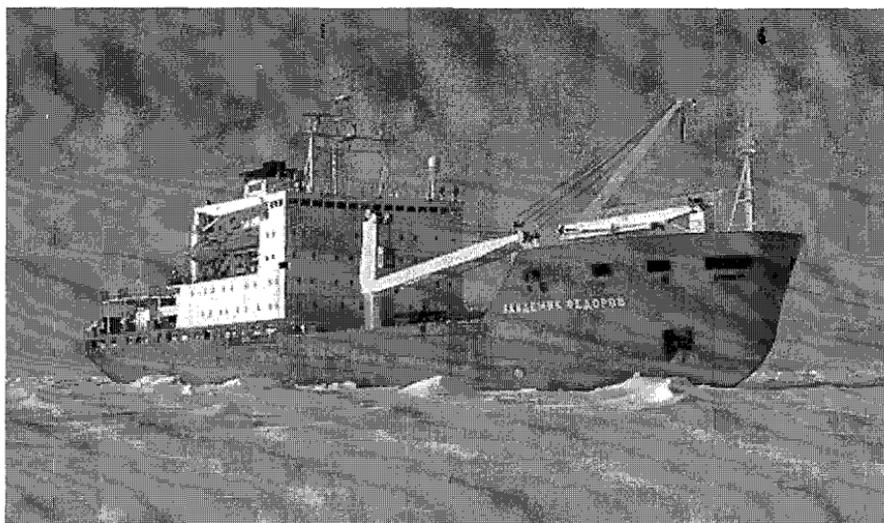
Интерактивные системы обработки информации, полученной с различных наблюдательных платформ.



Пуск метеорологической ракеты с борта НИС „Академик Ширшов”.



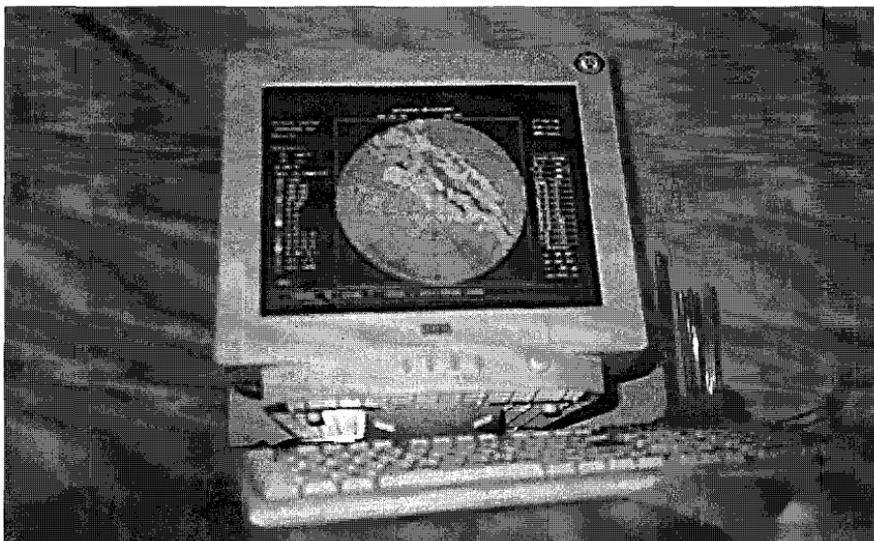
Свайное основание, установленное на Каспии для изучения характеристик моря.



Научно-экспедиционное судно „Академик Федоров“.



адиолокационная станция МРЛ-5 для проведения наблюдений за облачными процессами.



Радиоэхо облаков и осадков фронта окклюзии. МРЛ-5, масштаб развертки 200 км. ИКО



Ракетный комплекс „Кристалл” для проведения активных воздействий на облака.

этих работ были исследования Г. П. Калинина и П. И. Милюкова, которыми было получено более общее выражение в линейном варианте. Полученные ими соотношения, описывающие процесс формирования паводочных волн на незарегулированных участках рек, явились важной методической базой краткосрочных прогнозов расходов и уровней воды в пределах крупных речных систем.

Появление ЭВМ позволило разработать методы расчетов и прогнозирования водного режима рек, находящихся как в естественном, так и в зарегулированном состоянии, путем численного решения уравнений мелкой воды (в одномерном варианте уравнения Сен-Венана). Основная проблема при этом заключается в определении численных значений коэффициентов уравнений (морфометрических и гидравлических характеристик русел). Исследования, выполненные в 1970—1980-е годы, позволили разработать и реализовать способы их определения, основанные на решении некорректных задач (В. И. Корень, Л. С. Кучмент, 1973; Кучмент, 1967).

В это же время начаты работы по созданию математических моделей формирования речного стока в пределах бассейна. В этих моделях с той или иной степенью детальности описываются основные процессы на поверхности бассейна и в активном слое почвы, в результате реализации которых выпавшая на поверхность бассейна влага трансформируется в речной сток.

Одной из первых реализованных моделей такого типа была модель, использующаяся для краткосрочного прогноза весеннего притока в волжские водохранилища, в которой стокообразующие факторы описывались с помощью относительно простых эмпирических соотношений.

Одновременно с этим разрабатывались более сложные модели:

— двумерная модель формирования дождевого паводка, математическим содержанием которой является система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих влагоперенос в пористой среде и процессы стекания влаги по склонам и в русле. Несмотря на хорошую физическую обеспеченность этой модели, реализация ее в оперативной практике за-

труднена потребностями в весьма детальной информации об особенностях поверхности и характеристиках почв бассейна;

— значительно более ориентированной на использование в оперативной практике является нульмерная (так называемая концептуальная) модель формирования талодождевого стока, которая, будучи соединенной с линейной трансформационной моделью, нашла применение при прогнозе расходов и уровней в пределах речных систем (Северной Двины, Оки, Вятки, Днепра). В модели учтены и описаны процессы формирования стока в пределах бассейна средних размеров в течение всего года (Корень, Бельчиков, 1979; Корень, 1991). Модель представляется весьма перспективной для широкого использования в оперативной прогностической практике (естественно, при свободном доступе к архивной и оперативной информации и наличии достаточно подготовленного персонала);

— в модели формирования стока в горном бассейне учтено своеобразие процесса накопления и стаивания снежного покрова в горах, а также особенности стекания воды при значительных уклонах поверхности и наличии рыхлого, хорошо проницаемого верхнего слоя почвы. Разработанная с учетом сказанного параметрическая модель использовалась при краткосрочном и долгосрочном прогнозировании гидрографа.

Следует отметить, что все вышеописанные модели неоднократно представлялись на международных симпозиумах, некоторые из них успешно участвовали в международных сравнениях гидрологических моделей.

В последние годы модели формирования стока в пределах равнинных и горных бассейнов использовались для решения экологической задачи-оценки катастрофического стока в случае выпадения экстремальных осадков. В настоящее время модели формирования талодождевого стока используется при описании гидрологического цикла в атмосферной модели.

Долгосрочные прогнозы стока. Наиболее важными для практики и физически обоснованными являются долгосрочные прогнозы стока рек и притока в водохранилища в период формирования весеннего половодья. Базовые исследования в этом направлении проведены В. Д. Комаровым (1959) и Е. Г. Поповым (1963). Значительный вклад в разработку методов долгосрочного

прогноза притока в волжские водохранилища внесла Е. С. Змиева (1964).

Методы долгосрочного прогнозирования представляют собой линейные или нелинейные физико-статистические зависимости бьема весеннего стока от определяющих факторов, вытекающих из уравнения водного баланса за период половодья. Точность прогнозов в значительной степени зависит от точности определения запасов влаги в снежном покрове и характеристик одопоглотительной способности почв бассейна, определяющих отери стока.

Следует отметить, что физические основы этих процессов за последние десятилетия существенно не изменились. Основные исследования были направлены на совершенствование методов асчета показателей потерь стока, а также на реализацию территориально общих методов прогнозов и разработку программного комплекса, позволяющего использовать прогностические методики и осуществлять выпуск прогнозов для большого числа водосборов. В разработанном комплексе предусмотрена подготовка сходных данных к прогнозу с использованием статистического метода оптимального осреднения по площади.

В последнее время проводятся работы по расчету характеристик водопоглотительной способности почв бассейна с помощью одели формирования речного стока.

Краткосрочные прогнозы ледовых явлений. Создание системы методов прогнозов ледовых явлений было начато в 1940—1941 гг. под руководством Г. Р. Брегмана и уже на первых орах обеспечило успешное обслуживание боевых операций Советской Армии (Брегман, 1948). В. Д. Комаровым (1947), Л. Г. Шуляковским (1947), В. В. Пиотровичем были разработаны физико-статистические зависимости для краткосрочных прогнозов сроков замерзания, вскрытия рек и толщины льда на них, во многих случаях успешно применяемые до сих пор.

В 1960—1970-х годах были разработаны общие методы расчета и краткосрочного прогноза образования, нарастания и разрушения ледяного покрова, применимые, в частности, к водным объектам, по которым нет рядов наблюдений. Основой послужили фундаментальные исследования В. В. Пиотровича (1958, 1968) и предложенные Л. Г. Шуляковским (1951) и С. Н. Булатовым (1970) одели этих процессов, учитывающие теплообмен в тонком попер-

хностном слое при охлаждении водной массы перед ледообразованием и уменьшение прочности в толще льда от проникающей в нее солнечной радиации. Точность расчетов по этим моделям близка к точности измерений, а составленные с использованием прогнозов метеорологических величин на 5 дней краткосрочные прогнозы имеют устойчивую оправдываемость около 95 %.

Применение этих моделей позволило достоверно оценить изменения ледового режима при создании каскадов водохранилищ на реках и обеспечить составление соответствующих прогнозов начала наполнения водохранилищ, а также разработать систем расчетов и прогнозов, необходимых для продления навигации осуществления ледовых переправ, прокладки нефтегазопроводов и других работ в период ледовых явлений. В 1980—1990 гг. методы расчетов на основе этих явлений усовершенствованы и дополнены, создана автоматизированная система их реализации.

Качество российских моделей ледовых процессов было и остается непревзойденным в мировой науке.

Долгосрочные прогнозы сроков ледовых явлений. Метод долгосрочных прогнозов сроков ледовых явлений, начиная с работ Г. Р. Брегмана (1941) и Г. Я. Вангенгейма (1941) и их сотрудников (В. М. Виноградова и др., 1948) в 1940-х годах, основывались на выявлении прямой зависимости этих сроков от количественных характеристик предшествующих атмосферных процессов и состояния подстилающей поверхности Северной Атлантики. В последующий период способы индексации атмосферных процессов усовершенствовались в работах Е. И. Савченковой, Б. М. Гинзбурга, Н. Ф. Виноградовой, Н. Д. Ефремовой. Наиболее эффективным в 1970-х годах стало применение дискриминантного анализа для выявления значимых полей метеорологических величин (геопотенциала H_{500} и H_{100} , приземного давления) над северным полушарием и разложение этих полей по EOF с использованием коэффициентов разложения в качестве потенциальных предикторов в пошаговом регрессионном анализе (Подсечина, 1987; Савченкова, Ефремова, 1989).

В последние годы, с созданием базы данных по температуре поверхности океана (ТПО), выявлено влияние ее пространственного распределения, особенно в энергоактивных областях Северной Атлантики и северо-западной части Тихого океана в летние месяцы, на сроки замерзания рек и водохранилищ европейского

части СНГ (Б. М. Гинзбург, М. И. Сильницкая, 1997). Получен метод долгосрочного прогноза, учитывающий это влияние совместно с воздействием атмосферных процессов. Одновременно проведено исследование вековых изменений режима замерзания и вскрытия рек (И. И. Солдатова, 1993; Гинзбург и др., 1992), обозначена необходимость перехода на современные нормы сроков ледовых явлений, который осуществлен в 1995 г.; разработаны способы оценки изменения этих сроков при ожидаемых изменениях климата (С. В. Борщ и др., 1998).

Долгосрочные ледовые прогнозы имеют среднюю оправдываемость около 80 %, но она недостаточно устойчива, в связи с чем большое внимание уделяется методам уточнений со среднесрочной заблаговременностью (Б. М. Гинзбург и др., 1999).

В области долгосрочных ледовых прогнозов ведущая роль российских исследователей в мире общепризнана.

Прогноз максимальных заторных и зажорных уровней воды. Разработка методов прогноза этого опаснейшего явления была начата в 1950-х годах Л. Г. Шуляковским, продолжена И. Я. Лисером, затем Р. А. Нежиховским и В. А. Бузиным и другими, предложившими систему методов, применимых к участкам рек, где эти явления повторяются ежегодно или достаточно часто. В последние годы В. А. Бузиным (1995) предложены общие методы краткосрочного прогноза на гидравлической основе и с применением теоретической модели затора.

Возможности долгосрочного прогноза заторных уровней весьма ограничены, но для р. Лены В. В. Кильмяниновым (1992) разработана методика такого прогноза опасных заторных подъемов по участкам реки и у основных прибрежных городов.

Большинство серьезных заторных наводнений за последнее десятилетие было успешно предсказано, в частности катастрофические наводнения в устье р. Сухоны и на р. Лене у г. Ленска в 1998 г., а также на р. Лене у г. Якутска и в верховьях р. Амура в 1999 г.

Морские гидрометеорологические прогнозы

История развития морских гидрометеорологических прогнозов подробно представлена в ряде учебников (З. К. Абузаров, 1988; К. И. Кудрявая и др., 1974) и руководств (1994). Поэтому в

данной публикации лишь кратко изложены основные результаты, полученные в 1990-х годах, и указаны современные направления исследований.

Как известно, национальная система морского гидрометеорологического обеспечения (МГО) в настоящее время технологически и организационно интегрирована во всемирную систему морского метеорологического и океанографического обслуживания ВМО и МОК ЮНЕСКО. В основном МГО осуществляется в рамках программ Всемирной службы погоды (ВМО) и Объединенной глобальной системы океанического обслуживания (ВМО/МОК). Дальнейшее развитие МГО в России в значительной степени связывается с работами, запланированными в Федеральной целевой программе „Мировой океан”, особенно в рамках подпрограммы „Создание единой системы информации об обстановке в Мировом океане”. Новые перспективы для развития МГО в мире открывает также выдвижение под эгидой МОК, ВМО, ЮНЕП и МСН программы „Глобальная система наблюдений океана (ГСНО)” которая ориентирована на появление новой прикладной науки – оперативной океанографии. ГСНО и ее уже действующие региональные подпрограммы, такие как NEARGOOS в северо-восточной части Азии, ЕвроГСНО с проектами в Балтике, Арктике Средиземном море, на северо-западном шельфе Европы и в Северной Атлантике, имеют первостепенное значение для увеличения объема оперативной и климатической информации, поступающей с океанов и морей.

В последние годы научные учреждения Гидрометслужбы разрабатывали ряд новых моделей и технологий, которые составляют основу для обновления технологической и методической базы МГО. Необходимым условием для увеличения точности и достоверности морских прогнозов является также продолжение развития гидродинамических краткосрочных и среднесрочных прогнозов погоды, которое описано в других разделах.

В. Э. Рябининым (1995) была сформулирована концепция комплексной автоматизированной системы объективного анализа и прогноза основных морских метеорологических и океанографических величин и было показано, как она может быть совмещена с технологией гидродинамического метеорологического прогнозирования на основе учета чувствительности моделей обшей циркуляции атмосферы, океана и ветрового волнения.

используемой ими информации и возможностей вычислительной техники. Система ориентирована на глобальные схемы анализа и усвоения данных и последующее распределение крупномасштабной продукции в регионы для дальнейшего уточнения и использования с учетом местных особенностей, потребностей, а также данных, доступных на местном уровне. Была предложена общая схема прогностического комплекса, которая должна привести к повышению точности среднесрочного прогноза погоды благодаря учету полезной информации о влиянии океана на атмосферу. Так как масштаб этого влияния зависит от чувствительности модели атмосферы к вариациям данных о состоянии поверхности океана, положительный эффект будет усиливаться по мере совершенствования прогностических моделей циркуляции атмосферы.

Оперативная информация, поступающая с акватории Мирового океана, относится главным образом к его поверхности. В ряде случаев эта информация достаточна для глобального мониторинга некоторых океанографических полей на отдельных пространственно-временных масштабах. Вместе с тем объем оперативных данных, относящихся к подповерхностным характеристикам океана, гораздо меньше. Поэтому для диагноза процессов, протекающих в толще океана, используют усвоение данных, т. е. процедуру совмещения наблюдений с модельными расчетами. При этом, наряду с данными наблюдений, важным звеном становится океаническая модель.

В Гидрометцентре России разработана модель общей циркуляции океана, предназначенная для воспроизведения крупномасштабных движений и полей главных океанографических величин. Детализированное описание эффектов мелкомасштабного перемещивания в верхних слоях воды дает возможность использовать модель для усвоения данных по термической структуре верхнего слоя океана. Была исследована информативность потоков данных о термике океана, поступающих в Гидрометцентр по каналам ГСТ. Предварительные эксперименты по усвоению данных с помощью метода последовательной коррекции дают обнадеживающие результаты.

В Гидрометцентре России реализован комплекс диагноза и прогноза частотно-углового спектра ветрового волнения в Северной Атлантике, основанный на дискретной спектральной модели

третьего поколения (Рябинин, 1995). Была разработана программная оболочка, позволяющая использовать для диагноза и прогноза параметров волнения наиболее „свежие” данные метеорологического объективного анализа и прогноза. Проведены авторские испытания модели, включавшие в себя сравнения с данными субъективного анализа поля значительных высот волн. Модель подключена к метеорологическому прогностическому комплексу и интегрируется в автоматическом режиме ежедневно. Кроме данной модели, в Гидрометцентре России используется комплекс моделей для диагноза и прогноза волнения в Средиземном, Черном и Каспийском морях, основанный на упрощенной модели волнения В. В. Шулейкина. С этой целью специально разработана методика расчета приводного ветра и разгона волнения, учитывающая особенности распределения островов и форму береговой линии. Результаты испытаний метода показали удовлетворительное качество прогностических расчетов. Кроме того, в Гидрометцентре России продолжается использование интегральной параметрической модели волнения МАК, разработанной в ГОИНе, и спектральной параметрической модели. В последние годы школы моделирования волн ГОИНа (с принципиальным участием специалистов из ИО РАН) и СПО ГОИНа (в том числе работающий в ААНИИ И. В. Лавренов), а также специалисты Гидрометцентра России получили ряд перспективных результатов, касающихся темпов изменения интегральных параметров волн при различных условиях волнообразования, способов численного решения уравнений спектральных волновых моделей, зависимости обмена энергией и импульсом между ветром и волнами от стадии развития волнения, методов совместного моделирования эволюции волнения и приводного слоя атмосферы.

В Гидрометцентре России З. К. Абузязоровым проведены исследования асинхронных корреляционных связей между показателями атмосферной циркуляции над северным полушарием и изменениями среднего уровня Каспийского моря. Обнаруженные связи оказались достаточно тесными и устойчивыми, что открывает возможности разработки методов долгосрочного прогноза положения среднего уровня моря. Первые результаты показали, что уровень моря будет незначительно понижаться с 1997 по 2003 г., далее будет повышаться до 2010 г. и позднее снова на-

счет снижаться. Эти результаты имеют важное значение, поскольку они продемонстрировали возможность прекращения роста среднего уровня, наблюдавшегося с 1977 г., еще на той фазе, когда рост уровня считался необратимым и в стране рассматривался вопрос об исключительно масштабных капиталовложениях в защиту от затопления объектов береговой инфраструктуры Каспия.

В Гидрометцентре России Е. С. Нестеровым получены оценки влияния локального динамического воздействия атмосферы на формирование аномалий ТПО в Северной Атлантике. Получены оценки влияния Североатлантического колебания на термический режим океана. Выявлены области изменения давления, которые наиболее сильно влияют на формирование крупных аномалий ТПО в Северной Атлантике. Исследованы причины длительного понижения температуры воды в умеренных и субполярных широтах Северной Атлантики в 1960—1970-х годах. Разработана и испытана оперативная схема долгосрочного (до трех месяцев) прогноза аномалий ТПО в отдельных районах Северной Атлантики на основе метода групповых аналогов. Схема позволяет формулировать прогноз в категорической и вероятностной формах.

В ГОИНе разработана технология прогноза распространения и эволюции нефтяных пятен при аварийных разливах. Методология реализована в виде программного комплекса, включающего в себя, помимо модели нефтяного пятна, комплекс средств расчета сопутствующих параметров, а также собственную технику визуализации результатов расчетов. Также была развита перспективная концепция моделирования дрейфа нефти при наличии ледяного покрова. В ГОИНе была создана модель циркуляции моря „со свободной поверхностью” и ряд двумерных моделей циркуляции, предназначенных для прогнозов штормовых изменений уровня, в том числе с учетом приливов.

В начале 1990-х годов в Гидрометцентре России была подготовлена методика, на основе которой имеется возможность регулярно предоставлять потребителям ежесуточные данные высокого разрешения о температуре морской поверхности и (совместно с НПО „Планета”) параметрах состояния ледяного покрова, получаемые с помощью дистанционного зондирования. Эта инфор-

мация может быть получена для морей европейской части России.

Служба предупреждения о цунами (СПЦ) в России действует в течение нескольких десятилетий (с 1963 г.) и входит в Международную тихоокеанскую систему предупреждения о цунами. В настоящее время национальная СПЦ России является важной составной частью системы предупреждения и действия в чрезвычайных ситуациях. Кроме организаций Гидрометслужбы, функционирование и развитие подсистемы обеспечивают национальные центры предупреждения о цунами в городах Южно-Сахалинске, Петропавловске-Камчатском и Владивостоке, подразделения Геофизической службы РАН, структуры МЧС России и Госкомсвязи России, а также администрации Сахалинской, Камчатской областей и Приморского края. В настоящее время в оперативной деятельности подсистемы предупреждения о цунами участвуют 3 сейсмические станции, а также 50 береговых гидрометеорологических станций, которые ведут в основном визуальные наблюдения за поверхностью океана. Функционирование и развитие системы осложняется тяжелым экономическим положением страны. Три сейсмические станции на Курильских островах, разрушенные в 1994 г., еще не восстановлены. Обмен информацией между региональными центрами предупреждения о цунами в России и центрами в других странах по-прежнему осуществляется лишь по каналам ГСТ ВМО. Вследствие отсутствия необходимых бюджетных ассигнований почти полностью прекращено выполнение проекта автоматизации системы предупреждения о цунами.

Сильная зависимость всей хозяйственной деятельности от гидрометеорологических условий является отличительной чертой Арктики. Круглогодичные каботажные перевозки в западном секторе Северного морского пути, продленная навигация в восточном секторе, транзитные плавания требуют регулярного обеспечения различными видами фоновых и специализированных ледовых и гидрометеорологических прогнозов, основанных на большом объеме метеорологических и ледовых данных сети полярных станций, информации ИСЗ, инструментальной и визуальной авиаразведки, наблюдений ледоколов и экспедиционных судов. В результате выполнения ряда работ, в том числе в рамках

некоторых международных программ, в ААНИИ был создан значительный современный технологический и методологический потенциал обслуживания Арктики, а также проведен цикл работ по техническому и технологическому оснащению ледового информационного центра ААНИИ и специализированной системы АЛИСА.

Агрометеорологические прогнозы

Агрометеорологическое обеспечение сельского хозяйства в силу его большой зависимости от погодных условий традиционно являлось одной из важнейших задач Гидрометеорологической службы России. Становление его связано с историческим декретом Совета Труда и Оборона (1921 г.) об организации Службы урожая. Начиная с 1929 г., когда было образовано Центральное бюро погоды, такое обеспечение стало регулярным. На первом этапе развития агрометеорологии преобладали описательный подход и качественная оценка условий произрастания, формирования урожая и перезимовки сельскохозяйственных культур. Начало прогностическому направлению в агрометеорологии было положено в 1930-е годы, когда Г. З. Венцкевич и А. А. Шигелев составили первые прогнозы перезимовки озимых культур, сроков созревания озимой ржи и сроков цветения плодовых деревьев.

Необходимость увеличения производства сельскохозяйственной продукции и устойчивого развития всех отраслей АПК в послевоенные годы потребовала обеспечения этой отрасли всесторонней информацией о влиянии складывающихся и ожидаемых погодных условий на формирование урожайности сельскохозяйственных культур. На рубеже 1950-х и 1960-х годов работы С. А. Вериги, Л. А. Разумовой, М. С. Кулика, Е. С. Улановой, А. В. Процера, Ю. И. Чиркова, В. А. Моисейчик и других ученых создали основные теоретические положения агрометеорологического прогнозирования продуктивности сельскохозяйственных культур. Основное внимание стало уделяться поиску прямых связей между конечной урожайностью и условиями развития растений. Из множества факторов (метеорологических, био-

логических, почвенных, культуры земледелия и др.) выбирают наиболее значимые и лимитирующие, с которыми устанавливаются прогностические связи. Особенностью большинства методов этих прогнозов является учет инерционности главных агрометеорологических факторов, биологических закономерностей роста и развития растений, характеристики их фотосинтетического потенциала. Учитываются также ожидаемые погодные условия. Кроме прогнозов урожайности озимых зерновых культур и их перезимовки, в этот период были разработаны также методы прогнозов запасов влаги на весну (С. А. Вериги, Л. А. Разумова), прогнозов теплообеспеченности вегетационного периода (Ф. Ф. Давитая), прогнозов сроков наступления основных фаз развития и созревания сельскохозяйственных культур (А. А. Шиголев, Е. С. Уланова, Ю. И. Чирков, Т. А. Побетова и др.), сроков цветения и урожайности пастбищной растительности, урожайности сеяных трав и их перезимовки (И. Г. Грингоф, А. П. Федосеев, 1982; Гулинова, 1988; Страшная, 1988 и др.).

Агрометеорологами Н. Н. Желтой, К. В. Кириличевой, А. Г. Новиковым, О. М. Конторщиковой, Н. Б. Мещаниновой, Ю. С. Мельником, С. Л. Плучик, А. Н. Деревянко, А. И. Страшной, Л. В. Комоцкой для основных сельскохозяйственных районов страны были разработаны физико-статистические методы прогнозов урожайности яровой пшеницы и ячменя, подсолнечника, сахарной свеклы, картофеля, льна, овса, кукурузы и риса. Т. А. Максименковой был предложен метод прогноза состояния озимых культур осенью, а М. Г. Лубниным — сроков начала полевых и уборочных работ.

Использование в качестве математического аппарата корреляционного и регрессионного анализа оказалось весьма эффективным, поэтому статистические методы в области агрометеорологического прогнозирования, бурно развивавшиеся в Гидрометцентре России, получили развитие не только в региональных НИИ, но и в УГМС (И. В. Свислюк). Не уменьшилось их значение и в настоящее время. Исследования в этом направлении активно проводились во ВНИИСХМ, созданном в 1977 г., а также в ЗапСибНИИ, ДВНИИ и Хабаровском филиале Гидрометцентра России.

С развитием фотосинтетической теории продуктивности, математического моделирования водно-теплового режима растений в 1970-х годах начинают активно разрабатываться динамические и динамико-статистические модели продукционного процесса сельскохозяйственных растений (А. Н. Полевой, 1988; Сиротенко, 1981) и их перезимовки (А. Г. Палагин, В. А. Моисейчик). Эти модели позволяют проследить в динамике и количественно оценить накопление биомассы в целом и хозяйственно-полезной ее части (урожая). Они детально описывают механизмы протекающих процессов формирования продуктивности растений, и качество их в силу этого на порядок выше. Однако результаты использования предложенных моделей на практике показывают, что реализовать их преимущества по сравнению с физико-статистическими моделями мешает то обстоятельство, что для своего построения они требуют знания множества разнообразных количественных оценок, которые характеризуют ход тонких физиологических процессов, происходящих в растении во взаимодействии с окружающей средой. Получение таких оценок эмпирическим путем весьма затруднено. Приходится упрощать используемые в оперативной практике модели, вводить в них различные константы, что в конечном счете приближает их в этом смысле к статистическим. Оправдываемость агрометеорологических прогнозов урожайности, рассчитанных по этим моделям и физико-статистическими методами, практически одинакова и составляет преимущественно 80—95 %.

В 1970—1980-х годах в агрометеорологическом прогнозировании наметилось еще одно направление — синоптико-статистическое (В. М. Пасов, Е. А. Аксарина). Характерной особенностью этого направления было использование в качестве предсказателей данных карт барической топографии (геопотенциала H_{500}). Однако участие на этапах подготовки исходных параметров специалиста-синоптика не исключает некоторого субъективизма в оценке синоптических ситуаций, а использование нестандартной информации затрудняет применение компьютерной технологии. В физико-статистических методах, а также в прикладных моделях урожайности в основном используется стандартная агрометеорологическая информация, поступающая с наблюдательной

сети гидрометеорологических станций. Они лишены этого недостатка, поэтому полностью могут быть автоматизированы.

Все виды агрометеорологических прогнозов, составляемых и обобщаемых в Гидрометцентре России для основных органов управления агропромышленного комплекса и органов власти, имеют заблаговременность от одного до трех месяцев. По качеству они не уступают зарубежным, а в ряде случаев превосходят их по своему разнообразию.

В последнее десятилетие в связи с сокращением сети агрометеорологических станций, авиационных и наземных инструментальных маршрутных обследований посевов и нарушением вследствие этого однородности рядов наблюдений, а также в связи с изменением методики учета и отчетности Госкомстата России по урожайности и валовым сборам зерновых культур (с 1991 г. учет ведется в весе после доработки) большинство методов прогнозов урожайности зерновых культур нуждались в совершенствовании. По отдельным южным районам страны компенсировать недостаточное количество данных наблюдений в определенной степени позволяло использование спутниковой информации о состоянии посевов. В это время были разработаны вероятностные методы поэтапных прогнозов урожайности и валового сбора яровой и озимой пшеницы (В. М. Пасов, В. В. Зинченко, Л. И. Лебедева и др.), зерновых и зернобобовых культур (Е. С. Уланова, А. И. Страшная, В. А. Астафьев, Т. А. Максименкова и др.) по экономическим районам и Российской Федерации в целом, ориентированные в основном на машинную технологию. Предложен новый подход к разработке и совершенствованию методов агрометеорологических прогнозов, при котором количественные связи между характеристиками внешней среды и продуктивностью посевов ежегодно, по мере поступления новой информации, автоматически уточняются. В современных условиях реформирования и меняющихся форм хозяйствования в агропромышленном комплексе России такой подход также может быть перспективным.

ИССЛЕДОВАНИЯ В МИРОВОМ ОКЕАНЕ, МОРЯХ И УСТЬЯХ РЕК

Первым специализированным океанографическим институтом в СССР, деятельность которого была направлена на изучение морей, океанов и морских устьев рек, а также атмосферы над ними, был созданный в годы Великой Отечественной войны (1943) Государственный океанографический институт (ГОИН).

Начальником-организатором института был назначен Э. К. Агеноров, ранее возглавлявший небольшую группу океанологов морского отдела Государственного гидрологического института (ГГИ) в Ленинграде.

С весны 1944 г. ГОИН возглавил его первый директор, известный ученый-океанолог, профессор Н. Н. Зубов, руководивший институтом до 1948 г. Государственный океанографический институт как одно из первых морских научных учреждений в России создавался и развивался на фундаменте и традициях российской океанографической науки.

В годы войны ГОИН в первую очередь должен был осуществлять гидрометеорологическое обслуживание военных действий армий на морских побережьях и флотов на морях. После окончания войны ГОИН не только становится важным центром по обеспечению морской гидрометеорологической информацией военно-морского, торгового, рыболовного флотов и других отраслей хозяйства, но и со временем превращается в крупнейшее океанографическое учреждение страны, выполняющее научные исследования в области гидрометеорологии и гидрохимии Мирового океана и осуществляющее научно-методическое руководство морской и устьевой сетью в системе Гидрометслужбы, а также участвующее практически во всех национальных и международных программах.

В функции ГОИНа входят организация и осуществление изучения уровня моря, течений, волнения, термики, химических агрязнений; разработка методов получения и обработка гидрологической и гидрохимической информации, в том числе получаемой с искусственных спутников Земли (ИСЗ).

С годами расширялись область исследований и задачи ГОИНа. К изучению отечественных морей уже в конце 1940-х годов добавились исследования отдельных районов океанов, а затем и океанографические исследования в глобальном масштабе. Объектом исследований в 1960-х годах впервые в нашей стране стали морские устья рек.

В конце 1970-х годов к изучению физических и химических процессов в океанах, морях и морских устьях рек, ведению Государственного водного кадастра по разделу „Моря и морские устья рек” добавились новые важные задачи:

- изучение процессов взаимодействия океана и атмосферы в том числе в связи с проблемой разработки прогнозов погоды и изменений климата;

- исследование процессов загрязнения и самоочищения морских вод и донных отложений;

- разработка методов расчета и прогноза гидрометеорологических и гидрохимических показателей;

- инженерные расчеты для проектирования морского гидротехнического строительства с целью оценки воздействия окружающей среды (ОВОС) на них;

- разработка и внедрение методов наблюдений за состоянием моря при проведении сбросов с целью захоронения в море отходов, составление рекомендаций по оптимизации сбросов. (этой же целью институту в 1981—1991 гг. была поручена работа по изучению влияния на экологические условия возможного освоения в открытом океане железомарганцевых конкреций (ЖМК).

К 1980-м годам ГОИН стал крупным океанографическим научным центром. Институт объединяет морские гидролого-гидрохимические исследования, осуществляет руководство морской устьевой сетью Гидрометслужбы и обеспечивает гидрометеорологическими данными управленческие структуры различных уровней, а также промышленные организации.

До распада Советского Союза ГОИН в своем составе имел три отделения: Одесское и Севастопольское на Черном море и Ленинградское на Балтийском море. Институт располагал 8 научно-исследовательскими судами (НИС) неограниченного плавания, которые принимали участие во многих международных и межведс

ственных экспедициях. Корабли погоды ГОИНа с 1975 по 1990 г. несли непрерывную вахту в точке "С" („Чарли“) в Северной Атлантике, выполняя международные обязательства страны по участию в системе наблюдений за погодой на океанских станциях, проводившихся под патронажем Всемирной метеорологической организации (ВМО) и Межправительственной океанографической комиссии (МОК) ЮНЕСКО. В течение 1971—1991 гг. институт совместно с Академией наук и другими ведомствами участвовал в океанографических исследованиях в Мировом океане по таким крупным программам, как Национальная программа исследования атмосферы и океана „Разрезы“, программа Глобальные исследования загрязнения морей” (ГИЗМ), Всемирный океанографический эксперимент по циркуляции Мирового океана (ВОСЕ), Международная программа по исследованию циркуляции вод и атмосферы в Индийском океане „Муссон“, Международная программа по исследованию северной части Тихого океана ВЕСТПАК.

Распад СССР и выход из состава ГОИНа двух южных отделений с базой экспедиционного флота привели к почти полному прекращению экспедиционных исследований Росгидромета в Атлантическом и Индийском океанах.

За 60 лет существования ГОИНа значительно расширились тематика его исследований и круг задач, для выполнения которых возникали новые структурные подразделения.

Серьезные исследования по комплексному изучению Балтийского моря, разработке авиационных и космических методов измерения океанографических и гидрохимических параметров, а также по метеорологии в области океанографии проводит Санкт-Петербургское отделение (СПО) ГОИНа.

Первым директором Ленинградского (ныне Санкт-Петербургского) отделения (ЛО) ГОИНа был Ю. В. Преображенский (1946—1961 гг.). Затем отделением руководили Б. А. Филиппов (1961—1971 гг.), Н. Н. Лазаренко (1971—1979 гг.) и В. А. Рожков (1979—2001 гг.). В настоящее время директором является И. А. Захарчук.

Организованное в январе 1971 г. Одесское отделение (ОДО) ГОИНа проводило большую работу по руководству научным флотом ГОИНа, изучению океанографических и гидрохимических

параметров Атлантического и Индийского океанов, разработке и совершенствованию океанографических и гидрохимических приборов и систем, созданию и ведению режимно-статистического банка данных по загрязнению океанов и морей нефтью и обеспечению потребителей соответствующими данными. Директорами отделения в разное время являлись Р. Р. Белевич (1971 г.), Е. А. Собченко (с 1971 по 1989 г.), В. И. Михайлов (с 1989 г.).

В 1970 г. на базе обсерватории Черного и Азовского морей была создана лаборатория южных морей ГОИНа, преобразованная в 1973 г. в Севастопольское отделение (СО) ГОИНа, которое обеспечивало изучение гидрометеорологического и гидрохимического режима Черного и Азовского морей, осуществляло научно-методическое руководство морскими и устьевыми станциями и обсерваториями на этих морях, выполняя также роль бассейновой гидрометеорологической обсерватории, разрабатывало современные методы океанографических и гидрохимических измерений и определений.

Организатором и первым директором СО ГОИНа был Ю. С. Осипов (1973—1980 гг.). Затем отделение возглавляли А. И. Рябинин (1980—1981 гг.), Ю. А. Афанасьев (1981—1987 гг.), В. П. Попов (1987—1989 гг.), А. П. Жиляев (1990—1995 гг.).

Тем не менее институт живет и развивается в Москве и Санкт-Петербурге. Совершенствуются методы расчета, моделирования и анализа в области физической и химической океанографии с целью внедрения в практику освоения морских ресурсов и их защиты от антропогенных воздействий.

В феврале 1950 г. приказом начальника Главного управления гидрометеорологической службы (ГУГМС) при Совете Министров СССР во Владивостоке был создан Дальневосточный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, который в конце 1970-х годов в связи с реорганизацией ГУГМС в Государственный комитет СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды был переименован в Дальневосточный региональный научно-исследовательский институт (ДВНИГМИ) Госкомгидромет СССР (ныне Росгидромет).

Базой для создания ДВНИГМИ послужили подразделения Приморского управления гидрометеорологической службы.

С 1 июля 1950 г. ДВНИГМИ начал свою научно-исследовательскую деятельность в составе 10 отделов и нескольких отделений.

ых лабораторий. Одним из главных направлений исследований были вопросы океанографии дальневосточных морей, Тихого и Индийского океанов. Соответственно ведущим отделом института стал отдел океанографических исследований и морских гидрологических прогнозов, затем переименованный в отдел изучения гидрологических процессов в Мировом океане.

В программу работ отдела входили задачи по физической океанографии, расчету и прогнозу морских явлений в дальневосточных морях (Японском, Охотском и Беринговом), Тихом и Индийском океанах.

Первым директором ДВНИГМИ был О. К. Ильинский (1950—1951 гг.), затем институтом руководили А. М. Баталин (1951—1955 гг.), П. А. Урываев (1955—1973 гг.), В. Г. Федорей (1973—1989 гг.), В. В. Покудов (1989—1992 гг.), Ю. Н. Волков (с 1992 г. по настоящее время).

В институте развивается наиболее современная отрасль океанологии — математическое моделирование, которое на основе количественного подхода в сочетании со спутниковыми методами измерения позволяет дополнить наблюдения расчетной информацией. Основная задача состоит в развитии методов сбора информации (спутниковых и томографических систем) и средств ее обработки, которые позволят объединить наблюдательные системы и современную физико-математическую базу по моделированию процессов в океанах для разработки долгосрочных прогнозов погоды и климата. Поэтому наиболее перспективными работами морских институтов в ближайшем будущем станут теоретические и экспериментальные исследования Мирового океана с широким использованием спутниковой информации.

Состояние и развитие морских исследований, морской сети наблюдений в послевоенный период и в настоящее время

В послевоенный период начался быстрый рост сети морских дрегговых станций, развитие экспедиционных научных исследований и методических работ, увеличение научно-исследовательского флота, укрепление и реконструкция существующей

сети, открытие новых институтов, обсерваторий океанографического профиля, подготовка научных кадров в области океанографии. С 1950 г., после организации Дальневосточного научно-исследовательского гидрометеорологического института, началось также планомерное изучение дальневосточных морей и Тихого океана.

К 1960-му году число морских станций возросло более чем в два раза, было открыто 8 устьевых станций, 26 станций на научно-исследовательских, торговых и промысловых судах и база со штатным составом специалистов-океанологов и метеорологов, которые проводили наблюдения в морях и океанах.

После Великой Отечественной войны (на 1 января 1946 г. Гидрометслужба имела 42 небольших судна, главным образом катера, боты и шлюпки. На 1 января 1961 г. флот Гидрометслужбы насчитывал уже 151 единицу, в том числе два океанских корабля — „Ю. М. Шокальский” и „А. И. Воейков”, вступивши в строй в 1959 г., 16 других судов неограниченного плавания: 25 сейнеров, мотоботов, шхун и 108 более мелких судов. Вместе с судовыми станциями, базирующимися на торговых и промысловых судах, число которых выросло более чем в 3 раза достигло 526 единиц, Гидрометслужба получила неограниченную возможность работать практически во всех морях и океанах смогла приступить к планомерному углубленному их изучению

В 1968—1992 гг. ГОИН располагал научно-исследовательским флотом в составе восьми судов неограниченного района плавания: научно-исследовательские суда погоды (НИСП) „Пасат”, „Муссон”, „Волна” (полученные в 1968 г., водоизмещение по 4,15 тыс. т); НИС „Виктор Бугаев”, „Георгий Ушаков”, „Эрнст Кренкель” (полученные в 1971 г., водоизмещением по 4,47 тыс. т), „Яков Гаккель” (полученный в 1976 г., водоизмещением 1,12 тыс. т) и „Виктор Паршин” (полученный в 1989 г. водоизмещением 0,93 тыс. т).

В 1959—1960 гг. ДВНИГМИ получил два современных научно-исследовательских судна — „Ю. М. Шокальский” и „А. И. Воейков” (водоизмещением примерно по 3,2 тыс. т), в 1967—1970 гг. — два еще более совершенных судна — „Академик Кротов” и „Академик Ширшов” (водоизмещением по 6,9 тыс. т) и четыре НИСП — „Волна”, „Прилив”, „Прибой” и „Океан” (водоизмещением по 4,2 тыс. т), в 1974—1977 гг. — еще два НИС.

„Валериан Урываев” и „Вячеслав Фролов” (водоизмещением по 1,2 тыс. т). В 1982—1983 гг. получены новые НИС „Академик Покальский” и „Профессор Хромов” (водоизмещением по 1,2 тыс. т) и в 1987 г. в распоряжение института поступило НИС „Павел Гордиенко” (водоизмещением 0,93 тыс. т).

Неограниченный район плавания НИС и НИСП, оснащение их современной радио- и навигационной аппаратурой, измерительной, регистрационной и вычислительной техникой, системами приема и обработки спутниковой информации, а также комплектованность высокопрофессиональными экипажами и научно-техническим персоналом позволили проводить комплексные океанографические, гидрохимические, аэрологические, метеорологические, биологические, экологические и специальные наблюдения в морях и океанах, на шельфе и в глубоководных районах, Арктике, тропических и южных широтах океана.

С 1960-х годов палубное, кабельное и тросовое океанографическое оборудование, наличие метеорологических ракет в составе бортового комплекса позволили вести зондирование Мирового океана до глубины 6000 м и атмосферы до высоты 200 км.

С вводом в эксплуатацию современных НИС и НИСП перед ЦОИНОм и ДВНИГМИ были поставлены новые задачи по комплексным исследованиям Мирового океана, внутренних и окраинных морей. основополагающую роль в развитии океанского флота Гидрометслужбы сыграл Е. К. Федоров, ее руководитель в 1939—1947 и 1962—1974 гг.

Для изучения морей, омывающих берега нашей страны, широко использовались наблюдения на густой сети стандартных разрезов, повторяющихся от сезона к сезону и от года к году. С 1955 г. Гидрометслужба вела регулярную ледовую авиаразведку, материалы которой вместе с береговыми наблюдениями дают характеристику ледового режима.

Улучшение технического оснащения Гидрометслужбы позволило перейти от наблюдений и подготовки ежегодников к тематическим исследовательским работам, к которым стали привлекать гидрометеорологические обсерватории и морские гидрометеорологические станции.

На этой базе стали развиваться и совершенствоваться методы гидрометеорологических наблюдений. В системе Гидрометслуж-

бы был создан Научно-исследовательский институт гидрометеорологического приборостроения. Широкое применение получили измерители течений и волн, конструкции которых разрабатывались в ГОИНе, Институте океанологии им. П. П. Ширшова Академии наук (ИО АН) и Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ), а также термометриграфы, автоматические батометры и гидрозонды. Вошел в практику метод измерений электрической проводимости для определения солености морских вод. Для других гидрохимических определений начали применять потенциметрический электрофотометрический методы, а также метод радиоактивных изотопов. При изучении течений в морях и океанах обычным стал метод измерения на буйковых станциях.

Накоплению большого количества данных гидрометеорологических наблюдений способствовало широкое применение методов их механизированной обработки.

Большое значение для комплексного изучения Мирового океана имели работы по обобщению и систематизации всех накопленных экспедиционных наблюдений в виде „Каталога глубоководных наблюдений”, подготовленного ГОИНОм впервые в нашей стране (1951). Используя материалы каталога, удалось сравнительно короткий срок подготовить и издать большое число обобщающих монографий по гидрологии океанов и морей и гидрометеорологических пособий для нужд мореплавания, рыбной и китобойного промысла. Систематизированные в каталоге данные экспедиционных наблюдений позволили А. М. Муромцеву подготовить и издать три монографии: по Тихому (1958), Индийскому (1959) и Атлантическому (1963) океанам, которые являлись в тот период серьезным вкладом в физическую океанографию.

Под методическим руководством ГОИНа научно-исследовательские учреждения (НИУ) и УГМС занимались изучением морей, в том числе и шельфовых районов, где сосредоточены основные биологические и минеральные ресурсы. При этом Гидрометслужба, ее институты и УГМС исходили прежде всего из необходимости решения практических задач. В 1950 г. впервые было организовано гидрометеорологическое обеспечение поиска и разведки лова рыбы на основе прогнозов, которые составляли с

ноптические группы, базировавшиеся на поисковых судах и плавбазах.

В 1968 г. проводилось комплексное гидрометеорологическое обслуживание промыслового флота в районе Лабрадора синоптическими группами с использованием судна, выполнявшего роль „ледового патруля“, и вертолета для производства ледовой авиа-разведки. Рекомендации синоптической группы позволили судам эффективно работать с учетом гидрометеорологической и промысловой обстановки и увеличить вылов рыбы в 10 раз.

Режимные и расчетные гидрометеорологические характеристики ветра, волнения, течений, уровня, льда, обледенения, туманов и другие должны учитываться при проектировании, строительстве и эксплуатации гидротехнических инженерных сооружений в открытом море и на побережье. Нарушение этого правила нередко приводит к авариям и катастрофам.

В конце 1940-х — начале 1950-х годов в СССР были начаты работы по поиску, разведке и добыче нефти и газа в районе Нефтяных Камней в Каспийском море. Первая буровая, построенная на платформе в открытом море без учета максимальных характеристик ветра и волн, была разрушена, погибли люди. В 1950 г. в нефтеносных районах Каспия были развернуты широкие теоретические исследования и осуществлялись практические мероприятия по гидрометеорологическому обеспечению работ на шельфе, которые проводились ГОИНОм совместно с Азербайджанским УГМС и проектными институтами. Расчеты характеристик ветра, волнения редкой повторяемости, уровня, течений, данные измерений волн и течений с применением специально созданной аппаратуры легли в основу проектирования, строительства и эксплуатации нефтяных сооружений.

Стало ясно, что без учета ветроволновых и ледовых нагрузок, знания уровня режима, течений и других режимных характеристик и оперативного гидрометеорологического обеспечения нельзя планировать и проводить работы на шельфе.

В 1980-х годах ГОИН совместно с другими институтами (ААНИИ, ДВНИГМИ, Мурманский филиал (МФ) ААНИИ, ЛО ГОИН, СО ГОИН, Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова (ГГО), Западно-Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт (ЗапСибНИГМИ), Закавказский научно-исследовательский гид-

рометеорологический институт (ЗакНИГМИ), Бакинское отделение (ВО) ЗакНИГМИ) и морскими УГМС выполнил значительные работы по исследованию шельфовых районов 13 морей, омывающих берега России, в рамках общегосударственной научно-технической программы „Мировой океан”.

На первом этапе эти работы возглавлял А. А. Ющак, который был директором ГОИНа с 1951 по 1977 г.

Для шельфовых районов характеристики ветра, волнения уровня, течений, дрейфа льда и другие определялись преимущественно расчетным путем с использованием ветровых полей по методикам, разработанным в ГОИНе и других НИИ Гидромет службы.

В настоящее время эти методики значительно усовершенствованы и соответствуют мировым стандартам. В 1993 г. ГОИНа и ВНИИПИМорнефтегазом издано научно-прикладное пособие „Инженерно-гидрометеорологические исследования на континентальном шельфе”, одобренное Росгидрометом и Минтопэнерго. По проекту „Шельф” для 13 морей в 1983—1990 гг. была издана серия научно-справочных пособий „Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей” (13 томов и 16 выпусков).

Исследования шельфовых районов морей, подготовка и издание научно-справочных пособий по шельфу базировались на серьезных теоретических и практических разработках ГОИНа ГГО, ААНИИ, ДВНИГМИ, ЛО ГОИНа и др.

Необходимо отметить фундаментальный вклад ГОИНа в развитие волновой теории в период 1950—1970 гг. Разработанный метод расчета волн включен в СНиП 57-75.

В ГОИНе, ААНИИ и Гидрометцентре России созданы численные схемы расчета уровня моря при конкретных синоптических ситуациях для шельфа с простой морфометрией, полузамкнутых глубоких акваторий, замкнутых мелководных морей и для заливов, глубоко вдающихся в сушу. Они апробированы при расчете колебаний уровня Балтийского, Белого, Баренцева, Черного Азовского, Каспийского и Охотского морей.

В ААНИИ разработаны методы расчета прочности льда, максимальной скорости его дрейфа и массы при обледенении. Был экспериментально найдена зависимость предела прочности льда при сжатии, изгибе и срезе от температуры и солености воды структуры и плотности льда и некоторых других факторов.

В ГГО разработана методика определения дальности видимости в шельфовой зоне по сведениям об интенсивности туманов и осадков на побережье, а в ЗапСибНИГМИ — методика экстраполяции с берега в открытое море данных о ветре и температуре воздуха.

В ЛО ГОИНе создана модель расчета течений замкнутого двухслойного бассейна, а в ААНИИ — схемы расчета течений в мелководных морях с островами и припайным льдом.

Широкое развитие получили в ГОИНе и других институтах Гидрометслужбы теоретические исследования динамики вод, направленные на изучение закономерностей и разработку физико-математических моделей процессов, формирующих гидрологический режим океанов и морей. Десятки монографий, сборников Трудов НИУ Гидрометслужбы посвящены этим вопросам.

Под руководством ГОИНа, ААНИИ, ДВНИГМИ, ГГО и других институтов разрабатываются и издаются наставления и руководства, методические указания по гидрометеорологическим, гидрохимическим наблюдениям, включая загрязнение морей, которые являются обязательными для всех организаций страны. Ведется Водный кадастр по морям и устьям рек, постоянно издаются гидрометеорологические и гидрохимические ежегодники, различные пособия и справочники, а также ежегодные „Обзоры состояния вод по гидрохимическим показателям”.

В начале 1980-х годов в ГОИНе была разработана программа комплексного изучения морей, омывающих берега территории бывшего Советского Союза, известная как проект „Моря”.

Проект „Моря” — это многоплановая, широкомасштабная программа изучения Белого, Балтийского, Баренцева, Черного, Азовского, Каспийского, Охотского, Японского, Берингова и Аральского морей, в которой гидрометеорологические и гидрохимические исследования базируются на оптимальном сочетании современных теоретических методов и накопленных материалов наблюдений. Руководит этой программой Ф. С. Терзиев.

Экспедиционные исследования на Баренцевом, Белом, Балтийском, Черном, Азовском и Каспийском морях выполнялись в основном на судах ГОИНа и УГМС, а на Охотском, Японском и Беринговом морях — на судах ДВНИГМИ.

Получены характеристики современных естественных и антропогенных изменений на морях по сравнению с климатически-

ми нормами в различных пространственных и временных масштабах, характеристики ветра и волнения, непериодических колебаний уровня, течений, приливов и ледового режима. Широкое развитие, особенно на дальневосточных и северных морях получила авиационная ледовая разведка.

Выполнение проекта „Моря” ускорило создание банков данных гидрометеорологических характеристик по морям, и в настоящее время во Всероссийском научно-исследовательском институте гидрометеорологической информации — Мировом центре данных (ВНИИГМИ—МЦД), ГОИНе, ДВНИГМИ и других институтах и УГМС Росгидромета созданы наиболее полные банки данных.

Конечным итогом исследований по этому проекту является подготовка и издание монографий серии „Гидрометеорология и гидрохимия морей”, представляющей собой своеобразную океанологическую, метеорологическую и гидрохимическую энциклопедию.

В результате проведенных работ издано 20 монографий, в том числе 14 серий „Гидрометеорология и гидрохимия морей”. Эти работы получили высокую оценку в России и странах ближнего и дальнего зарубежья.

По методам, разработанным в ГОИНе и ДВНИГМИ, с 1950-х годов проводились исследования в дальневосточных морях: проливах Курильской дуги. К важным работам ДВНИГМИ относятся исследования цунами. В 1973 г. приказом по ГУГМИ ДВНИГМИ назначен головным учреждением в Гидрометслужбе по проблеме цунами.

С начала 1970-х годов в тематике научных работ и морских экспедиционных исследованиях ДВНИГМИ все больше внимания стало уделяться изучению тропических циклонов (тайфунов) в северо-западной части Тихого океана с одновременным выполнением обширных океанографических программ. Сначала это были рейсы одиночных судов, работавших по программе судна по годам в точке 15° с.ш., 135° в.д., а в период 1975—1990 гг. были выполнены 14 крупных комплексных экспедиций, из которых шесть (1983—1989 гг.) — в рамках советско-вьетнамского сотрудничества в области тропической метеорологии и изучения ураганов. В состав экспедиций входило от трех до пяти НИС.

Основными инициаторами и равноправными участниками большинства экспедиций являлись НПО „Тайфун” и ДВНИГМИ. Наиболее крупными были экспедиции „Тайфун-75”, „Тайфун-78”, „Тайфун-81” и „Тайфун-90”. Последней из них стала экспедиция „Тайфун-90”, проводившаяся в 1990 г. одновременно с международным проектом „Спектрум” Комитета ЭСКАТО-ВМО по тайфунам и американским экспериментом ТСМ-90.

Экспериментальные исследования с 1986 по 1990 г. были направлены на проверку моделей структуры и эволюции тропических циклонов на ранней стадии развития.

Анализ многочисленных данных при построении упомянутых моделей указал на необходимость организации дополнительных специализированных наблюдений с привлечением дистанционных средств измерений параметров атмосферы, например судовых метеорологических радиолокаторов (МРЛ) и ИСЗ.

Дистанционные доплеровские эксперименты с помощью МРЛ в натуральных тропических условиях были впервые в мировой практике реализованы в 1986—1990 гг. на НИС „Академик Королев” (43-й рейс) и „Академик Ширшов” (44-й и 48-й рейсы). Организация и проведение наблюдений осуществлялись Центральной аэрологической обсерваторией (ЦАО), ДВНИГМИ и Институтом космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН).

Серьезные исследования морей стали возможны благодаря устойчивой деятельности наблюдательной сети и системе комплексного гидрометеорологического и гидрохимического мониторинга морей, которая была разработана ГОИНОм с участием всех морских институтов и УГМС. Система комплексного мониторинга морских и океанических акваторий включала в себя ряд следующих блоков.

1. Прибрежная сеть станций и постов, островные станции, а также гидрометеорологические станции на морских платформах и эстакадах.

2. Судовые станции с добровольными наблюдателями на торговых и рыболовных судах.

3. Система наблюдений открытого моря на вековых и стандартных океанографических разрезах.

4. Система рейдовых наблюдений и наблюдений в устьях рек.

5. Наблюдения за загрязнением морей на сети Общегосударственной системы наблюдений и контроля (ОГСНК).

6. Авиационные и спутниковые наблюдения за состоянием морей.

В 1960—1970-е годы система мониторинга морей полностью сформировалась, были изданы соответствующие межведомственные нормативные руководящие документы. Мониторинг совершенствовался, а информация использовалась во многих научных, научно-оперативных и практических работах. Следует отметить большой научный и научно-организационный вклад и разработку теории и практики системы комплексного мониторинга академика РАН Ю. А. Израэля (руководителя Гидрометслужбы в 1972—1991 гг.) и его учеников.

К сожалению, система мониторинга в последнее десятилетие испытывает кризисное состояние, так же как и вся сеть Гидрометслужбы. По данным, поступающим из УГМС, в 1996 г. на территории РФ действовало 150 станций и 38 постов, расположенных на побережье РФ при протяженности береговой линии 26 850 км, что явно недостаточно.

Вторая составляющая мониторинга — судовые станции, число которых также значительно сократилось. Если раньше поступала информация с 1100—1200 судов ежедневно, то сейчас — 35—40 судов. На сети отмечаются неуккомплектованность кадрами и недостаток приборов.

В последнее десятилетие почти полностью прекратилось производство вековых и стандартных разрезов, а значит, и наблюдений на сети ОГСНК и за загрязнением в открытом море.

Исследования Атлантического, Тихого, Южного, Индийского океанов и морей России

Исследования в открытых районах океанов Гидрометслужбой были начаты в 1947 г. в связи с организацией поиска рыбопродуктивных районов в Норвежском, Гренландском морях Атлантике. Эти работы проводились совместно с Всероссийским научно-исследовательским институтом морского рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО). В результате комплексных исследований была установлена связь скоплений сельди с положением

нием районов с высокими значениями пространственных градиентов температуры воды, получены закономерности миграции сельди в районах повышенных положительных аномалий температуры воды и на гидрологических фронтах. Эти результаты использовались подразделениями Гидрометслужбы и Минрыбхоза для обеспечения поиска и промысла рыбы.

В том же 1947 г. были начаты совместные работы ГОИНа и ВНИРО по оперативному гидрометеорологическому обеспечению китобойного промысла в атлантическом секторе Антарктики и изучению закономерностей миграции и скоплений китов. Эти работы положили начало планомерному изучению антарктических вод Мирового океана и продолжались вплоть до начала 1960-х годов. Наблюдения включали полный комплекс метеорологических и гидрологических измерений в океане, инструментальные измерения волн, регистрацию положения кромки льдов и др.

По итогам этих исследований в ГОИНе были подготовлены и изданы монографии и крупные работы по метеорологии и океанографии Южного океана. Многие выводы и результаты этих исследований дали возможность выделить в верхних слоях океана благоприятные условия для развития зоопланктона и, в частности, криля — основной пищи китов. В результате работ, проведенных гидрологами и метеорологами на китобойной флотилии, к началу Международного геофизического года в нашей стране уже имелись монографии и сборники Трудов ГОИНа, освещающие гидрометеорологические и гидрологические условия обширного района Южного океана. Эти материалы сыграли важную роль в подготовке нового крупного этапа изучения Антарктики советскими учеными. В 1956 г. начала работать Советская антарктическая экспедиция (САЭ), выполнявшая широкомасштабные исследования Южного океана.

Сотрудники ГОИНа принимали участие в исследованиях на судах китобойной флотилии „Слава” ежегодно в период с 1947 по 1960 г.

В течение многих лет ГОИН совместно с ДВНИГМИ проводил исследования Куроисио по широкой международной программе, которая возглавлялась профессором А. М. Муромцевым и завершилась изданием ряда монографий.

В 1954—1957 гг. в институте зародилось одно из основных направлений современной океанографии — теория бароклинного

океана, связанная с именем профессора П. С. Линейкина. Для решения задач гидродинамики морских течений, помимо известной системы уравнений движения и неразрывности, было введено уравнение термохалинной турбулентной диффузии. Такой подход оказался весьма эффективным для объяснения физического понимания формирования горизонтальной и вертикальной циркуляции вод в Мировом океане и отдельных его районах. На основе теории бароклинного океана достигнуты существенные успехи как в описании общих физических закономерностей ветровых и термохалинных течений, так и в построении схемы планетарной циркуляции вод в океане.

Значительное место в исследованиях ГОИНа было уделено установлению закономерностей пространственно-временной изменчивости основных океанографических характеристик и созданию системы сети океанских станций.

Новым этапом в изучении Мирового океана явилось значительное увеличение исследовательского флота Гидрометслужбы в конце 1960-х — начале 1970-х годов. Океанские суда погоды ГОИНа проводили широкий комплекс исследований по динамике вод и загрязнению Атлантики. С 1971 г. суда института вели исследования на стандартных гидрологических разрезах в северной, тропической и экваториальной зонах Атлантики и морях, омывающих берега европейской части СССР, что дало возможность проследить за изменчивостью гидрометеорологических процессов в различные сезоны года и в течение длительного периода в наиболее важных энергоактивных районах океана. 165 рейсов совершено с 1968 по 1981 г. судами ГОИНа. В 1974 г. четыре судна института приняли участие в крупном международном тропическом эксперименте (АТЭП), который позволил получить данные о расходах воды в системе экваториальных течений, оценить пространственную изменчивость теплового баланса, исследовать причины образования аномалий температур воды и проследить взаимосвязь между характеристиками теплового состояния Тропической и Центральной Атлантики.

В 1977 г. в ГОИНе под руководством В. М. Грузинова была разработана программа долгосрочных исследований гидрометеорологических процессов в Атлантическом океане (ДИГМА), в которой были определены районы исследований и положение гидрометеорологических разрезов. Наблюдения на некоторых разре-

нах проводились непрерывно более 10 лет и внесли значительный вклад в изучение крупномасштабных процессов в океане.

С конца 1970-х — начала 1980-х годов ГОИН и его отделения, а также ААНИИ, ДВНИГМИ, ГГО, ИПГ, ЛАМ, морские ГМС, а также ряд институтов Академии наук, Минрыбхоза, Минобороны, Минобразования и другие проводили исследования по крупным научным проектам: ДИГМА, „Разрезы”, „Моря”, „Шельф”, „Дампинг”, „Абиссаль”, „Ветровые волны”, „Среда”, „Устья”, ПГЭП, ТРОПЭКС и др.

Серьезные научные результаты были получены при анализе океанографической информации, собранной под руководством и при активном участии ГОИНа в рамках проекта „Разрезы”. Так, в 1981 г. институтом были выполнены 4 подробные сезонные гидрологические съемки в Ньюфаундлендской энергоактивной зоне. Гидрологические наблюдения на разрезе по параллели 6° с.ш. были повторены 52 раза. Выявлены неизвестные ранее особенности гидрологического строения вод этого района, пространственного распределения в нем тепла и тепловых аномалий, оказывающих большое влияние на распределение тепла в атмосфере над Европой.

Не менее интересные и важные научные результаты были получены в районе тропической энергоактивной области. Этот район известен исключительной сложностью гидродинамической структуры вод и резкими сезонными вариациями положения и интенсивности основных ее элементов. Их смещение влечет за собой изменение положения и интенсивности струй Гольфстрима и Северо-Атлантического течения. Кроме того, были выполнены гидрологические съемки на четырех мезомасштабных полигонах. Получен большой объем океанографической информации.

Особо следует упомянуть теоретические и экспедиционные работы по изучению теплового взаимодействия океана и атмосферы, проведенные в 1980-х годах под руководством С. С. Лаппо.

С 1 июля 1975 г. суда погоды ГОИНа работали в постоянной точке 52°41' с.ш., 35°39' з.д. („Чарли”) в Северной Атлантике, выполняя международные обязательства нашей страны по участию в системе наблюдений за погодой на океанских станциях. 3 мая 1990 г. завершилась работа ГОИНа на этой станции. За период работы научно-исследовательские суда института выполнили 171 экспедиционный рейс по обслуживанию станции; на ней

проведено 24 070 аэрологических, 158 697 метеорологических и 35 750 океанографических измерений. Число рейсов, выполненных в 1968—1991 гг. судами ГОИНа в морях и океанах по таким научным программам, как ДИГМА, „Разрезы”, „Дампинг”, „Абиссаль” и другие, составило 400.

В исследованиях взаимодействия атмосферы и океана океанологи ГОИНа и ААНИИ имеют по ряду научных позиций безусловный международный приоритет. Так, ГОИНОм предложена и описана на количественном уровне схема глобальной циркуляции вод Мирового океана, приводящая к формированию глобальной тепловой аномалии в Северной Атлантике, что позволяет рассматривать последнюю как глобальную энергоактивную область Мирового океана. Здесь находятся самые крупные положительные средние годовые аномалии температуры воды (5 °С) и воздуха (9 °С). В Северной Атлантике выделено шесть энергоактивных областей сезонного временного масштаба.

В конце 1970-х годов ГОИН принял участие в международной программе ПОЛИМОДЕ, возглавил проводившуюся в Атлантике международную экспедицию ПГЭП-79, в которой участвовал семь советских судов различных ведомств, в том числе два корабля ГОИНа — „Виктор Бугаев” (флагман) и „Яков Гаккель”. Научные результаты этой экспедиции опубликованы в 1982 г. двухтомном выпуске ПГЭП-79. В них рассмотрен широкий круг вопросов, связанных с изучением метеорологических и гидрологических процессов, происходящих в тропической зоне Атлантического океана. В 1982 г. ГОИН возглавил межведомственную экспедицию в Средиземном море по международной программе „Альпэкс”.

В дальнейшем усилия океанологов и экспедиционного флота ГОИНа были направлены на изучение энергоактивных районов Мирового океана по программе „Разрезы”, целью которой было решение ряда крупных научных задач, связанных с взаимодействием атмосферы и океана, в том числе прогнозирование долгосрочных климатических изменений. Теория этого вопроса была разработана совместно институтами РАН и Росгидромет под руководством академика Г. И. Марчука. Эта программа переросла в конце 1980-х годов в международную программу ВОСИ Флот Росгидромета (суда ГОИНа, ААНИИ, ДВНИГМИ) прини

гал активное участие в выполнении этой программы в Атлантическом, Тихом, Индийском и Южном океанах.

В 1950 г. в ГОИНе начались работы по исследованию морского ветрового волнения. Их результаты были обобщены в „Руководстве по расчету элементов морского ветрового волнения” (1960 г.), а несколько позднее были подготовлены и опубликованы атласы, освещающие режим ветрового волнения во всех океанах и неарктических морях.

В конце 1960-х — начале 1970-х годов ученые ГОИНа приступили к исследованию процессов химического загрязнения и самоочищения вод морей и океанов. На первом этапе, естественно, изучалось антропогенное загрязнение и его последствия в прибрежных, наиболее загрязненных районах Мирового океана. Было установлено, что в этих районах до 10 % акватории покрыты нефтяными пленками, были даны приближенные оценки воздействия нефтяного загрязнения на тепловой баланс Атлантического океана. Экспедиции по изучению загрязнения в морях и океанах всегда носили комплексный характер, что давало возможность не только анализировать полученные данные, но и существенно пополнять базу океанографической информации.

Наиболее ярко комплексный характер исследования процессов, связанных с антропогенным загрязнением океана, проявился в работах по проекту „Абиссаль”. В связи с заявкой СССР на обычу ЖМК в тропической зоне Тихого океана у разломов Клайон и Клиппертон по решению ООН за СССР был закреплен потенциальный район их добычи площадью 75 тыс. км², в основном находящийся в границах квадрата 10—15° с.ш. и 30—135° в.д. Государственный океанографический институт был определен в качестве головного научного учреждения по организации и проведению исследований, связанных с выявлением возможных негативных воздействий на среду. В рамках того проекта в период с 1984 по 1989 г. ГОИНОм совместно с ВНИГМИ было организовано 14 океанских экспедиций. В результате в пределах выделенного района и прилегающих к нему экваторий выполнено свыше 2 тыс. глубоководных гидрологических станций с измерениями физических, химических и биологических характеристик вод. С целью получения данных о реальном распределении скорости течений и определения характе-

ристик, необходимых для расчета динамических нагрузок в 5-километровый трубопровод добывающего комплекса, в период с 1984 по 1989 г. в выделенном районе были проведены комплексные океанографические исследования с автономным измерением скорости течений от поверхности до придонного горизонта. Продолжительность измерений на станциях достигала нескольких недель. Также был выполнен большой объем метеорологических и специальных гидрологических наблюдений, связанные с организацией внешнего мониторинга состояния морской среды в районе добычи. В результате проведенных работ в ГОИНе ДВНИГМИ были созданы специализированные банки региональных океанографических данных. На основе этих банков был подготовлен и передан разработчикам океанотехники научно-технический паспорт основных метеорологических, гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических характеристик районов добычи ЖМК. Научные результаты этих работ изложены в двух коллективных монографиях (1990 и 1991 гг.) и многочисленных статьях в периодических изданиях.

Начиная с середины 1970-х годов в ГОИНе и ДВНИГМИ проводились работы по созданию современных банков океанографических данных.

В настоящее время в ГОИНе и ДВНИГМИ в основном завершено создание банков гидролого-гидрохимических данных Мирового океана, что позволило приступить к анализу больших объемов исходной информации и изучению климатических изменений в верхнем деятельном слое Мирового океана.

Современные океанографические исследования ГОИНа ДВНИГМИ направлены преимущественно на анализ и обобщение массивов гидролого-гидрохимических данных с привлечением спутниковой информации.

Большой вклад в исследования океанов, морей и процессы взаимодействия океана и атмосферы внесли Н. Н. Зубо, В. В. Тимонов, Г. С. Иванов, Н. Н. Лазаренко, А. А. Юца, Б. Л. Лагутин, А. И. Фельзенбаум, А. А. Рыбников, А. И. Соркин, В. Л. Цуриков, И. В. Привалова, Б. Х. Глуховский, Г. М. Таубе, Н. Б. Мерцалова, В. М. Грузинов, В. Б. Лапшин, Н. С. Линейки, А. М. Муромцев, Л. Ф. Титов, А. И. Дуванин, И. М. Соски, Т. И. Супранович, И. Н. Давидан, И. С. Бровиков, Г. В. Ржеплинский, В. А. Рожков, Ф. С. Терзиев, С. С. Лапшо, С. К. Гуле

А. И. Симонов, С. Г. Орадовский, С. В. Кирьянов, А. М. Баталин, А. А. Ющак, А. Д. Нелезин, Е. И. Ластовецкий, В. В. Покудов, Г. П. Якунин, Ю. Н. Волков и многие другие сотрудники ГОИНа и ЦВНИГМИ.

Исследования морских устьев рек в России

Устьевая область реки — это особый географический объект, хватающий район впадения реки в водоем (океан, море, озеро), имеющий специфическое строение, ландшафт и режим, урмирующийся под воздействием устьевых процессов: динамического взаимодействия и смешения вод реки и водоема, отложения и переотложения речных и частично морских наносов, риводящего к образованию устьевого конуса выноса, а часто и ельты.

Экономическое и экологическое значение морских устьев рек благодаря их особому географическому положению между екой и морем и богатым природным ресурсам очень велико. Они вляются объектами с благоприятными гидрохимическими и идробиологическими условиями, способствующими их большой иопродуктивности. Дельты рек имеют плодородные почвы, бо- атую растительность и фауну. Именно здесь в наибольшей мере казываются негативные последствия изъятия и зарегулирова- ния стока рек, изменения режима моря, загрязнения вод.

Наука об устьях рек стала междисциплинарной: в ее разви- ии тесно переплелись подходы и методы геологии, геоморфоло- ии, океанологии, гидрологии. В соответствии с этим формирова- ись основные направления в изучении устьев рек: геоло- о-геоморфологическое, почвенное и гидрологическое. Последнее гало наиболее важным, так как гидрологические процессы яв- яются определяющими в формировании устьев рек как геогра- ических объектов.

Итоги исследования устьев рек на конец 1950-х годов были одведены И. В. Самойловым в книге „Устья рек” (1952), где первые изложены гидролого-гидрографические закономерности ормирования устьев рек.

В 1954 г. в ГОИНе впервые было организовано научное подразделение устьевиков-гидрологов (лаборатория морских устьев рек) под руководством С. С. Байдина.

В этот же период в устьях крупных рек Гидрометслужбы стали создаваться специализированные подразделения: устья гидрометеорологические станции с сетью прикрепленных к ним гидрологических и морских постов.

Хорошо продуманная и централизованная система исследований устьев рек была создана в очень короткие сроки с двумя основными целями: во-первых, для изучения еще слабо исследованных гидролого-географических условий устьев рек и определяющих их процессов, а во-вторых, для удовлетворения быстро растущих запросов народного хозяйства по комплексному использованию и охране водных ресурсов устьев рек, в частности по научному обеспечению водотранспортного освоения и сельскохозяйственных и рыбохозяйственных мелиораций устьев рек Волги, Терека, Кубани, Дона, Днепра, Дуная, Амударьи и др. Созданная в 1960—1970-е годы государственная служба и следования устьев рек под руководством ГОИНа — явление уникальное.

Специалистами-устьевиками ГОИНа, ААНИИ, устьевых станций гидрометеорологических обсерваторий (ГМО) выполнены широкомасштабные региональные исследования по устьям рек Волги, Терека, Сулака, Урала, Куры, Дуная, Амура, Днепра, Дона, Кубани, Западной Двины, Невы, Северной Двины, Мезени, Оби, Пура и Таза, Енисея, Яны, Индигирки, Амударьи и др. Получены новые данные о закономерностях процессов, формирующих режим, морфологические и экологические условия устьев рек. По устьям крупных рек подготовлены монографии гидролого-географического характера. Их отличает комплексность и широкий географический подход. Многие из них были выполнены по разработанной еще в 1950—1960-е годы в ГОИНе схеме рассмотрения основных гидролого-географических проблем устьев рек. Большинство работ преследовало практические цели и содержало научные рекомендации по комплексному использованию и охране водных ресурсов устьев рек.

В 1950—1980-е годы Гидрометслужба большое внимание уделяла производству экспедиционных работ в устьях рек нашей

страны. В конце 1970-х годов в ГОИНе была организована Морская устьевая гидрологическая экспедиция во главе с А. Б. Закинским, в задачу которой входило проведение экспедиционных работ в устьевых областях рек севера европейской части страны, на Азовском и Каспийском морях.

Экспедиция состояла из трех отрядов: Московского (руководитель В. Ф. Полонский), который выполнял работы в устьях рек Северной Двины, Печоры, Онеги и Мезени; Севастопольского (руководитель В. Б. Андрищенко), проводившего экспедиционные работы в устьях рек Дуная, Дона, Кубани, Днепра, Южного Буга и малых рек Азовского моря совместно с устьевыми станциями и ГМО; Астраханского (руководитель И. Е. Егоров, затем А. Н. Зайцев), который выполнял экспедиционные работы в дельте Волги и на Северном Каспии совместно с Астраханской ГМО. В этот период ГОИНОм совместно с устьевыми станциями и ГМО были выполнены десятки крупных экспедиций в устьевых областях рек, материалы которых легли в основу выявления антропогенных изменений в изучаемых областях и решения задач рационального использования их природных ресурсов в интересах народного хозяйства страны.

В 1960—1980-е годы в ГОИНе активно проводилась работа по подготовке высококвалифицированных кадров по гидрологии и гидрохимии устьев рек.

Созданная в Москве (ГОИН, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (МГУ)) на основе указанных выше принципов школа устьевиков завоевала авторитет как в России, так и за рубежом.

В рамках комплексного гидролого-морфологического подхода к изучению устьев рек в ГОИНе совместно с МГУ разработаны теория дельтообразования и гидролого-морфологических процессов в дельте и на устьевом взморье и основы теории динамического взаимодействия и смещения вод реки и моря, создана и применена к устьям рек система гидродинамических, гидравлических и гидролого-морфометрических методов расчета. Изучены закономерности и предложены приемы исследований и расчета колебаний уровня воды в устьях рек (стоковых, приливных, гонно-нагонных), заливания дельт, распределения расходов воды и наносов по дельтовым водотокам, формирования гидро-

графической сети дельт, их морского края, устьевых баров и дн устьевого взморья, а также смешения речных и морских вод проникновения осолоненных вод в реки, применения гидрохимического режима устьев рек.

Эти и другие методы организации и проведения исследований и наблюдений и методы расчетов в устьях рек были отражены подготовленных в ГОИНе „Руководстве устьевым станциям (1951), „Руководстве по гидрологическому исследованию морских устьев рек” (1965), „Руководстве по гидрологическим исследованиям в прибрежной зоне морей и устьях рек при инженерных изысканиях” (1972), „Руководстве по расчету элементов гидрологического режима в прибрежной зоне морей и в устьях рек при инженерных изысканиях” (1973). В последнее время изданы также „Методические указания. Гидрологические наблюдения и работы на гидрометеорологической сети в устьевых областях рек” (1992).

Все эти проблемы освещены также в ряде монографических работ.

В последние десятилетия сведения о гидрологических характеристиках в устьевых областях крупных рек даются во всех гидрологических справочниках и режимных монографиях по морям страны, в изданиях Государственного водного кадастра.

Антропогенные нагрузки на устья рек с ростом их хозяйственного использования непрерывно увеличиваются, что ведет к ухудшению состояния этих районов и нередко к необратимым изменениям их режима и облика. Поэтому нельзя забывать о сохранении этих неповторимых природных объектов и необходимости постоянного мониторинга их состояния.

Наиболее существенные результаты исследований устьев рек отражены в работах И. В. Самойлова, С. С. Байдина, Н. А. Скриптунова, А. И. Симонова, В. М. Михайлова, Г. Н. Ган, Ю. В. Лупачева, В. Ф. Полонского, Н. А. Родионова, М. И. Костяницына, М. М. Рогова, Т. А. Макаровой, М. И. Зотина, С. С. Ходкина, В. Г. Симова, В. С. Антонова, В. В. Иванова, Ю. В. Налимов, Б. С. Штейнбаха, О. К. Тленбекова, В. Ф. Линберга, Н. Ф. Вагина, В. В. Ромашина, А. А. Иванова и др.

Гидрохимические исследования на морях и океанах

В 1950-е годы заведующим лабораторией химии моря ГОИНа был Л. К. Блинов, который занимался изучением Аральского моря, но главной задачей его жизни стала организация морских гидрохимических исследований в системе Гидрометслужбы. Изданное в 1959 г. „Руководство по методам морских гидрохимических исследований” (под его редакцией) в течение 18 лет являлось основным методическим пособием для гидрохимиков Гидрометслужбы. В 1960-х годах Л. К. Блинова на его посту сменил другой выдающийся океанолог-гидрохимик — А. И. Симонов. При нем Гидрометслужба начала заниматься актуальнейшей проблемой современности — изучением химического загрязнения морской среды, сбором и обобщением информации, поступающей в ГОИН с гидрометеорологической сети, изданием „Ежегодника качества морских вод”. Многочисленные экспедиции на морях России, в Атлантическом, Тихом и Индийском океанах позволили собрать и обобщить огромный фактический материал о загрязнении морской среды.

Позднее, в 1970-х годах, были разработаны и применены современные физико-химические методы анализа, изданы „Руководство по методам химического анализа морских вод” (1977) и „Руководство по химическому анализу морских вод” (1993).

Государственному океанографическому институту принадлежит ведущая роль в капитальных научных исследованиях закономерностей гидрохимических процессов в морях и в устьях рек, формирования химического состава вод в зонах смешения различного происхождения, эволюции химического состава морских вод под влиянием антропогенной деятельности. Создана теория формирования вод взморья, существенно развита теория водного и солевого баланса, баланса биогенных веществ и кислорода в замкнутых и полужамкнутых морях, водо- и солеобмена в море. Наиболее полно эти вопросы отражены в монографиях „Гидрология и гидрохимия вод взморья” (1969), „Современный и перспективный водный и солевой баланс южных морей СССР” (коллектив авторов, 1978).

Под руководством ГОИНа были развернуты работы по изучению процессов химического загрязнения и самоочищения вод морей (с 1966 г.) и океанов (с 1971 г.). Планомерные исследова-

ния позволили развить методологию и теорию этой отрасли океанографии, создать и усовершенствовать методы химических анализов, наблюдений и обобщений. Впервые в институте сформулирована сущность океанографических аспектов охраны вод морей и океанов. С 1974 г. ГОИН являлся головной организацией по проблеме „Загрязнение морей и океанов”, в рамках решения которой осуществлялись проекты ГИЗМ (1976—1985 гг.) и „Среда” (1968—1995 гг.). Результаты фундаментальных исследований этого направления изложены в восьми томах монографии „Проблемы химического загрязнения вод Мирового океана”.

Институт руководил созданием на морях сети наблюдений и контроля за загрязнением морских вод, деятельность которой осуществляется силами УГМС. В 1978 г. ГОИН приступил к планомерной разработке методического обеспечения химического мониторинга загрязнения океана.

Ежегодно с 1966 г. публикуется „Обзор химического загрязнения морей СССР”, с 1982 г. — „Ежегодник качества морских вод по гидрохимическим показателям”, „Обзор фоновых уровней загрязнения окружающей среды СССР (России)” (ГОИН — ответственный за морскую часть). Эти материалы дают возможность хозяйственным организациям оперативно планировать и проводить природоохранные мероприятия.

В институте особое внимание уделялось изучению загрязнения морей и океанов по гидробиологическим показателям. В результате большой научно-организационной работы во всех морских УГМС созданы гидробиологические лаборатории или группы. Исследования выявили серьезные последствия экологического и гигиенического характера, связанные с накоплением элементов морских экосистем полициклических канцерогенных углеводородов и соединений мутагенного характера.

В 1980-х годах в связи с усилением техногенной нагрузки на Мировой океан особую актуальность приобрела проблема изучения воздействия загрязнения морской среды на теплообмен (включая газообмен) в системе океан—атмосфера.

Возникла проблема создания физической модели обмена океана с атмосферой теплом, влагой, кислородом и двуокисью углерода в условиях загрязненного поверхностного слоя океана. В результате исследований, проведенных ГОИНОм, выявлена анормальная зависимость поверхностной вязкости и натяжения о

температуры, существенно уточняя зависимости тепло- и массообмена в верхнем слое океана. Впервые создана численная модель гравитационно-капиллярного конвективного переноса тепла, влаги, нейтральных газовых компонентов, включая кислород и углекислый газ, через поверхность атмосфера—океан при наличии поверхностно-активных веществ на границе раздела и в жидкой части межфазной зоны.

Решение вопросов захоронения в море грунта, выбранного при дноуглубительных работах, отходов промышленности, сточных вод, строительного мусора, твердых отходов, взрывчатых и химических веществ, радиоактивных отходов вызывает большие трудности.

К 1990 г. был усовершенствован метод расчета концентрации загрязненных веществ, образующихся при сбросе грунта в море. Метод внедрен во многих организациях.

Доведен до практического использования оптимизационный метод, основанный на применении расчетных схем и позволяющий выбрать районы сбросов загрязненного грунта в море с учетом реальных условий. Подготовлены такие документы, как „Руководство по организации наблюдений за проведением работ и выдачи разрешений на сброс в море с целью захоронения” (1984) и „Правила выдачи разрешений на сброс в целях захоронения в море отходов...” (1984), которые за последние годы были усовершенствованы и в 1991 г. переизданы.

В 1987—1990 гг. перед ГОИНОм была поставлена сложная задача — провести комплексные исследования океанографических, метеорологических и экологических условий в перспективных районах освоения минеральных ресурсов в Мировом океане.

По результатам экспедиционных работ ГОИНа и ДВНИГМИ подготовлен Атлас основных гидрометеорологических характеристик Западного района Тихого океана, подготовлен и передан заказчику (Мингео) гидрометеорологический и экологический паспорт Тихоокеанского испытательного полигона (район разломов Кларион и Клиппертон), содержащий режимные гидрометеорологические и экологические характеристики. Разработана тридонная самовсплывающая буйковая станция, осуществлены шесть успешных постановок таких станций в районе указанного полигона продолжительностью от двух суток до двух месяцев с измерением течений от 5 до 55 м от дна. Была определена верти-

кальная химическая структура вод района по изменчивости гидрохимических характеристик, обнаружена сезонная консервативность положения раздела водных масс. Специалисты оценили последствия сброса в периоды вихреобразования. Установлено, что в период образования Северо-Пассатного течения, связанного с динамической неустойчивостью вод, весьма спорным является принятое утверждение о том, что ниже слоя скачка плотности можно сбрасывать пульпу.

С 1960-х годов ГОИН и ДВНИГМИ осуществляли разноплановое международное научно-техническое сотрудничество в области охраны и мониторинга загрязнения морской среды, что значительно повысило их авторитет.

Существенный вклад в изучение гидрохимии морей и океанов и их антропогенного загрязнения внесли работы Л. К. Блинова, А. И. Симонова, С. Г. Орадовского, А. П. Цуриковой, В. Ф. Шульгиной, Б. М. Затучной, А. С. Пахомовой, А. И. Рябилина, А. В. Цыбань, И. А. Шлыгина, Е. В. Борисова и др.

Исследования шельфа

К исследованию шельфовых зон морей, направленному на обеспечение освоения природных ресурсов их акваторий, ГОИН приступил в 1950-х годах в рамках работ, связанных с первыми морскими нефтепромыслами на Каспийском море. Позднее, в конце 1960-х годов, институт, опираясь на научный прогноз развития гидрометеорологических исследований морей, приступил к их планомерному изучению. Исследования проводились поэтапно: сначала изучались прибрежные воды, а затем — области открытого моря.

До недавнего времени исследования морей ограничивались статистическим обобщением материалов судовых наблюдений: наблюдений на сети рейдовых и прибрежных станций. Основная задача гидрометеорологии сводилась к обеспечению режимной оперативной информацией морского гидротехнического строительства, мореплавания и рыболовства. В дальнейшем проблемы освоения природных ресурсов морей и в первую очередь их шельфовой зоны потребовали иного качественного и количественного уровня гидрометеорологической информации.

С 1974 по 1980 г. работы велись по плану, согласованному с Мингео, Миннефтепромом, Мингазпромом. Программа этих работ была ориентирована на удовлетворение потребностей указанных ведомств в гидрометеорологических данных, необходимых для обеспечения всех видов планирования, технико-экономического обоснования и проведения разведочно-поисковых работ.

Дальнейший прогресс в исследованиях шельфовых зон мог быть достигнут при развитии и совершенствовании существовавших и разработке новых теоретических методов и технологических приемов и средств (компьютерные системы, суда и океанографические приборы, методы обработки и анализа информации, гидродинамические и статистические модели, ИСЗ и аппаратура дистанционного зондирования).

Оценивая современную информационную освещенность гидрометеорологического режима шельфовой зоны морей России, следует, к сожалению, признать ее неудовлетворительной. Это объясняется, во-первых, громадной протяженностью шельфовой зоны и большими трудностями в организации регулярных многолетних наблюдений на ее акватории, во-вторых, нерепрезентативностью некоторых морских гидрометеорологических станций. Кроме того, поступающей с этих станций информации недостаточно для описания опасных, но редких явлений, которое требует меньшей временной дискретности наблюдений и большей продолжительности ряда.

Работы на открытых пространствах шельфовой зоны (в первую очередь разведка и добыча нефти и газа) потребовали создания новых автоматизированных методов определения характеристик редкой повторяемости основных элементов гидрометеорологического режима в районах, слабо освещенных или совсем не освещенных наблюдениями, а также на открытых акваториях пельфа морей.

В последние годы в ГОИНе разработана технология оценки режима основных элементов морской среды, включая характеристики редкой повторяемости, для шельфовой зоны евразийских морей. Эта технология включает: 1) модели и методы расчета указанных характеристик гидрометеорологических величин в мезомасштабном и синоптическом интервалах времени; 2) вероятностные модели гидрометеорологических явлений, включая редкие события. В целом эта технология соответствует уровню

мировой науки и по своему функциональному назначению аналогична подобным разработкам в Великобритании для Северного моря и в США для Атлантического океана.

Особо важное место в изучении гидрологического режима морей занимают работы по исследованию приливных явлений для обеспечения мореплавания и освоения прибрежных акваторий. В этих вопросах ГОИНу принадлежит национальный приоритет. Благодаря трудам А. И. Дуванина, В. В. Тимонова, И. М. Соскина, К. К. Дерюгина, Г. Д. Совершаевой, Л. Н. Сгибневой, Г. Ф. Сафронова, Б. Л. Лагутина, Е. И. Ластовецкого были разработаны методики расчета приливных уровней и течений, позволившие обеспечить судоходство навигационными пособиями для мореплавания.

Основным практическим выходом исследований приливных явлений в ГОИНе и ДВНИГМИ, ведущих предвычисление приливов по единой, разработанной в ГОИНе методике, стали Таблицы приливов и приливных течений. Эти издания служат штатными навигационными пособиями для всех военных, промысловых и пассажирских судов отечественного флота при плавании в морях с приливами. Они необходимы для функционирования портовых служб, гидротехнического строительства и любой другой деятельности человека в прибрежных водах и на шельфе морей. Заказчиком и издателем этих пособий выступает Главное управление навигации и океанографии. Таблицы приливов для российских и зарубежных вод выпускаются ежегодно с 1944 г. общим тиражом около 35 тыс. экз. В настоящее время ведутся работы по развитию методов анализа и расчета приливных характеристик, совершенствованию формы выпускаемых пособий, переходу на электронные справочные пособия.

Ветровое волнение

Вскоре после организации ГОИНа в нем были начаты исследования ветрового волнения. Толчком к их развитию послужили три обстоятельства.

Первое из них — недавно закончившаяся Великая Отечественная война, в ходе которой развернулись жестокие сражения на морях и океанах, зачастую в штормовых условиях. Особенно трудными были операции флота, проводимые на Тихоокеанской

театре военных действий, где они осложнялись влиянием волн на корабли в тропических ураганах.

Первый научно обоснованный способ расчета и прогнозирования волн был создан в 1947 г. американскими специалистами Манком и Свердрупом.

Вторым обстоятельством стало начало нефтедобычи (в Мексиканском заливе с 1947 г., год спустя — на Нефтяных Камнях в Каспийском море).

Третье обстоятельство заключалось в том, что, как оказалось при решении практических задач, гидродинамические теории регулярных волн и другие теории не могли объяснить особенности процессов развития реальных, наблюдаемых в природе ветровых волн.

Основной послевоенных методов расчета ветровых волн явилось уравнение баланса волновой энергии, оно было сформулировано в 1937 г. немецким ученым Мотцфельдом и одновременно в более общей постановке советским ученым В. М. Маккавеевым. На основе этого уравнения Ю. М. Крылов в ГОИНе разработал статистическую теорию ветровых волн и соответственно первый энергетический метод их расчета (1956, 1958 гг.), который позднее был оформлен в виде руководства (1969). Изложенные в нем методы позволили в сочетании с функцией распределения параметров волн, полученной Ю. М. Крыловым, Б. Х. Глуховским, Я. Г. Виленским (1953, 1956, 1960), находить высоты, периоды и другие характеристики волн различной обеспеченности. Для мелководных морей аналогичные методы были созданы И. С. Бровиковым (1954). Функция распределения высот волн в прибрежной зоне, найденная в эти годы Б. Х. Глуховским по результатам измерений в Каспийском море довольно грубым прибором — датчиком придонного давления, до сих пор неизменно используется повсеместно в России и за рубежом.

Другой аспект проблемы — создание приборов для измерения волн. В 1950-е годы Я. Г. Виленским и Б. Х. Глуховским были сконструированы судовой волнограф открытого моря (ВОМ), радиоволнограф, прибрежные и струйные датчики и др. С помощью ВОМ и других приборов были выполнены тысячи измерений в морях и океанах. Анализ их результатов, основанный на теории размерностей, выборочном методе математической статистики и законе больших чисел, позволил найти зависимости эле-

ментов ветровых волн от основных определяющих их факторов — скорости ветра, разгона и времени действия ветра. Существенно, что эти зависимости, полученные отдельно от зарубежных исследователей, дают высоты волн при одинаковых условиях волнообразования примерно на 10 % меньше, чем в океанах (по данным американского нормативного документа 1966 г.). Названное отличие объясняется тем обстоятельством, что в океанах всегда присутствует фон зыби, при наличии которого генерация волн идет ускоренным темпом и они растут быстрее. Полученные в ГОИНе зависимости послужили основой для создания способа расчета волн в нормативном документе по проектированию гидротехнических сооружений (СНиП 2.06-04.82). В дальнейшем метод расчета волн ГОИНа — Союзморниипроекта был обобщен на случай реальных природных условий, когда расчеты осуществляются с использованием последовательности синоптических карт (интегрально-параметрический метод МАК, Г. В. Матушевский, И. М. Кабатченко, 1989, 1991).

С конца 1950-х годов вслед за зарубежными специалистами в ГОИНе по инициативе Ю. М. Крылова были начаты исследования ветровых волн в рамках спектрального подхода к изучению нерегулярных физических процессов. Этот подход базируется на гидродинамической теории волн, принципах спектрального и вероятностного анализа случайных процессов. Специалистами института исследовалась спектральная и вероятностная структура ветрового волнения на различных стадиях развития волн, угловое распределение энергии и другие характеристики.

В дальнейшем это направление исследований волн стало в институте преобладающим.

С 2000 г. в ГОИНе были начаты работы по реализации новой гидродинамической модели волнения В. Е. Захарова — М. М. Захарова (модель узконаправленного приближения, обоснованная в ИО АН в 1980-е годы) в виде численной ее версии, пригодной к выполнению расчета волн в реальных гидрометеорологических условиях. В отличие от всех предложенных ранее зарубежных моделей, в ней решение ведущего уравнения достигается строгим способом (для простых условий волнообразования). Корректность такого подхода была проверена путем анализа всех известных в литературе данных (более 40 тыс.) об угловом распределении энергии в направленном спектре ветровых волн

Г. В. Матушевский, И. М. Кабатченко, 2003). Для реальных условий волнообразования созданы численные алгоритмы расчета. В июле 2001 г. этой разработке решением научно-технического совета Росгидромета был придан статус национальной (российская атмосферно-волновая модель — РАВМ). Ее верификация была осуществлена в Гидрометцентре России З. К. Абузаровым, где она используется (наравне с моделью МАК) для прогноза волн в Северной Атлантике.

В климатическом масштабе времени исследования велись начиная с 1950-х годов, когда они стали актуальными в связи с развитием океанского мореплавания, судостроения и др. Капитальную работу в этой области выполнил Г. В. Ржеплинский (1972), обосновавший метод расчета режимных (климатических) характеристик волн. Этот метод включал в себя как расчеты волн по инновационным картам, так и упрощенные способы на основе связи высот волн со скоростью ветра и их режимных функций распределения. При этом учитывался фон зыби, не связанный с ветром. Итогом такого рода исследований явилось издание атласов волн и ветра всех океанов — Атлантического (Ржеплинский, 1967), Тихого (Иконникова, 1968) и Индийского (Сиротов, 1968).

В 1970 г. эти работы были удостоены премии им. Ю. М. Шокальского.

В последние годы совершенствовались и систематизировались способы определения характеристик ветра и волн двух групп — частой повторяемости (фоновые, „повседневные”) и редкой повторяемости (экстремальные, расчетные). Для последних расчеты осуществляются в рамках модели РАВМ с учетом взаимной зависимости ветровых волн.

В целом за несколько последних десятилетий силами специалистов института был создан комплекс аэрогидродинамических моделей приводного ветрового потока и ветрового волнения в инертивном режиме. Комплекс позволяет получать характеристики ветра и волн во временном интервале от десятков минут до десятков лет и в пространственном масштабе от глубокого моря до прибойной зоны.

С использованием моделей ветра и волн были освещены гидрометеорологические условия для проектирования инженерных сооружений в российских и зарубежных водах.

В последние годы в СПО ГОИНе разработан метод расчета экстремальных характеристик ветрового волнения с учетом коррелированности выборок высот волн в синоптические сроки (метод „Бульвар“). Он основан на использовании совместного распределения квантилей высот волн с последующим определением события, возможного 1, 2, 3 и более раз в заданное число лет. В отличие от методов, принятых в практике прикладных расчетов предложенный метод позволяет корректно учитывать зависимость между экстремумами волн и, кроме того, рассчитывать не только первый максимум, возможный в заданное число лет, но и второй, третий и другие последующие максимумы.

В СПО ГОИНе для описания устойчивых состояний и продолжительности экстремальных условий разработана и применена для практических расчетов модель последовательности случайных импульсов относительно заданного порогового уровня. Она позволяет воспроизвести последовательность штормов и „око хорошей погоды“, обладающих сезонной и межгодовой изменчивостью. Модель дает возможность перейти к качественно новому описанию экстремальных волн с учетом их связности, устойчивых состояний, их продолжительности и повторяемости по сезонам.

Термохалинные и ледовые процессы

Методика решения проблемы термохалинной структуры шельфовых морей состоит из двух частей: экспериментальной и теоретической. Основная задача последней — выявление общих закономерностей формирования термохалинного режима шельфовых морей, построение на их основе гидродинамических моделей соответствующего пространственного и временного разрешения, адекватно воспроизводящих такие процессы, как сезонный ход основных океанологических полей, включая ледовитость, положение кромки льда, замерзание морской воды и образование начальных форм льда, взаимодействие пограничных слоев (верхнего и придонного), смещение материковых и морских вод, формирование мезомасштабных фронтальных зон (приливных стоковых, апвеллинговых), обмен теплом, импульсом и солями на жидких и твердых границах, в том числе и на кромке льда

Связующим звеном этих двух частей является база данных, которая включает в себя всю доступную историческую, режимную и оперативную гидрометеорологическую информацию по исследуемым регионам. К настоящему времени выполнено численное моделирование термохалинной структуры Баренцева, Белого, Охотского, Средиземного и Южно-Китайского морей. На основе оценок составляющих теплового баланса и численного моделирования определен вклад локального перемешивания и горизонтальной адвекции тепла и солей в процесс формирования зonalных океанологических полей деятельного слоя. Регулярные наблюдения в морях велись на судах ГОИНа и ДВНИГМИ, а также поддерживались наблюдениями на сети Росгидромета.

Для описания сезонного режима вод использовалась гидродинамическая модель деятельного слоя океана (ДСО), учитывающая такие факторы, как турбулентное перемешивание в верхнем вазииоднородном слое, придонное трение, перенос тепла и солей течениями, нарастание и таяние морского льда.

На основе результатов моделирования термохалинной структуры в перечисленных выше морях, лежащих в различных климатических поясах, сделан вывод о том, что в среднем на площади, составляющей 75 % акватории, ошибки в расчетах температуры верхнего слоя не превышают $0,5^{\circ}\text{C}$. Изменчивость солёности в течение года (за исключением устьевых взморьев) лежит в пределах 1,0—1,5 % и на площади, составляющей 70—80 % акватории, ошибки расчетов не превышают 0,1 ‰. В тех случаях, когда формирование термохалинной структуры определялось мезанализами, учтенными в модели (локальное перемешивание, горизонтальная адвекция тепла и солей вне пограничных районов), получено достаточно хорошее согласие рассчитанных полей фактическими данными. Там, где важную роль играют такие процессы, как приливное перемешивание, тепловой и пресноводный сток рек, водообмен с соседними бассейнами, результаты не столь обнадеживающие. Частично влияние этих процессов учитывается дополнительными слагаемыми в уравнениях модели параметризацией придонного перемешивания и более точными граничными условиями на жидких границах (заданием стока рек, до- и теплообмена с соседними бассейнами).

Наиболее значительными исследованиями в этом направлении являются работы Ю. М. Крылова, Л. Ф. Титова, И. Н. Дави-

дана, Г. В. Матгушевского, В. И. Калацкого, Б. Х. Глуховского, Б. Л. Лагутина, В. Х. Германа, В. В. Тимонова, С. П. Левиков, В. А. Рожкова, Г. В. Ржеплинского, А. В. Бухановского, А. С. Васильева, О. И. Зильберштейна, А. С. Цвезинского.

Развитие дистанционных методов измерений и спутниковой океанографии

Дистанционные методы измерения океанографических параметров разрабатывались в ЛО ГОИНа с 1961 г., где была организована лаборатория аэроокеанографии.

В 1968 г. специалистами лаборатории аэроокеанографии совместно с сотрудниками Ленинградского института точной механики и оптики (ЛИТМО) был создан экспериментальный образчик инфракрасного (ИК) радиометра ЭИР-68, который предназначался для выполнения дистанционных измерений температур воды с судна.

Были завершены работы по созданию самолетного образчика ИК-радиометра („Мир-3”). В 1975 г. создана серия этих приборов и внедрена в практику работ морских УГМС, проработаны варианты оснащения самолета радиобатитермографами разового действия.

В 1971 г. под руководством Н. Н. Лазаренко, назначенного директором ЛО ГОИНа, продолжилась деятельность отделения традиционных направлений исследований, в то же время существенно усилилось развитие дистанционных методов зондирования морской поверхности.

В 1977 г. с целью практической реализации дистанционного зондирования была создана полевая экспериментальная база летающей лабораторией, оборудованной на самолете ИЛ-14. В системе учреждений Госкомгидромета в это время существенно уделялось внимание загрязнению природной среды. Ленинградское отделение ГОИНа организовало регулярные сезонные съемки нефтяных загрязнений Каспия, доведенные до выпуска отраслевых бюллетеней, рассылаемых по 80 адресам для заинтересованных организаций. Попутно накапливался опыт проведения термических съемок морской поверхности и льдов прибрежной зоны. Успешно были применены телевизионные съемки для ф

блюдений за динамикой нефтяного пятна, предприняты попытки использования лидара для индикации тонких пленок и мультиспектральной камеры МКФ-6М для определения зон мутности морской воды, ветра, волнения и других характеристик поверхности моря.

Основное внимание лаборатория сосредоточила на интерпретации спутниковой информации — нового вида океанологических натуральных данных, предназначенных для изучения пространственного распределения ледяного покрова, температуры и мутности воды.

Специфика измерений с ИСЗ состоит в том, что регистрируется не искомая океанографическая характеристика, а промежуточный параметр, связанный с ней какой-либо физической зависимостью (причем не всегда однозначной). Отсюда вполне естественное внимание к так называемой опорной (т. е. достоверно легко интерпретируемой, тестовой) информации, в качестве которой были приняты данные авиационных и судовых измерений, полученные в ходе экспедиционных работ на Каспийском и Балтийском морях, а также в Атлантическом океане. Одним из новых направлений работ лаборатории являлось использование спутниковой информации ИК-диапазона в региональной спутниковой океанографии. Космическую информацию о температуре воды получали с ИСЗ США типа NOAA в виде цифровых данных, принятых в режиме непосредственной передачи. В рамках этого направления выполнены следующие работы:

— организация приема и обработки спутниковой информации ИК-диапазона на региональных автоматизированных пунктах приема информации (АППИ), создание макета устройства спутниковой информации, обеспечивающего переход к цифровой информации;

— оснащение НИСП ГОИНа аппаратурой для приема информации с ИСЗ NOAA; научно-методическое курирование работы судовых специалистов-операторов АППИ;

— организация и проведение комплексных подспутниковых океанографических экспериментов на акватории Балтийского моря на основе двустороннего сотрудничества СССР—ГДР; научно-методические работы по планированию управляемого комплексного океанографического эксперимента (КОПЭ) с наведением НИС на океанографический объект.

Результаты выполненных исследований нашли отражение в публикациях: „Комплексный подспутниковый океанографический эксперимент СССР и ГДР на Балтийском море” (1985), „Временные методические рекомендации по приему, обработке и использованию спутниковой ИК-информации по температуре поверхности морей и океанов” (1985), „Руководство по применению аэрометодов в океанографии. Наблюдения за температурой поверхности моря с помощью инфракрасного радиометра” (1986), „Дистанционное определение температуры моря (спутниковые авиационные методы определения температуры поверхности моря по излучению в ИК-диапазоне)” (1988).

Вторым направлением работ лаборатории являлось создание методов спутникового мониторинга загрязнения поверхностных морских вод взвешенными веществами. С учетом региональной специфики акватории разработана оригинальная методика, позволяющая определять концентрации взвешенных веществ в водных массах в восточной части Финского залива. Выполнен цикл исследований по изучению пространственно-временного распределения полей взвешенных веществ в Невской губе в различных гидрометеорологических ситуациях. Результаты этих исследований были широко использованы Международной комиссией экспертов, созданной для изучения экологической обстановки в Невской губе в связи с постройкой сооружений для защиты Ленинграда от наводнений (1990 г.). Начиная с 1980-х годов продолжались традиционные работы по использованию аэрокосмической информации для изучения ледовых характеристик Балтийского моря.

Становление дистанционного зондирования применительно к изучению океана и, в частности, развитие спутниковой океанографии основаны на деятельности многих научных школ и коллективов исследователей, разработчиков и изготовителей аппаратуры и космических платформ. С 1977 г. существовала Всесоюзная программа создания спутниковой системы наблюдения океана. Программа предусматривала разработку спутниковой аппаратуры видимого, ИК- и микроволнового диапазона, а также радиолокационных систем бокового обзора. Для океанографических приложений полезными оказались отечественные радиолокаторы среднего разрешения (типа „Космос-1500”) и высокого разрешения (типа „Космос-1870”), а также системы получ

гия изображений в видимом диапазоне спектра среднего и высокого разрешения. Программа была ориентирована преимущественно на технологический аспект оснащения спутников, при этом слабым звеном оказался наземный сегмент наблюдательной системы, поскольку методическим аспектам обработки информации уделялось недостаточное внимание.

В это же время (1989—1990 гг.) на НИС „Академик Королев” совместно с сотрудниками ЦАО, ДВНИГМИ, ИКИ РАН и Института автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения (ИАПУ ДВО) РАН была запущена судовая станция цифрового приема многоканальной спутниковой информации, передаваемой в режиме HRPT ИСЗ серии NOAA, а также приема и регистрации информации с геостационарного спутника GMS-3.

Специализированные натурные эксперименты с помощью новых наблюдательных систем позволили подробно изучить структуру и динамику развитой конвективной облачности различной масштабности, а подробные океанографические съемки полигонов до и после прохождения тайфунов решали задачу по исследованию следа тайфунов в океане. Наибольший вклад в изучение следа тайфунов в океане внесли В. П. Туноголовец и В. В. Покуцов (ДВНИГМИ).

К моменту распада СССР фактически не удалось создать полноценную действующую спутниковую систему наблюдения океана. Определяющими обстоятельствами на тот момент были: отсутствие регулярной и преемственной отечественной спутниковой информации всех необходимых видов и дефицит технических и программных средств ее цифровой обработки в большинстве океанографических учреждений. При этом отдельные группы ученых демонстрировали свое умение использовать доступную им спутниковую информацию в региональных океанографических проектах, однако они не могли делать это на регулярной основе.

Океанографы в СССР были практически лишены возможности использовать зарубежную спутниковую информацию, за исключением данных спутников типа NOAA, на базе которых была выполнена значительная доля океанографических исследований.

Особо следует остановиться на развитии компьютерных технологий мониторинга основных физических полей морских регионов, использующих первичную спутниковую информацию по

температуре поверхности океана и уровню моря (альтиметрические методы), а также данные подспутниковых калибровочных полигонов.

А. С. Васильевым на основе принципов моделирования вероятностных процессов в классах состояния сложных морских динамических систем, включающих живую и неживую природу, инструментально-теоретического мониторинга состояния среды усвоением спутниковой информации впервые создана адаптивно-обучающаяся технология изучения и прогноза эволюции морских и океанических систем.

Модель, „загруженная” в ЭВМ в виде пакетов программ с информацией о конкретной экологической системе, и операционная система вычислительной машины образуют диалоговую человеко-машинную систему, осуществляющую сбор оперативной и ретроспективной информации, синтез инструментальной и теоретической информации, обучение на распознавание законов поведения прогнозируемого фактора, адаптацию системы на заданные достоверность и точность прогноза, а также прогноз.

Программно-кибернетическая технология реализована в виде системной модели, взятой от автора и передаваемой в региональные гидрометцентры Росгидромета, службы рыбопромысловых прогнозов научно-исследовательских институтов Минрыбхоза организации, ведущие промысловую разведку. Технология прошла успешные испытания на промыслах рыб и беспозвоночных различных регионах Мирового океана и подготовлена для внедрения в оперативные подразделения Росгидромета для использования в прогностических целях.

Большой вклад в развитие аэрокосмических методов внесли работы Н. Н. Лазаренко, С. В. Викторова, В. В. Виноградова, В. Г. Смирнова, В. Ю. Лобанова, А. С. Васильева, П. П. Медведа.

РАЗВИТИЕ НАБЛЮДЕНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

Сельскохозяйственная метеорология, как и гидрометеорология в целом, прошла несколько этапов развития: от качественно-описательного уровня наблюдений, оценок и прогнозов до современных методов наблюдений и физико-математических методов количественного описания процессов и явлений в системе сельскохозяйственный объект—окружающая среда.

В сельскохозяйственной метеорологии традиционно сложилось несколько основных направлений, краткому обзору развития которых посвящена настоящая глава. Более подробно эти направления изложены в коллективной монографии „Развитие сельскохозяйственной метеорологии в России” (2001 г.).

Агрометеорологические наблюдения

Развитие послевоенного сельскохозяйственного производства потребовало новых видов агрометеорологической информации, а следовательно, и новых видов наблюдений за сельскохозяйственными культурами, количество которых постоянно возрастало. В 1948 г. было издано новое „Руководство по производству агрометеорологических наблюдений”. Большой вклад в развитие методов агрометеорологических наблюдений в 1940—1950-е годынесли сотрудники Центрального института прогнозов (ЦИП): А. А. Шиголев, С. А. Вериги, Л. А. Разумова, Ю. И. Чирков, З. А. Моисейчик, А. А. Окушко и многие другие. В значительной мере это происходило под влиянием принятия в стране ряда общегосударственных программ: создания полезащитных и государственных защитных лесных полос, освоения целинных и залежных земель Западной Сибири и Казахстана и т. п.

Многие виды агрометеорологических наблюдений и измерений, такие как температура почвы на глубине залегания узла кущения озимых зерновых культур, структура урожая, биомасса сельскохозяйственных культур, влажность почвы и запасы продуктивной влаги в почве, являются уникальными не только в нашей стране, но и в мире. В результате определения запасов влаги

в почве на сельскохозяйственных полях, включенного в программу наблюдений еще в 1936 г., был создан уникальный банк данных об условиях увлажнения и влагообеспеченности посевов земледельческой зоны страны за последние 60 лет. Росгидромет является единственным в мире ведомством, располагающим таким банком данных.

В 1957 г. все методики агрометеорологических наблюдений впервые были обобщены и изданы в форме „Наставления”. По мере разработки новых методов агрометеорологических наблюдений и их предварительной апробации переиздавались „Наставления гидрометеорологическим станциям и постам”, вып. 11 — „Основные агрометеорологические наблюдения”. Последующие издания этого Наставления были опубликованы в 1963, 1973, 1985 и 2000 гг. Причем наиболее полная программа наблюдений была отражена в Наставлении 1985 г., изданном в двух частях: Часть I — „Основные агрометеорологические наблюдения”, Часть II — „Специализированные агрометеорологические наблюдения”. Над каждым из изданий этого Наставления работал коллектив высококвалифицированных агрометеорологов из Гидрометцентра СССР, ВНИИСХМ, всех региональных научно-исследовательских гидрометеорологических институтов (НИГМИ). Помимо периодически издаваемых Наставлений в помощь наблюдателям сети станций и постов издавались методические пособия, плакаты и брошюры.

В 1963 г. были начаты первые наблюдения за осадками на сельскохозяйственных полях, снежным покровом при снегозадержании, продуктивностью кукурузы в период листообразования, формирования зерна. С этого же года стали применяться методы количественной оценки состояния посевов яровой пшеницы, кукурузы, льна-долгунца и подсолнечника, были введены наблюдения за элементами продуктивности и структурой урожая гороха и кормовых бобов.

Известные ученые-агрометеорологи (С. А. Вериго, Л. А. Разумова, А. В. Процеров, М. С. Кулик, Д. И. Пашко, Е. А. Цубербиллер, Ю. И. Чирков, Е. С. Уланова, В. А. Моисейчик и др.) работали в это время в ЦИП, многие годы являвшемся методическим центром советской агрометеорологии. Много известных агрометеорологов продуктивно работало и в других ведомствах.

По решению центральных партийных органов научные институты сельскохозяйственного профиля переводились из крупных городов на периферию, поближе к районам сельскохозяйственного производства. В частности, по инициативе академика Е. К. Федорова отдел агрометеорологии ЦИП был переведен в г. Обнинск (Калужская область), включен в состав филиала Института прикладной геофизики (май 1964 г.) и стал называться отделом сельскохозяйственной метеорологии. Руководителем отдела был назначен В. В. Синельщиков, являвшийся одновременно заместителем директора филиала Института прикладной геофизики (ИПГ) по научной работе. По существу организация этого отдела явилась первым шагом к созданию будущего Всесоюзного научно-исследовательского института сельскохозяйственной метеорологии (ВНИИСХМ).

Среди ведущих специалистов, составивших творческую основу коллектива отдела сельскохозяйственной метеорологии, были сотрудники ЦИП: М. С. Кулик, Е. А. Цубербиллер, А. А. Окушко, В. П. Пономарев, Б. И. Огородников, С. И. Смирнова, Л. С. Кельчевская, А. Г. Новиков и др., приехавшие из Москвы в г. Обнинск. В 1965 г. в отделе начал свою работу проф. А. П. Федосеев. В последующие годы в состав отдела влилась большая группа энергичных молодых специалистов-агрометеорологов, которые впоследствии возглавили в институте основные научные направления сельскохозяйственной метеорологии (О. Д. Сиротенко, А. Д. Клещенко, А. Н. Полевой, А. Д. Пасечнюк, В. В. Вольвач, В. М. Пасов, В. А. Жуков и др.).

В декабре 1964 г. при филиале ИПГ приказом начальника Главного управления гидрометслужбы (ГУГМС) при Совете Министров СССР была организована Полевая экспериментальная агрометеорологическая база. Ее главными задачами были: проведение полевых и лабораторных экспериментов по широкой программе изучения влияния агрометеорологических условий на рост, развитие и формирование продуктивности основных сельскохозяйственных культур, усовершенствование применяемых и разработка новых методов и средств агрометеорологических наблюдений и измерений, организация агрометеорологического полигона. Для решения этих задач были открыты опорные пункты агрометеорологических наблюдений в поселках Кудино и Суходрев (северные районы Калужской области), в Михай-

ловском (Московская область), на опытных полях Учебного хозяйства Сельскохозяйственной академии имени К. А. Тимирязева. Кроме того, было организовано более 60 агрометеорологических постов, работавших, как и опорные пункты, по специальным программам наблюдений. Руководство всем комплексом экспериментальных работ и наблюдений Полевой базы в различные годы осуществляли Г. Д. Мямлин, Г. И. Панаскин, А. И. Баринов, В. Н. Хомяков, А. П. Погудин, А. Г. Лапин, О. А. Бакарова, В. Г. Павленко. В 1969 г. Полевой экспериментальной агрометеорологической базе было присвоено имя Виктора Васильевича Синельщикова.

Обнинский агрометеорологический полигон, организованный в Калужской области, размещался на площади 3600 км². Большой вклад в организацию уникальных наблюдений на полигоне внесли: В. В. Синельщиков, М. С. Кулик, Е. А. Цубербиллер, Г. Д. Мямлин, А. А. Исаев, И. Е. Вольвач, В. М. Шевчук, О. А. Бакарова, М. В. Еловенко и др., а также многие инженеры и техники-агрометеорологи. Детальные агрометеорологические наблюдения на полигоне в 1966—1972 гг. позволили, в частности, изучить закономерности пространственной статистической структуры полей агрометеорологических элементов и их изменчивость, испытать и рекомендовать к внедрению новые физические методы агрометеорологических измерений, оценить репрезентативность и уровень достаточности агрометеорологической информации, решить ряд новых агрометеорологических проблем (А. П. Федосеев, М. С. Кулик, Е. А. Цубербиллер, А. А. Окушко, А. Р. Константинов, З. А. Шостак, В. В. Вольвач, А. И. Коровин, О. Д. Сиротенко, А. Д. Клещенко, А. Д. Пасечнюк, А. Н. Полевои, В. Ф. Никитин, Н. И. Сальникова, А. Я. Грудева, И. И. Яшкина, О. К. Заброта и многие другие).

В феврале 1968 г. на базе Обнинского филиала ИПГ был организован Институт экспериментальной метеорологии (ИЭМ), в структуре которого был сохранен отдел сельскохозяйственной метеорологии. С момента его организации по 1972 г. включительно заведующим отделом работал проф. А. И. Коровин. В конце 1972 г. отдел сельскохозяйственной метеорологии был реорганизован в сектор сельскохозяйственной метеорологии ИЭМ, в составе которого был ряд отделов по различным направлениям этой науки. Сектор под руководством канд. физ.-мат. наук

Ю. А. Хваленского успешно развивал исследования по основным направлениям сельскохозяйственной метеорологии.

Сектор сельскохозяйственной метеорологии много внимания уделял разработке методов и технических средств агрометеорологических наблюдений (измерений), вопросам точности и репрезентативности наблюдений, методическому руководству агрометеорологическими наблюдениями на сети станций и постов гидрометслужбы страны (А. Д. Клещенко, В. Ф. Никитин, Л. А. Окушко, Б. И. Огородников, С. И. Смирнова, В. Н. Хомяков, В. Ф. Гридасов и др.).

В мае 1968 г. по решению Президиума ВАСХНИЛ в г. Москве была организована Секция агрометеорологии, руководимая проф. Ю. И. Чирковым, объединившая ведущих ученых и специалистов, работающих в области агрометеорологии и смежных наук в институтах Гидрометслужбы, ВАСХНИЛ, в МГУ им. М. В. Ломоносова, а также в республиканских и территориальных управлениях гидрометслужбы и в некоторых институтах академий наук союзных республик.

В 1977 г. по решению Государственного комитета СССР по науке и технике (ГКНТ) на базе сектора сельскохозяйственной метеорологии ИЭМ в г. Обнинске был организован Всесоюзный (с 1992 г. — Всероссийский) научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии (ВНИИСХМ). Его первым директором был назначен канд. биол. наук И. Г. Грингоф, а заместителем директора по научной работе — канд. физ.-мат. наук Ю. А. Хваленский. ВНИИСХМ стал главным научно-методическим центром в области агрометеорологии, головным учреждением в стране в этой области знаний. В институте, в частности, широко развернулись научно-методические работы по совершенствованию всей системы агрометеорологических наблюдений, в частности в секторе сельскохозяйственной метеорологии ИЭМ. Научно-методическое руководство агрометеорологической сетью страны, разработка методов и технических средств наблюдений в сельскохозяйственных полях и пастбищных угодьях сосредоточились во ВНИИСХМ.

За период с 1977 по 2003 г. сотрудники ВНИИСХМ разработали десятки методик наземных и дистанционных агрометеорологических наблюдений и измерений, многие из которых были

внедрены на наблюдательной сети станций и постов, а также использовались в работе аэроспектрометрических экспедиций.

В эти же годы были разработаны, испытаны и внедрены практику наблюдений на сети станций руководства, методические указания, методические пособия, рекомендации по широкому профилю агрометеорологических наблюдений и измерений (В. Н. Хомяков, А. Я. Грудева (Сережина), В. Ф. Гридасов, А. Д. Клещенко, В. И. Рачкулик, В. Ф. Никитин, Н. С. Мальцев, Л. Н. Емельянова, З. Р. Литвинова, А. Г. Лапин, А. Д. Пасечнюк, И. А. Пермьяков, И. Г. Грингоф, В. В. Вольвач, И. И. Яшкина, М. В. Никифоров, Г. В. Шилин, В. Ф. Георгиевский и многие другие).

В начале 1980-х годов в системе Госкомгидромета СССР (ВНИИСХМ, УкрНИГМИ), а также в некоторых других ведомствах были развернуты работы по созданию портативных наземных и дистанционных влагомеров сыпучих сред (почва, зерно и др.) с целью обеспечения ими сетевых наблюдателей-агрометеорологов и агрономов. Было создано несколько различных по принципу действия макетов, лишь часть из которых была доведена до малой промышленной серии („Агротестер”, нейтронный влагомер „Электроника” ВВП-1, ИПП-1 и др.). Ряд работ завершился на стадии макетов: разработки А. Ф. Конова, Х. Р. Набиев, Ю. И. Кузьмина и др. Однако создать универсальный портативный влагомер почвы для массовой сети наблюдений за прошедшие годы не удалось по ряду объективных и субъективных причин. Основным методом определения влажности почвы на сетевых станциях по-прежнему остается трудоемкий и неоперативный, но достаточно точный термостатно-весовой метод.

В последние годы приоритетное развитие получили работы по созданию расчетных методов оценки влагозапасов в почве (О. Д. Сиротенко, Е. В. Абашина, В. А. Долгий-Трач, В. Ф. Гридасов).

В середине 1980-х годов ВНИИСХМ (В. В. Вольвач, Ю. А. Могунов, Е. В. Горбатов и др.) в кооперации с Центром автоматизации и метрологии АН Молдавии (Р. В. Ахметзянов и др.) разработали и изготовили два образца научно-исследовательского агрометеорологического комплекса (НИАК) на базе автомашин УАЗ-431 и ПЭВМ „Электроника-60”. Комплекс был отмечен первой премией Президиума научно-технического общества при-

юстроительной промышленности им. С. И. Вавилова. Комплекс НИАК использовался для микроклиматических градиентных наблюдений при проведении экспедиционных работ в период разработки динамического и теплового способов борьбы с заморозками.

Накопленный при создании комплекса НИАК технический и практический опыт позволил в начале 1990-х годов приступить к созданию автономных микропроцессорных, измерительных, информационно-советующих комплексов, объединяющих базы агрометеорологических данных с базами агрономических знаний.

ВНИИСХМ (В. В. Вольвач и др.) совместно с Центром автоматизации и метрологии АН Молдавии, а с 1995 г. с НПО „Тайфун“ В. Т. Мильченко, А. В. Комаров) был разработан также автономный микропроцессорный комплекс для агроэкологического мониторинга и фитосанитарного прогнозирования — „электронный грометеоролог“ (ЭЛАГР). Результаты испытаний этого комплекса были одобрены Центральной комиссией по приборам и методам Росгидромета.

Предвестником инструментальных дистанционных измерений можно считать аэровизуальные обследования состояния поевов сельскохозяйственных культур и пастбищной растительности. Впервые метод аэровизуальных наблюдений был использован применительно к оценке состояния растительности тундровых пастбищ и был описан еще в 1938 г. в работе З. А. Андреева и А. А. Панфиловского. Позднее этот метод широко применялся для геоботанических исследований в пустынных и полупустынных районах.

Впервые в агрометеорологии аэровизуальный метод применил А. П. Федосеев — для оценки состояния и роста пастбищной растительности в Казахстане. Он также указал, что аэровизуальный метод можно использовать для наблюдений за сельскохозяйственными культурами. К числу первых методических пособий по аэровизуальным агрометеорологическим наблюдениям ледует отнести работы Г. И. Борисоглебского по зерновым культурам, С. А. Бедарева по обследованию пастбищной растительности, а также работы И. В. Свисюка, А. Ф. Власова, В. П. Дмитренко, В. А. Куликова, Н. Ф. Цупенко, Ф. А. Муминова и В. В. Кар-ауховой, Н. С. Турченкова и Б. И. Огородникова.

В 1960—1980-е годы аэровизуальный метод обследования стал широко использоваться для оценки агрометеорологически условий роста и развития посевов сельскохозяйственных культур и естественной пастбищной растительности.

Одна из первых попыток использования аэрофотосъемки для оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур был выполнена в 1969 г. В. М. Мокиевским и Б. И. Огородниковым. Однако в то время этот метод не получил широкого применения из-за отсутствия методов цифровой обработки данных.

Начиная с 1960-х годов для изучения состояния подстилающей поверхности (в первую очередь почвы и растительности) стали широко применяться методы, основанные на измерении спектральных отражательных характеристик объектов в различных участках спектра электромагнитного излучения. Применительно к растительности пионерами в этой области были К. Я. Коздрачев, Н. Г. Харин, Б. В. Виноградов, Ю. К. Росс, А. Ф. Чуновский, В. И. Рачулик.

В середине 1960-х годов широкое применение в Гидрометеослужбе получил так называемый аэрофотометрический метод определения параметров растительного покрова, предложенный сотрудниками САНИГМИ В. И. Рачуликом, М. В. Ситниково и И. П. Беляевой, основанный на измерении спектральных коэффициентов энергетической яркости в двух участках электромагнитного спектра подстилающей поверхности. Большой объем исследований по разработке методов оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур и почв на основании измерения спектральных коэффициентов энергетической яркости в различных участках электромагнитного спектра в разных регионах СССР был также проведен А. Д. Клеценко, П. П. Федченко, В. А. Коваленко, О. В. Вирченко, А. Ф. Коновым, А. В. Бондрем, В. М. Мокиевским, В. Н. Орловым, Г. Л. Тимошенко, А. П. Черным, Л. В. Лебедь и др.

В этот период был разработан способ дистанционного (самолетного) определения запасов воды в снежном покрове и в верхнем слое почвы на основании измерения естественного гамма-излучения подстилающей поверхности (М. В. Никифоров, А. Н. Пегов и Н. Н. Пегов, В. Ф. Георгиевский, Г. В. Шилин др.). Эти методы были доведены до практического использования.

В 1970—1980-х годах в системе Госкомгидромета СССР функционировали 8 постоянных производственных летных аэроспектрометрических и гамма-спектрометрических экспедиций, которые регулярно проводили обследования посевов сельскохозяйственных культур и пастбищ на значительной части сельскохозяйственной территории Советского Союза. Запасы воды в снежном покрове определялись в бассейнах некоторых рек страны.

С появлением первых метеорологических (1960-е годы) и речурсных (1970-е годы) спутников начали разрабатываться методы обработки и интерпретации получаемой информации применительно к растительности и почвам. Вначале использовались методы дешифрирования спутниковых снимков (Б. В. Виноградов, Н. Г. Харин, В. И. Рачулик и др.), затем, с появлением цифровых спутниковых изображений, получили развитие методы цифровой обработки для выявления видов сельскохозяйственных культур и почв, их состояния, определения их параметров (К. Я. Кондратьев, Ю. К. Росс, Н. Г. Харин; А. Д. Клеценко, О. В. Вирченко и многие другие).

Начиная со второй половины 1970-х годов в Госкомгидромете СССР были развернуты исследования по созданию методов обработки и интерпретации цифровых многоканальных спутниковых изображений применительно к различным агрометеорологическим задачам, а в начале 1990-х была разработана и внедрена оперативная технология использования информации с метеорологических спутников, позволяющая следить за состоянием растительности на больших территориях, выявлять районы со стрессовым (засуха) состоянием (А. Д. Клеценко, О. В. Вирченко, З. В. Федоров, В. А. Охрименко, Л. А. Каретенкова, М. В. Бабий).

В рамках решения проблемы автоматизации сбора и обработки агрометеорологической информации большая работа была выполнена сотрудниками Гидрометцентра СССР и ВНИИСХМ по разработке и внедрению новых кодов для составления оперативных агрометеорологических телеграмм (Н. В. Гулинова, Г. И. Романенко, В. А. Горбачев, Э. Н. Петров и другие). Новый код (КН-21) для составления декадных и ежедневных агрометеорологических телеграмм, введенный в действие с апреля 1988 г., был рассчитан на использование разнообразной и значительной

по объему агрометеорологической информации, поступающей и расширявшейся в те годы сети станций и постов.

Наибольшей плотности сеть наземных агрометеорологических наблюдений достигла в 1985 г. На территории СССР наблюдения проводились в 3192 пунктах, в том числе работало 117 агрометеорологических станций; на территории России было 175 пунктов наблюдений. Благодаря содействию Министерства сельского хозяйства СССР и министерств союзных республик при колхозах (совхозах) действовали десятки тысяч ведомственных агрометеорологических постов.

В 1986 г. перед Госкомгидрометом была поставлена задача расширения агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства до уровня административных районов: оправдываемость агрометеорологических прогнозов урожайности и валового сбора основных зерновых культур требовалось повысить до 92—95%. Для решения этих задач объемы исходной агрометеорологической информации следовало увеличить почти на два порядка. В этой связи ВНИИСХМ разработал новую, трехуровневую, концепцию получения агрометеорологической информации: наземной, самолетной, спутниковой — и приступил к ее реализации.

Однако в начале 1990-х годов, после распада СССР, в условиях переходной экономики России объемы дорогостоящих авиационных наблюдений стали стремительно снижаться, а все летные экспедиции практически прекратили свою деятельность. Резко сократилась наземная агрометеорологическая сеть. Почти полностью были прекращены наблюдения за состоянием пастбищ в районе северного оленеводства. На 30—35 % сократилась сеть агрометеорологических наблюдений в Верхне-Волжском, Уральском, Якутском УГМС; на 50 % и более — в УГМС ЦЧО и Западно-Сибирском УГМС.

В результате распада единого экономического пространства СССР на территории России не оказалось производств, выпускающих техническое оборудование, необходимое для агрометеорологических измерений (термометры, сушильные шкафы, влагомеры, плотномеры почвы, дождемеры и т. д.). Обеспеченность станций и постов отдельными средствами измерений снизилась до 80—70 % и менее.

Для сохранения современной системы агрометеорологического обеспечения административных и сельскохозяйственных

рганов на федеральном и областном уровнях ВНИИСХМ определил минимально необходимую (основную) наземную сеть агрометеорологических наблюдений. В настоящее время она состоит из 1034 станций и постов. Дальнейшее сокращение наблюдательных пунктов, а также объемов наблюдений на них неопустимо.

В соответствии с решением Межгосударственного совета по агрометеорологии (МСГ) стран СНГ „О создании центров мониторинга засух” (№ 3.1/11, Минск, декабрь, 1999 г.) и „Об утверждении Положения о Центре мониторинга засух МСГ” (№ 3.4/13, Минск, октябрь 2001 г.) приказом Росгидромета № 9 от 1.01.2002 г. на базе ВНИИСХМ был организован Центр мониторинга засух (ЦМЗ) МСГ СНГ.

ЦМЗ является научно-методическим и информационным центром по изучению феномена засухи и засушливых явлений на территориях Азербайджанской Республики, Республики Армения, Республики Беларусь, Грузии, Республики Казахстан, Кыргызской Республики, Российской Федерации, Республики Таджикистан и Республики Узбекистан.

Основными задачами ЦМЗ являются:

— изучение феномена засухи и засушливых явлений и их влияние на сельскохозяйственное производство (урожайность, скорость развития сельскохозяйственных культур и т. д.);

— разработка методов оценки атмосферной и почвенной влаги (интенсивность, ареал, продолжительность), их ранней диагностики; влияние засухи на состояние сельскохозяйственных культур, пастбищ и сенокосов, их ожидаемая продуктивность по данным наземной и спутниковой информации;

— определение закономерностей развития засухи в условиях глобального изменения климата на базе накопления новых фактических данных и др.

Информационной продукцией ЦМЗ являются: декадный отчет мониторинга засух и засушливых явлений; ежегодный аналитический обзор засушливых явлений и засух с оценкой их влияния на сельскохозяйственное производство и др.

В течение двух лет ЦМЗ функционирует во ВНИИСХМ в опытно-производственном режиме (А. Д. Клещенко, Е. К. Зойд-ко, Т. В. Хомякова и др.).

С начала 1970-х годов по 2000 г. агрометеорологи ИЭМ ВНИИСХМ и Гидрометцентра СССР совместно с коллегами из региональных НИГМИ Росгидромета, территориальных УГМС, НИИ других ведомств страны организовали и провели более 30 всесоюзных и региональных научно-практических конференций, заседаний Межведомственного научного совета „Агрометеорология”, совещаний и семинаров по обмену опытом. На всех этих совещаниях обсуждались основные научные и производственные проблемы сельскохозяйственной метеорологии, возникающие в связи с запросами сельскохозяйственного производства, направленные на совершенствование всей системы оперативного гидрометеорологического обеспечения аграрного сектора страны. Практика привлечения широкой научной и производственной общественности к выработке генеральных направлений развития исследований в области сельскохозяйственной метеорологии и решению насущных оперативно-производственных задач в агрометеорологии полностью оправдала себя.

В 1980 г. ВНИИСХМ успешно провел первую Всесоюзную школу молодых ученых и специалистов по проблемам динамического моделирования в агрометеорологии на базе ЗагНИГМИ Грузинского УГМС (г. Тбилиси). В середине 80-х годов сотрудники ВНИИСХМ при поддержке ГКНТ СССР, ВМО, ЮНЕП и Госкомгидромета СССР на базе Одесского гидрометеорологического института (1984 г.) и КазНИГМИ (1986 г., Алма-Ата) провел учебные курсы по агрометеорологии для слушателей из развивающихся стран Азии, Африки, Латинской Америки и Океании получившие высокую оценку обучавшихся.

Развитие физико-математических методов исследований

Изучение и объяснение причинно-следственных связей между гидрометеорологическими условиями среды и продуктивностью сельскохозяйственных культур было и остается основной проблемой агрометеорологии как науки. Можно выделить три этапа в решении этой проблемы.

На первом, классическом этапе развития агрометеорологии преобладал описательный подход: связи между погодными (кл

атическими) условиями и продуктивностью растений объясня-
ись на качественном уровне.

На рубеже 1950—1960-х годов описательный подход сменился
мпирико-статистическим, при котором основное внимание стало
целяться поиску прямых эмпирических связей между входами и
ыходом системы „погода—урожай”. Этот подход позволил выя-
ить целый ряд зависимостей, которые до сих пор успешно ис-
ользуются в практике агрометеорологического обслуживания се-
ьского хозяйства. В частности, получены уравнения регрессии
ля прогнозирования осредненной по территории урожайности
ажнейших сельскохозяйственных культур в основных районах
зделывания (Е. С. Уланова; В. А. Моисейчик, А. И. Страшная,
, И. Чирков; А. А. Шиголов и многие другие ученые Гидромет-
ентра СССР и отдела сельскохозяйственной метеорологии ИЭМ и
ругих учреждений ГУГМС). Подробнее этот этап рассмотрен в
азделе „Развитие методов агрометеорологических прогнозов”.

Основополагающими работами в области построения эмпири-
о-статистических зависимостей для расчета урожайности мож-
о считать труды Р. Фишера и В. М. Обухова. Фишер, известный
нглийский математик-статистик, на основании исследования
лияния погоды на урожайность пшеницы показал, что для дан-
ой проблемы типична ситуация, когда число влияющих факто-
ов имеет тот же порядок, что и число наблюдений. Для преодо-
ения этой трудности им разработаны оригинальные приемы
катия информации о метеорологических условиях. В. М. Обу-
ов впервые широко использовал множественный регрессион-
ый анализ для изучения влияния метеорологических условий
а урожайность.

В результате обработки массовых материалов по урожайнос-
и и сопряженных метеорологических наблюдений в послевоен-
ый период выявлен ряд факторов, учет которых позволил по-
роить более или менее надежные зависимости для долгосроч-
го планирования урожайности. Это так называемые инерцион-
ые агрометеорологические факторы, в изучение которых боль-
ой вклад внесла Е. С. Уланова. Наиболее часто используются
ля прогнозирования два фактора: влагозапасы в почве на дату
зобновления вегетации озимых (или дату сева яровых) и число
эрезимовавших стеблей (или надземная биомасса) озимых куль-
р.

Применение регрессионного анализа в данной области ограничивается недостаточным количеством данных об урожайности, их неоднородностью, связностью и другими особенностями. Трудности усугубляются характерным для агрометеорологических задач отклонением от постулированной нормальности распределения, засоренностью выборок ошибками. По этой причине уравнения регрессии при проверке на независимом материале часто оказываются неустойчивыми.

Известно, что гребневая регрессия направлена на преодоление трудностей, связанных с коррелированностью предикторов. Ее преимущества проявляются при проверке зависимости на вхошедших в исходную выборку новых материалах.

Полезность использования компонентного анализа, гребневой, робастной регрессии и регрессии с ограничениями на коэффициенты доказана на примере решения конкретных агрометеорологических задач. Весьма эффективным представляется комплексное использование нескольких альтернативных подходов.

В середине 1950—1960-х годов, когда М. Монси и Т. Саэки, А. А. Ничипорович, А. И. Будаговский, Ю. К. Росс, а также М. И. Будыко и Л. С. Гандин опубликовали ряд работ, формулирующих ключевые положения фотосинтетической теории продуктивности растительных сообществ, начался третий этап.

Де Витом и его сотрудниками была разработана первая динамическая модель продуктивности конкретного агроценоза: ELCROS, более поздняя версия которой послужила прототипом для создания многих прикладных динамических моделей формирования урожая.

Становлению современного подхода к решению центральной научной проблемы агрометеорологии — исследованию причинно-следственных связей „окружающая среда—растение” способствовали работы Ю. И. Чиркова, А. Р. Константинов, В. П. Дмитренко, В. Байера, предложивших подходы, выходящие за рамки эмпирико-статистической парадигмы. В этих работах для расчета урожайности были предложены схемы, непосредственно опирающиеся на положения теории фотосинтетической продуктивности агроэкосистем.

В чем же состоит сущность и новизна динамического подхода? Прежде всего в том, что формирование урожая рассматривается как развивающийся во времени процесс, для описания кото-

ного используется соответствующий математический аппарат — дифференциальные уравнения или разностные аналоги. Полагается, что продуктивность агроэкосистемы определяется интенсивностью и направленностью процессов обмена веществом и энергией между посевом и окружающими его средами — приземным слоем воздуха и почвой. Посев — центральное звено системы „почва—растение—атмосфера” — рассматривается как открытая система — „зеленая машина”, которая усваивает из окружающей среды энергию и необходимые субстраты и продуцирует органическое вещество.

Впервые было показано, что анализ поведения важнейшей для агрометеорологии системы „погода—урожай” и расчет конечной продуктивности агроэкосистемы можно свести к изучению пусть сложной, но достаточно конкретной и обозримой задачи математической физики. Определена структура общей теории, которая может служить основой развития агрометеорологии как физико-математической дисциплины, не отстающей по уровню математизации от смежных областей знаний. На основе этой теории созданы прикладные динамические модели формирования урожая, которые существенно расширили возможности агрометеорологии.

Приход динамических моделей в агрометеорологию означает не просто смену математического аппарата. Это становление нового, динамического подхода к описанию и объяснению причинно-следственных связей между гидрометеорологическими условиями вегетационного периода и продуктивностью сельскохозяйственных культур.

Оценка текущих агрометеорологических условий формирования урожая всегда была в центре внимания практиков и решалась на основе опыта и знаний специалиста. Динамические модели позволяют получать объективные количественные оценки для решения этой задачи.

Чтобы оценить условия формирования урожая в течение какого-либо отрезка вегетационного периода, следует определить степень их отличия от эталонных условий, в качестве которых могут быть заданы: норма, метеорологический оптимум, условия прошлого года и т. д. Естественной мерой отличия представляется отношение урожаев, рассчитанных по фактическим и эталонным данным за оцениваемый период.

Задача прогнозирования урожая сложнее задачи оценивания текущих агрометеорологических условий, поскольку для этой цели необходим прогноз динамики гидрометеорологических условий до конца вегетационного периода. При любом способе прогноза погодных условий необходимо, чтобы рассчитанные по этим данным оценки урожайности были свободны от систематической ошибки, возникающей за счет осреднения метеорологической информации. Численные эксперименты показали, что прогнозируемый урожай из-за нелинейности моделей может существенно завышаться, если вместо суточных значений метеорологических величин используются осредненные значения, например, за декаду. Устранить систематическую ошибку прогноза урожайности можно путем моделирования ансамбля реализаций аномалий погодных условий за оставшуюся часть вегетационного периода. Урожай рассчитывается по каждой реализации, а затем осредняется. В качестве норм могут использоваться данные метеорологического прогноза, а при его отсутствии — климатические данные.

Динамические модели открывают новые возможности оценки почвенно-климатических ресурсов и биоклиматического потенциала (БКП). В агроклиматических исследованиях БКП определялся обычно как произведение двух эмпирических зависимостей, характеризующих теплообеспеченность и влагообеспеченность сельскохозяйственных культур. Впервые положения фотосинтетической теории продуктивности для оценки агроклиматических ресурсов использовал Х. Г. Тооминг, предложивший метод эталонных урожаев.

В дальнейшем, уже на основании динамических моделей продуктивности с развитым блоком минерального питания растений, О. Д. Сиротенко, Е. В. Абашиной и В. Н. Павловс (ВНИИСХМ) была разработана другая система расчета биоклиматического потенциала, реализованная для территории бывшего СССР. По этой методике БКП рассчитывается на основании динамической модели как суммарный урожай эталонной „травяной“ экосистемы за период с температурой выше 5 °С.

Оценка реакции сельскохозяйственного производства на ожидаемые изменения климата является весьма актуальной. При этом наряду с изменением чисто климатических параметров необходимо учитывать влияние роста концентрации парниковых

азов (в первую очередь CO_2 , а также приземного озона) и, кроме того, принимать во внимание ожидаемые изменения плодородия почв, что существенно усложняет задачу.

Исследования ВНИИСХМ показали, что наиболее приспособленными для решения этих новых для агрометеорологии проблем являются динамические модели продуктивности агроэкосистем. Сказанное позволяет заключить, что благодаря внедрению физико-математических методов возможности современной агрометеорологии возросли многократно. Можно констатировать, что имеется значительный научный потенциал, еще не реализованный в современных моделях продуктивности агроэкосистем. Поэтому следует ожидать в ближайшем будущем появления нового поколения этих моделей, значительно более адекватных и более широким спектром возможностей. Созданы предпосылки для разработки больших многоцелевых имитационных агрометеорологических систем, охватывающих всю страну. Их прообразом служит имитационная система „климат—почва—урожай”.

Подобные системы должны быть базой не только для решения оперативных агрометеорологических задач: численного мониторинга состояния посевов, оценки текущих агрометеорологических условий и прогнозирования урожайности, но и для решения агроклиматических задач, связанных с долгосрочным прогнозированием, оценкой эффективности инвестиций, разработкой программ адаптации сельского хозяйства к ожидаемым глобальным изменениям климата.

Развитие методов агрометеорологических прогнозов

С начала возникновения земледелия непосредственного производителя всегда интересовала возможность предугадать будущий урожай, с тем чтобы обезопасить себя на случай экстремальных ситуаций с производством продуктов питания. Многолетние наблюдения за погодными условиями позволяли земледельцу сформулировать первые агрометеорологические прогнозы в виде народных примет, связывающие характер погоды в отдельные сезоны, месяцы или дни с ожидаемым урожаем. До наших дней

дошли те из них, которые, вероятно, имели наибольшую опра-
дываемость.

Началом нового этапа в развитии агрометеорологических ис-
следований считается 21 апреля 1921 г., когда Декретом Совет
Труда и Оборона была организована агрометеорологическая
служба (Служба урожая — Метеочасть Наркомзема РСФСР),
призванная осуществлять повседневное агрометеорологическое
обслуживание сельскохозяйственных органов информацией
о влиянии текущей погоды на рост, развитие и урожай сельскохо-
зяйственных культур. С этого времени начинается развитие ко-
личественных методов агрометеорологических прогнозов и рас-
четов.

Методы агрометеорологических прогнозов того времени осно-
ываются на данных наблюдений, результатах научных исследо-
ваний о влиянии погоды на рост и развитие растений и использо-
вании статистики в качестве математического аппарата.

Аппарат математической статистики в агрометеорологии
впервые был применен В. М. Обуховым (1927 г.). Используя да-
нные по статистической отчетности об урожайности сельскохозяй-
ственных культур по губерниям России, он получил регрессион-
ные зависимости для каждой территориальной единицы Рос-
сии.

Примерно в 30-х годах началась разработка количественных
методов агрометеорологических прогнозов в Центральном инсти-
туте погоды (ныне Гидрометцентр России).

В начале 1930-х годов А. А. Шиголевым разработаны основы
фенологических прогнозов. В 1932 г. Г. З. Венцкевичем был сс-
ставлен первый агрометеорологический прогноз результатов пе-
резимовки озимых культур.

В период 1939—1941 гг. создаются методы прогнозов сроко-
наступления фаз развития и оптимальных сроков сева озимых
культур, разрабатываются основы методики прогноза динамик
почвенной влаги. Л. А. Разумовой впервые был разработан мето-
д прогноза запасов влаги к началу весны, а Н. А. Зубаревым — ме-
тод количественной оценки агрометеорологических условий фо-
мирования урожая сельскохозяйственных культур.

В годы Великой Отечественной войны научные исследовани-
я по разработке агрометпрогнозов были приостановлены. Посл-
е окончания войны в Гидрометслужбе стали активно развиваться

методы агрометпрогнозов, началось широкое внедрение научных исследований в практику агрометеорологического обслуживания народного хозяйства.

Под руководством В. В. Синельщикова, а с 1959 по 1964 г. М. С. Кулика создаются и внедряются в практику методы фенологических прогнозов сельхозкультур (А. А. Шиголов), методы прогнозов запасов продуктивной влаги и влагообеспеченности сельхозкультур (Л. А. Разумова, С. А. Вериго, С. Б. Мастинская), оценки и прогнозов условий роста озимых культур осенью (Н. А. Зубарев, И. М. Петунин, В. А. Моисейчик, А. А. Окушко), суховея (Е. А. Цубербиллер), оценки условий формирования урожая зерновых культур (Н. А. Зубарев, Г. З. Венцкевич, А. В. Процеров, С. А. Сапожникова, А. С. Конторщиков, Ю. И. Чирков). В 1962 г. было опубликовано первое „Руководство по составлению агрометеорологических прогнозов”.

В 1964 г. решением руководства Главного управления Гидрометслужбы перед сельскохозяйственной метеорологией была поставлена задача разработать методы и приступить к прогнозированию не только условий формирования урожая, но и урожайности (в центнерах с гектара) основных сельскохозяйственных культур.

Шестидесятые годы характеризуются подъемом в исследованиях по разработке методов агрометеорологических прогнозов урожайности основных сельскохозяйственных культур: озимой пшеницы (М. С. Кулик, Е. С. Уланова), яровой пшеницы (А. В. Процеров, Л. А. Разумова, В. П. Пономарев), кукурузы (Ю. И. Чирков), гречихи (Н. З. Иванова-Зубкова). Параллельно, как дополнение к методам прогноза урожайности, создаются методы прогнозов теплообеспеченности вегетационного периода (Ф. Ф. Давитая), площадей погибших и изреженных озимых зерновых культур в зимний период (В. А. Моисейчик), оптимальных режимов орошения зерновых культур (С. Б. Мастинская, Т. А. Разумова, Н. Б. Мещанинова).

В дальнейшем агрометеорологические исследования, направленные на разработку методов агрометеорологических прогнозов, широко развернулись в научно-исследовательских гидрометеорологических институтах на Украине, в Закавказье, Казахстане, Сибири, Средней Азии, Приморском крае.

Созданный в 1977 г. Всесоюзный научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии (ВНИИСХМ) стал основным научным центром по разработке методов агрометеорологических прогнозов.

В 1970-е годы усовершенствуются действующие и создаются новые методы прогноза урожайности озимых культур (М. С. Кулик, Е. С. Уланова, В. П. Дмитренко, Н. Ф. Цупенко, Р. С. Мкртчян, Г. Г. Меладзе, И. В. Свисюк, М. И. Черникова, Ш. И. Церцвадзе, А. Ф. Масловская, В. П. Краснянская и др.) яровой пшеницы (К. В. Кириличева, Г. В. Дегтярева). Создаются новые методы прогноза урожайности ярового ячменя (А. Н. Полевой, Т. И. Мызина, Н. Н. Желтая), овса (А. Н. Полевой, С. Л. Плучик). Параллельно разрабатываются новые методы прогнозов состояния озимых осенью (А. Я. Грудева, Т. А. Максименкова) и изреженности озимых культур (В. А. Моисейчик, В. А. Личикаки), качества урожая (В. Н. Страшный, А. Н. Деревянко).

Создание новых методик продолжается и в 1980-е годы: прогнозы начала полевых и уборочных работ (А. Н. Деревянко, М. Г. Лубнин), перезимовки многолетних трав (А. И. Страшная, Н. В. Гулинова), урожайности их семян (А. И. Страшная), урожайности льна (Л. В. Комоцкая), семян подсолнечника (Ю. С. Мельник, Х. Х. Тебуев), кукурузы (Л. В. Комоцкая, А. И. Страшная), состояния озимых культур (Т. А. Максименкова, А. Н. Деревянко). Комплекс методов пополняется за счет региональных методов прогноза урожайности и агрометеорологических условий.

Методы агрометеорологических прогнозов разрабатывались на основании учета инерционности главных агрометеорологических факторов, биологических закономерностей роста и развития растений, характеристики их фотосинтетического потенциала, морфогенетического анализа и продуктивности.

Научной основой методов агрометеорологических прогнозов являются статистические многофакторные зависимости и уравнения, позволяющие рассчитывать ожидаемые величины трех-, двух- и одномесячной заблаговременностью. Они были получены экспериментально на основании анализа полевых наблюдений агро- и гидрометеорологических станций на полях колхозов и совхозов, опытных станций, сельскохозяйственных инсти-

гутов, госсортоучастков, а также многолетних материалов наблюдений сети станций, данных об урожайности сельскохозяйственных культур и о площадях гибели озимых культур зимой. Для выявления и анализа многофакторных зависимостей применялись корреляционный и регрессионный анализы с использованием ЭВМ.

Оправдываемость агрометеорологических прогнозов чаще всего была достаточно высокой (80—90 %).

Классические статистические методы с самого начала создания методик в области агрометеорологического прогнозирования заняли главенствующее положение и занимали его вплоть до середины 1970-х годов, когда наряду с успехами традиционных методов стали все сильнее проявляться их недостатки. Приблизительно тогда появились нетрадиционные подходы в агрометеорологическом прогнозировании, призванные обойти возникшие трудности.

С 1970-х годов начинают активно разрабатываться динамико-статистические модели продукционного процесса сельскохозяйственных растений (Ю. К. Росс, Х. Г. Тооминг, О. Д. Сиротенко, А. Н. Полевой). В отличие от статистических моделей, в динамических (динамико-статистических) моделях активно используются знания, касающиеся механизма процессов, происходящих в растениях: фотосинтез, дыхание, транспирация. Модели такого класса дают возможность не только количественно оценить солнечный урожай, но и проследить за его формированием в течение всего вегетационного периода. В эти же годы была создана динамико-статистическая модель перезимовки озимых культур А. Г. Палагин, В. А. Моисейчик), реализованная в оперативной работе агрометеорологов.

В 1970-е годы в агрометеорологическом прогнозировании наметилось еще одно направление — синоптико-статистическое (В. М. Пасов, Е. А. Аксарина, ИЭМ, ВНИИСХМ). Основная цель, которая ставилась при его создании, состояла в увеличении заблаговременности агрометеорологических прогнозов (прежде всего прогнозов урожайности). Характерной чертой этого подхода было использование в качестве исходного материала данных карт барической топографии, что не только открывало возможность составления прогнозов урожайности еще до сева ряда сельскохозяйственных культур, но и позволяло осуществлять про-

гнозирование урожайности в тех случаях, когда традиционная агрометеорологическая информация отсутствует либо ее получение затруднено. Именно это обстоятельство позволило разработать ряд рабочих методик, с помощью которых в 1970—1980-годы в оперативном режиме составлялись прогнозы урожайности основных сельскохозяйственных культур не только по отдельным регионам бывшего СССР, но и по территориям ряда зарубежных стран (В. М. Пасов, Е. А. Аксарина, В. П. Зинченко, В. М. Лебедева, В. П. Краснянская, Л. И. Сверлова).

Все вышеназванные подходы, на которых базируются современные методы агрометеорологических прогнозов (статистические, динамические, динамико-статистические, синоптико-статистические), представляются достаточно перспективными. Методы, построенные на этих подходах, должны дополнять друг друга. Это, кстати, полностью согласуется с идеей комплексирования моделей разной природы.

К концу 1980-х годов существовало множество методов составления прогноза урожайности, которые отличались друг от друга методической основой, видом исходной информации, временем составления, оправдываемостью и точностью, масштабом территории, на которую ориентирован прогноз, а также технологией (машинной или ручной), применяемой при проведении необходимых для составления прогнозов расчетов. В это время оперативные работники, занимающиеся агрометеорологическим прогнозированием урожайности во всех сельскохозяйственных районах бывшего СССР, в основном были обеспечены соответствующими методиками, нередко даже дублирующими друг друга.

За последние десять лет средняя точность оперативных прогнозов урожайности и валового сбора колеблется в пределах 85—95 %. Однако за этой средней цифрой следует видеть отдельные годы, регионы, культуры, когда результаты были ниже средних.

Замена устаревших методик новыми, имеющими лучшую оправдываемость и позволяющими прогнозировать урожайность с большей точностью, остается одной из важнейших задач ближайшего будущего.

С начала 1990-х годов все более важное значение стали приобретать вопросы технологии создания прогностической продукции. Переходу на компьютерную технологию способствует рост мат

риальной базы (электронно-вычислительной техники, средств коммуникации и т. д.), не говоря уже о новых методических возможностях, которые открываются перед разработчиками и теми, кто составляет оперативные агрометеорологические прогнозы.

Научно обоснованный прогноз должен стать руководством к действию, а не прикрытием заранее принятых решений, как это нередко бывало в прошлом. Практическая необходимость в таких прогнозах для руководителей высшего и среднего звена, занимающихся сельским хозяйством, планированием производства зерна в стране, его закупкой, продажей, а также интересующихся производством сельскохозяйственной продукции в мире, не вызывает сомнений.

С практической точки зрения будущие разработки в области агрометеорологического прогнозирования должны идти в двух основных направлениях, наметившихся уже в начале 1990-х годов: 1) создание и внедрение в практику оперативных подразделений информационно-прогностических систем обслуживания потребителей прогностической и иной оперативной агрометеорологической информацией на уровне территориального УГМС с использованием ПЭВМ; 2) создание и внедрение автоматизированной системы по оперативной оценке видов на урожай в основных зернопроизводящих странах (включая Россию) на базе современных технологий.

В конце 1990-х годов XX в. во ВНИИСХМ были начаты работы по созданию нового поколения методов прогнозов урожайности основных зерновых и технических культур (В. П. Зинченко, Г. И. Русакова, Т. А. Гончарова и др.). Новые методы создавались на основе усовершенствованной динамико-статистической модели „погода—почва—урожай” и синоптико-статистического подхода к прогнозированию продуктивности сельскохозяйственных культур. Разработка новых методов агрометеорологических прогнозов неотделима от создания новой машинной (ПЭВМ) технологии составления прогнозов (М. А. Королев, Н. М. Шкляева и др.), поскольку использование современных средств вычислительной техники является определяющим моментом в системе оперативного обеспечения потребителей.

Была создана уникальная информационно-прогностическая система (ИПС) двух типов для агрометеорологического обеспечения потребителей различных уровней.

Первый тип ИПС предназначен для оперативной работы в региональных (территориальных) УГМС. Он ориентирован на получение большого количества прогностических оценок, связанных с объемом оперативных работ УГМС. Специальное программное обеспечение проводит раскодировку, контроль текстовых телеграмм, поступающих по коду КН-21, и занесение их в информационную базу данных. Поступившая раскодированная информация за сутки (декаду) выводится на экран компьютера. Далее в автоматизированном режиме производится составление различных таблиц декадного и месячного бюллетеней, годового агрометеорологического обзора, составление широкого спектра агрометеорологических прогнозов, расчет оправдываемости прогнозов урожайности сельскохозяйственных культур. Система открыта для замены устаревших методик прогнозов новыми, разработанными на основе динамико-статистических моделей.

В 2000—2001 гг. ИПС была внедрена и стабильно работает в оперативном режиме в Уральском УГМС, проводятся производственные испытания системы в Верхне-Волжском, Башкирском и в других УГМС.

Таким образом, ИПС обеспечивает автоматизацию всех расчетов для прогнозов, получение справочных материалов, доступ в банкам оперативной и режимной информации, значительно облегчает работу агрометеорологов-прогнозистов и повышает производительность труда.

Второй тип ИПС предназначен для работы в центральных оперативных органах Росгидромета: в Гидрометцентре России (г. Москва) и во ВНИИСХМ (г. Обнинск). Он имеет ряд специфических особенностей для оперативного обеспечения руководителей высшего звена управления страной и сельскохозяйственной отрасли.

Выполненные исследования ученых-агрометеорологов ВНИИСХМ являются практическим воплощением идеи создания многофункционального автоматизированного рабочего места (АРМ „Агрометеоролог”. Это реальный шаг к созданию автоматизированной системы оперативного агрометеорологического мониторинга посевов сельскохозяйственных культур на территории Российской Федерации. Исследования в этом исключительно важном направлении продолжаются.

Агроклиматические исследования

Агроклиматические исследования в России начали производиться еще в последней четверти XIX столетия. Основы методов этих исследований были разработаны А. И. Воейковым и Г. И. Броуновым. Принципы этих методов стали основой для дальнейшего развития агроклиматических исследований как в зарубежных странах, так и в исследованиях агроклиматологов СССР и социалистических стран. А. И. Воейков выполнил ряд важных агроклиматических работ, в которых доказал возможность возделывания культуры чая, цитрусовых культур и бамбука в Закавказье, табака на юге России, ценных пород хлопчатника в Средней Азии, обратил внимание на значение кукурузы как продовольственной и фуражной культуры и указал на районы озможного возделывания ее на зерно на европейской части России и за Уралом.

Агроклиматические исследования, выполненные впоследствии известными агроклиматологами (Г. Т. Селянинов, Г. И. Колосков, Л. Н. Бабушкин, И. А. Гольдберг, Ф. Ф. Давитая, В. П. Попов, С. А. Сапожникова, Д. И. Шашко и др.), были направлены на разработку агроклиматических показателей для сельскохозяйственной оценки климата, на агроклиматическое описание и районирование отдельных территорий (Закавказье, Казахстан, Украина, Западная Сибирь, Средняя Азия, Урал и др.) и отдельных сельскохозяйственных культур (субтропические культуры, виноград, хлопчатник, кукуруза и др.). Особенно важное значение имели работы Г. Т. Селянинова „Климатическое районирование СССР для сельскохозяйственных целей” (1955 г.), „Принципы агроклиматического районирования СССР” (1958 г.) и др. Следует отметить также работы П. И. Косскова, Ф. Ф. Давитая, Д. И. Шашко, С. А. Сапожниковой, Г. А. Гольдберг, Ю. И. Чиркова, А. И. Руденко.

Период с 1931 по 1960 г. в развитии агроклиматических исследований важен не только тем, что был выполнен ряд значительных работ, но и тем, что были окончательно сформулированы принципы агроклиматического районирования территории, разработана система показателей для оценки тепло- и влагообеспеченности, условий перезимовки растений и т. д. Это все то, что называют классической агроклиматологией.

Наиболее крупные исследования, выполненные в период 1961 по 1980 г., освещают разнообразные проблемы изучения агроклиматических ресурсов природных зон, оценки агроклиматических ресурсов и агроклиматической продуктивности сельскохозяйственных культур (Ф. Ф. Давитая, А. П. Федосеев, Ю. И. Чирков, Л. Н. Бабушкин, Л. С. Кельчевская, П. И. Колосков, Ю. С. Мельник, А. Р. Константинов).

В этот период были организованы два крупных совещания по агроклиматической проблематике, по результатам которых были опубликованы: Сборник докладов Всесоюзного научно-методического совещания (1963 г.) и Сборник докладов „Агроклиматические ресурсы природных зон СССР и их использование”. В них были представлены исследования по оценке агроклиматических ресурсов произрастания зерновых культур, агроклиматическому обоснованию размещения в СССР посевов гречихи, сорго, сои, сахарной свеклы, агроклиматической оценке содержания крахмала в клубнях картофеля, проблемам сельскохозяйственного бытия климата и экономической оценке земель и т. д.

Российские агроклиматологи внесли наибольший вклад в районирование пяти основных сельскохозяйственных культур (озимая пшеница, кукуруза, виноград, сахарная свекла, картофель) на территории бывших социалистических стран Восточной Европы и интегральную сельскохозяйственную оценку климата и территорий. Эта работа была опубликована в трех томах 1977—1979 гг. Болгарской академией наук в Софии.

Одним из значительных направлений в агроклиматических исследованиях в этот период оставались подготовка и издание реферативно-справочных пособий по агроклиматическим ресурсам. Было подготовлено и издано 130 томов справочников по областям, краям и республикам „Агроклиматические ресурсы”. В отличие от предшествующих аналогичных работ заключалось в том, что материалы наблюдений были представлены в виде усредненных по территории данных.

В 1980—1990-х годах стали развиваться новые тенденции в агроклиматических исследованиях: математизация методов исследований, более широкое применение агроклиматических показателей, отнесенных к единице продуктивности. Назовем авторов лишь наиболее крупных исследований, выполненных в эт

оды: А. Р. Константинов, Ю. Л. Раунер, Л. С. Кельчевская, Д. И. Шашко, В. А. Жуков, А. Н. Полевой, А. П. Виченко, Ю. А. Даниелов, Е. К. Зоидзе, Л. Е. Пасечнюк, В. А. Сенников, Ю. И. Смирнова, Л. И. Сверлова, О. А. Святкина.

В работах В. А. Жукова, С. А. Даниелова, О. А. Святкиной обосновывается применение алгоритмов распознавания образов в задачах агроклиматической оценки среды обитания растений, разрабатываются методы оценки размещения сельскохозяйственных культур с учетом неблагоприятных агроклиматических условий и принципы оценки агроклиматических ресурсов в задачах агроклиматического районирования, которые также рассматриваются в работах Е. К. Зоидзе, Р. Б. Усмановой, Л. И. Погевой.

С 1981 г. проводились разработки режимно-справочных пособий по агроклиматическим ресурсам, причем справочников как многоцелевого назначения, так и специализированных. При этом главное место занимали научно-прикладные справочники НПС) „Агроклиматические ресурсы” (часть 1, 1986 г.), „Агроклиматическая характеристика условий произрастания сельскохозяйственных культур и пастбищной растительности” (часть 2, 1986 г.), „Засушливые явления на территории СССР” (часть 4, 1990 г.), „Агроклиматические ресурсы областей, краев, республик и экономических районов СССР” (часть 3, 1991 г.). Части 1 и 2 НПС были подготовлены в рамках территориальных управлений Росгидромета, а части 3 и 4 — как единые справочники по всей России.

Перспективы агроклиматических исследований в этом направлении связаны с автоматизацией процесса составления режимно-справочных пособий по агроклиматическим ресурсам и созданием на единой основе системы обновления нормативной базы агроклиматических ресурсов по мере накопления новых данных.

В разработке различных методических положений по составлению указанных режимно-справочных пособий по агроклиматическим ресурсам и их реализации принимали активное участие Л. С. Кельчевская, Р. А. Мамонтова, В. А. Жуков, Е. К. Зоидзе, В. Г. Сиротенко.

В последние годы во ВНИИСХМ получило всестороннее развитие новое направление в области агроклиматических исследований — создание методов машинного сбора, обработки, накопления и хранения всех видов агрометеорологической информации на ПЭВМ (ЭВМ).

В настоящее время акценты исследований от разработки агроклиматических показателей, районирования территорий и сельскохозяйственных культур смещаются в сторону создания автоматизированных информационных баз данных и компьютерных технологий поиска и выдачи рекомендаций по рациональному использованию агроклиматической информации в различных отраслях, в частности, создания автоматизированной информационно-советующей системы „климат—урожай” (В. А. Жуков), информационно-справочной системы по агроклиматическим ресурсам (Е. К. Зоидзе).

Агрометеорологические аспекты возделывания и защиты сельскохозяйственных культур

В начале 1970-х годов в отделе сельскохозяйственной метеорологии ИЭМ была организована лаборатория экспериментальных исследований, которая была оборудована вегетационными домиками, передвижными и стационарными низкотемпературными и морозильными камерами для исследования действия экстремальных агрометеорологических факторов на рост и продуктивность зерновых культур, картофеля, клевера и овощных культур.

В организации лаборатории, а затем и отдела, формировании направлений исследований наряду с В. В. Синельниковой основная заслуга принадлежит проф. А. П. Федосееву. Из числа агрометеорологов старшего поколения в решении этих задач участвовали Е. А. Цубербиллер и позднее А. И. Коровин. Научный коллектив отдела сформировался в основном из числа специалистов, окончивших аспирантуру в Институте экспериментальной метеорологии, Гидрометцентре СССР и других институтах. На разных временных этапах свой вклад в развитие отдела выполнение научной тематики вносили С. В. Комаровский

Я. Грудева, Д. И. Никитина, Д. В. Козинец, М. А. Строгоно-
в, В. М. Мокиевский, А. Д. Пасечнюк, В. К. Пилипюк,
И. Яшкина, А. А. Ген, Л. А. Гриненко, В. Н. Матухно,
Ф. Конов, О. К. Устинова, Е. В. Мамаев, Ю. А. Моргунов,
В. Чуреева.

Результаты исследований этого коллектива публиковались в
отдельных методических указаниях и включались в практи-
ческие руководства по программному выращиванию уро-
аев, интенсивным технологиям возделывания сельскохозяй-
ственных культур и комплексной диагностике минерального пи-
ния. Обобщение научной и практической сущности выполнен-
ных исследований представлено в монографиях А. П. Федосеева
«Агротехника и погода» (1979), «Погода и эффективность удобрений»
(1985) и др. Коллективом авторов был подготовлен и опубли-
кован фундаментальный труд — «Справочник агронома по се-
скохозяйственной метеорологии» (составители А. П. Федосеев,
М. Пасов, 1986).

Исследования лаборатории перезимовки и защиты растений
дела были направлены на экспериментальное изучение влия-
ния осенне-весенних условий погоды на состояние зимующих
растений озимых зерновых и многолетних культур и их урожай,
работку методов и способов определения морозоустойчивости
сельскохозяйственных культур, разработку инструментальных
методов оценки жизнеспособности зимующих растений, опреде-
ление критических температур вымерзания озимой пшеницы,
ячменя и клевера с использованием низкотемпературных камер.

Исследования по агрометеорологическим аспектам защиты
вредителей и болезней были начаты по предложению Всесоюз-
ного института защиты растений (ВИЗР) и Всесоюзного институ-
растениеводства (ВИР) по инициативе В. В. Синельщикова и
при поддержке А. И. Руденко. С самого начала исследования в
этом направлении были включены в тематику ГКНТ СССР и ко-
ординационные планы ВАСХНИЛ и АН СССР. Были разработа-
ны теоретические и методологические вопросы агрометеорологи-
ческой оценки территории России, СНГ и некоторых зарубеж-
ных стран применительно к развитию и распространению ряда
более опасных вредителей и заболеваний, создан агрометео-
логический метод прогнозирования сроков развития вредите-

лей и определения сроков проведения химических обработок (В. В. Вольвач).

Проведена разработка динамических моделей, описывающих жизненные циклы некоторых вредителей полевых культур, частности картофеля (колорадский жук), в зависимости от агрометеорологических условий (В. В. Вольвач), получивших высокую оценку на международных симпозиумах, проведенных ВМ и Европейской организацией защиты растений (1979 г.), а также на Всероссийском съезде по защите растений.

В системе Гидрометслужбы СССР наиболее активно разработка проблемы борьбы с заморозками осуществлялась в 1940-1950-е годы.

Во ВНИИСХМ научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию методов борьбы с заморозками были начаты в первой половине 80-х годов. По договорам с целым рядом отраслевых институтов была проведена разработка динамического и теплового способов воздействия на заморозки (В. В. Вольвач и др.), более подробно описанных в разделе „Агрометеорологические наблюдения”.

Погода, климат и пастбищное животноводство

В конце 1940-х—начале 1950-х годов в сельскохозяйственной метеорологии сформировалось новое научное направление, опирающееся на достижения пастбищеведения и агрометеорологии.

Термин „пастбищная агрометеорология”, предложенный роклиматологом-географом проф. Л. Н. Бабушкиным и геоботаником проф. И. Г. Гранитовым, быстро вошел в науку и практику в системе Гидрометслужбы.

В начале 1950-х годов ответственность за осуществление организационного агрометеорологического обеспечения отгонного животноводства была возложена на Гидрометеорологическую службу страны. Освоение новых пастбищных массивов, расположенных в глубинных районах пустынь и гор Средней Азии и Казахстана, потребовало расширения сети метеорологических станций и введения на них специализированных наблюдений за ростом и развитием и формированием урожайности естественных кормовых растений, а также за состоянием выпасаемого поголовья.

и проведением основных хозяйственных мероприятий в животноводстве в зависимости от погодных условий.

Специалисты Казахского научно-исследовательского гидрометеорологического института (КазНИГМИ) (А. П. Федосеев, Г. Белобородова и др.), Среднеазиатского научно-исследовательского гидрометеорологического института (САНИГМИ) (Г. Г. Грингоф), а также Управления гидрометслужбы Туркменской ССР (Н. А. Мордвинов) провели целевые экспедиционные работы (в различных районах пустынной зоны) для усовершенствования действующих и разработки новых методов наземных метеорологических наблюдений на пастбищах. Это позволило добиться определенного улучшения качества и большей полноты наблюдений за пастбищными растениями и выпасаемым поголовьем скота.

Параллельно с работами по усовершенствованию методов агрометеорологических наблюдений на естественных пастбищах и покосах страны специалисты институтов Гидрометслужбы (КазНИГМИ, САНИГМИ) и управлений гидрометслужбы республик Средней Азии и Казахстана приступили к исследованиям зависимости роста, развития и формирования урожайности пастбищной растительности от агрометеорологических условий.

В конце 1950-х годов в Центральном институте прогнозов сделана первая попытка научного обобщения знаний о влиянии погодных условий на рост сеяных трав и некоторых естественных пастбищных растений в различных природных зонах СССР (Л. М. Могилева).

Для ведения специализированного обслуживания пустынно-животноводства требовались данные не только о погоде, запасах кормов, но и о сельскохозяйственных животных и степени риска проведения хозяйственных работ в отрасли. Все это послужило объективным критерием для организации исследований влияния погодных условий на выпасаемое поголовье скота.

Так, в 1950-х годах в Казахстане было положено начало новому направлению в сельскохозяйственной метеорологии — зоометеорологии. Справедливости ради следует заметить, что по инициативе одного из основоположников сельскохозяйственной метеорологии проф. П. И. Броунова в конце XIX в. наряду с организацией первых сельскохозяйственно-метеорологических станций России, на Украине, в Молдавии (Бессарабии) и Белоруссии

были созданы и зоометеорологические станции с целью проведения наблюдений за влиянием погодных условий на сельскохозяйственных и промысловых животных, включая пчел (П. И. Броунов, 1901). Однако в те годы зоометеорологическое направление заметного развития не получило.

В 1950—1960-х годах исследования по пастбищной агрометеорологии в Казахстане, Узбекистане и Туркменистане получили весьма интенсивное развитие. Головным институтом, на котором в системе Гидрометслужбы были возложены функции организатора и координатора всех работ в этом направлении, был КазНИГМИ, а научным лидером стал проф. А. П. Федосеев.

Пастбищная агрометеорология как самостоятельное направление в сельскохозяйственной метеорологии окончательно сформировалась после фундаментального исследования А. П. Федосеева „Климат и пастбищные травы Казахстана” (1964).

Одно из самых молодых направлений — зоометеорология получило в 1968 г. серьезное теоретическое обоснование благодаря применению физических и математических методов исследования, а также использованию результатов фундаментальных исследований по физиологии сельскохозяйственных животных (В. А. Ярошевский).

Зооклиматическим развитием работ этого направления стали исследования, выполненные в Туркменистане (Е. К. Балакир, 1972; Н. С. Орловский и З. И. Волосюк) и в Казахстане (А. И. Черкес). Работы проф. Б. А. Айзенштата (1974 г.) и его сотрудников дали дальнейшее развитие физическим аспектам метеорологии сельскохозяйственных животных, находящихся в экстремально жарких условиях.

В 70-е годы продолжали развиваться агрометеорологические исследования в области пустынно-пастбищной растительности в системе АН Туркменской ССР, в частности в Институте пустынь под руководством акад. Н. Т. Нечаевой.

В течение ряда лет (1970—1990-е годы) агрометеорологи ВНИИСХМ (А. П. Федосеев, И. Г. Грингоф) совместно с коллегами из Туркменистана (М. Нурбердыев) и Узбекистана (О. Н. Резвих) работали над проблемами агрометеорологических оценок прогнозов формирования урожайности фитомелиорированных пастбищ, их средообразующей роли в пустынных ландшафтах.

зад фитомелиоративным районированием территории Кызылкумов и Каракумов с целью управления продуктивностью пастбищ.

В начале 1970-х годов в САРНИГМИ научные исследования в области пастбищной агрометеорологии были ориентированы также на изучение специфики роста, развития и формирования урожайности сенокосно-пастбищной растительности в горных районах Средней Азии (И. Г. Грингоф, П. А. Ан, Т. Е. Сумочкина, Л. М. Никитина и др.).

Была выполнена серия исследований по агрометеорологии и агроклиматологии сеяных кормовых трав (А. М. Могилева, А. Т. Никифорова, Л. Н. Бабушкин, И. Г. Сабина, В. А. Смирнов, В. М. Степанова, Г. Н. Ковальчук, В. А. Корнеев, В. Н. Дюбин, Л. И. Корнеева).

Большое внимание уделялось разработке агрометеорологических методов оценки и прогноза состояния, роста и формирования урожая естественной растительности в пустынях и горах различных регионов СССР. В 1984 г. Гидрометцентр СССР совместно с ВНИИСХМ и другими учреждениями ведомства опубликовали два тома „Руководства по агрометеорологическим прогнозам”, в части III 2-го тома которого были собраны апробированные к тому времени методы агрометеорологических прогнозов произрастания сеяных и луговых трав на территории СССР (авторы: Н. В. Гулинова, А. И. Страшная, И. Г. Грушка, С. И. Кочетова и А. В. Русакова, И. Г. Сабина, А. П. Федосеев и др.). В части IV этого тома представлены методы агрометеорологических оценок и прогноза состояния, роста и продуктивности сенокосов и пастбищ в пустынях, тундре и горах и, кроме того, некоторые зоометеорологические методы оценки и прогноза условий для выпаса, стрижки животных и т. п. (авторы: А. П. Федосеев, С. А. Бедарев, Е. Н. Коробова, И. Г. Грингоф и И. Г. Сабина; З. Н. Белоусова, М. С. Гамаюнова, Р. С. Мкртчян и др.; В. Г. Бондаренко, Л. В. Лебедь, Н. Д. Влазенько, Н. И. Хлыновская, В. П. Петрашин, Н. А. Конюхов и А. И. Чекерес и многие другие).

В начале 1990-х годов началась разработка динамических моделей типа „погода—пастбище”, „погода—выпасаемое поголовье”. Во ВНИИСХМ были разработаны основные принципы динамического моделирования продуктивности пастбищ (А. Н. Полевой, И. Г. Грингоф, В. Ф. Гридасов), заключающиеся в матема-

тическом описании продукционного процесса на уровне растений-эдификаторов (компоненты фитоценоза) и отдельных органов растений. Одновременно были разработаны теоретические основы моделирования влияния погодных условий на продуктивность овец (И. Г. Грингоф, С. А. Даниелов). Эти работы были положены в основу комплексной динамико-статистической модели формирования продуктивности пастбищной растительности и выпасаемого поголовья скота в зависимости от погодных условий, складывающихся в каждом конкретном году в полупустынной зоне России (С. А. Даниелов, А. П. Бойко, И. Г. Грингоф). Модель была испытана и внедрена в оперативной работе агрометеорологов Северо-Кавказского УГМС по территории Калмыкии.

Н. И. Хлыновской впервые удалось обобщить многолетние наблюдения и исследования в области агроклиматологии северного растениеводства, агрометеорологии тундровых пастбищ, оценки условий содержания северных оленей и заболеваний этих животных под воздействием погодных условий.

В эти же годы во ВНИИСХМ заметное развитие получили работы, направленные на совершенствование оперативного зоометеорологического обеспечения северного оленеводства. На условиях хозяйственных договоров с Якутским АГРОПРОМОМ была разработана динамико-статистическая модель „погода—продуктивность северного оленя”, ориентированная на расчет динамики веса животного, изменяющегося под влиянием условий зимнего периода и особенностей добывания оленем кормов из-под снега (А. Н. Полевой, М. Т. Гермогенов).

В 1980—1990-х годах комплекс зооклиматических и зоометеорологических исследований влияния зимних (холодных) и летних (знойных) сезонов и конкретных погодных условий на поголовье овец, круглогодично содержащихся под открытым небом в пустыне Кызылкум (Узбекистан), был выполнен О. Л. Бабушкиным и др. (САНИГМИ).

Дальнейшее развитие пастбищной агрометеорологии может быть реализовано через систему пастбищного (агрометеорологического) мониторинга.

РАБОТЫ ПО АКТИВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ НА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Проведение работ по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы в интересах различных отраслей народного хозяйства — одно из важных направлений деятельности учреждений и организаций Росгидромета. Это одно из основных направлений как отечественной, так и зарубежной науки, и в России оно получило значительное развитие не только благодаря возрастающим потребностям народного хозяйства (и прежде всего агропромышленного комплекса), но и в результате успешной разработки для этих целей научно-методических и технических основ учеными Росгидромета.

Сложность осуществления целенаправленного, активного вмешательства человека в ход атмосферных процессов заключается в том, что невозможно воспроизвести их в лабораторных условиях, и в том, что воздействовать на погоду нужно с величайшей осторожностью, чтобы не вызвать нежелательных экологических и других последствий.

Испокон веков человек хотел научиться управлять погодой. Еще Геродот оставил нам рассказ о том, как фракийцы запускали стрелы в облака, чтобы заставить их прекратить „бросать” на землю град, который уничтожал плоды тяжелого труда земледельца. Отчаяние толкало человека на это. Позднее, с развитием техники, для этих целей стали использовать ружья, мортиры, пушки и другие средства. Никто в те времена не задумывался о механизме облачных процессов, связанных с вмешательством человека в облачную „кухню”. Однако человечество рождает ученых-фантастов и, пожалуй, они были той главной движущей силой, которая все чаще и чаще заставляла людей более разумно и осмысленно подходить к выбору средств и методов воздействия на неблагоприятные явления погоды.

XIX в. можно назвать веком первых научных идей о возможном воздействии на атмосферные явления. В 1880 г. генералу Раглессу был выдан патент на вызывание дождя путем производства взрывов в облаках, а через семь лет д-ру Этуореру вручили такой же документ на способ ослабления и предотвращения торнадо (смерч) при помощи взрыва в центре этого возмущения.

Наиболее интересное открытие в этом столетии было сделано Гаитманом. Он запатентовал способ вызывания дождя введением в облако жидкой углекислоты с использованием воздушных шаров или снарядов. Как известно, в последующие десятилетия, до и в настоящее время этот способ является наиболее оригинальным.

Одновременно в России и других странах Европы начали использовать мортиры и пушки в борьбе с градом. Один из уважаемых бургомистров Австрии (Штигер) установил на холмах, окружающих район Штраймарка, 36 „градовых пушек”. Это были вертикально направленные 3-сантиметровые мортиры, над которыми укреплялись дымовые трубы паровых локомотивов. Впечатление было потрясающее. При стрельбе издавался страшный грохот, от каждого орудия образовывалось дымовое кольцо диаметром около 1 м, которое поднималось вверх со скоростью 30 м/с. Такие меры воздействия на облако получили развитие почти во всей Европе. Однако множество несчастных случаев побудило правительство Австралии в 1902 г. созвать международную конференцию для обсуждения эффективности противоградовых средств. Было предложено провести два сравнительных опытных испытания — в Австрии и Италии. Результаты были отрицательными, однако они дали большой толчок развитию идей для создания научно обоснованных методов возможного искусственного воздействия на отдельные явления погоды.

В 1910 г. Вегенером в его научной работе „Термодинамика атмосферной воды” отмечается, что в облаках при температуре до -20° вода всегда присутствует в трех фазах: пар — переохлажденная вода — лед.

В начале 1930-х годов Бергерон и Финдайзен на основе полуженей Вегенера развили теорию образования осадков. Согласно представлениям этих исследователей, сосуществование ледяных кристаллов и переохлажденных облачных капель при одной той же температуре приводит к быстрой перегонке водяного пара с капелек на кристаллы. Эта гипотеза впоследствии легла в основу работ по активным воздействиям на облака. Однако пока это были только предположения и гипотезы.

В эти годы небольшой коллектив российских ученых, возглавляемый профессором В. Н. Оболенским, впервые в мире попытался поставить решение проблемы искусственного воздей-

ствия на атмосферные процессы на определенную научную основу и начать широкий, по тому времени, комплексный эксперимент. Уже к концу 1930-х годов удалось получить на основе натуральных экспериментов первые результаты — активные воздействия на атмосферные процессы возможны и перспективны.

Экспериментальные работы были прерваны войной и возобновлены в нашей стране в начале 1950-х годов. В 1946 г. Венсет Шеффер и почти одновременно российский ученый В. В. Петрович провели универсальный эксперимент, который явился основой всех современных работ по искусственным воздействиям на атмосферные процессы. При введении твердой углекислоты в переохлажденный туман они наблюдали быстрое замерзание капель воды.

В ноябре 1946 г. Шеффер и лауреат Нобелевской премии химик Ирвинг Ленгмюр, пытаясь раскрыть тайны выпадения осадков, сбросили с самолета только три фунта сухого льда на слоистое облако (штат Нью-Йорк), и на глазах экспериментаторов из облака стал выпадать густой снег. Это был успех — начало практического воздействия на погоду.

Как обычно в таких случаях, коммерческие фирмы, взяв на вооружение результаты впечатляющих опытов, начали подписывать контракты на производственные работы с целью борьбы с таким опасным явлением погоды, как град, а также и на работы по искусственному увеличению осадков и рассеянию туманов. Однако не прошло и 5—7 лет, как фермеры, основные потребители данных работ, объявили, что зря потратили деньги на эти работы, так как они оказались нерентабельными. В чем дело?

Детальный анализ проведенных работ показал, что положительные результаты отдельных опытов как по подавлению града, так и по вызыванию искусственных осадков — это только первый этап на пути решения сложнейшей научной проблемы — изменять погоду в интересах и по желанию человека.

Будем откровенны: точность аппаратуры 1950—1960-х годов, применяемой для исследования атмосферных процессов, была явно недостаточной, и оценка эффекта воздействия на единичное облако или систему облаков, выполненного с помощью имеющихся в те годы технических средств, оказалась неубедительной. А потребителям (например, сельскохозяйственным органи-

зациям) необходима была гарантия уменьшения ущерба от опасных явлений погоды и не относительная, а абсолютная.

Итак, имеется эффект от активных воздействий на облака, но какой, когда и где?

Эти вопросы потребовали пересмотра многих научных, технических и организационных взглядов на постановку новых проектов в области искусственного изменения хода метеорологических процессов.

Следует отметить, что успешно воздействовать на погоду с целью целенаправленного изменения можно лишь при надежном знании не только фактического, но и ожидаемого ее естественного состояния к моменту воздействия. Однако как прогноз погоды, так и активные воздействия являются сложнейшими проблемами современности.

Академик С. И. Вавилов называл прогноз погоды и возможности ее изменения одними из труднейших и актуальнейших научных проблем нашего времени. Увеличение атмосферных осадков и тем более их перераспределение считал одной из важных и основных современных проблем и президент АН СССР А. П. Александров.

Надо отметить, что вопросы прогнозирования погоды и воздействия на нее с целью искусственного изменения взаимосвязаны. В Росгидромете этот факт был доказан на опыте развития работ по активным воздействиям на градовые процессы. Развитие методов подавления града позволило создать краткосрочные прогнозы градовых процессов с достаточно большой оправдываемостью (более 90 %).

За последние годы в России, США, Канаде, Франции, Австралии, Израиле, Швейцарии и других странах были проведены крупные научно-экспериментальные исследования воздействия на атмосферные процессы. Достаточно сказать, что российские средства и методы подавления града применяются и в Аргентине, Сирии, Болгарии, Монголии.

В 1960—1990-е годы в организациях Гидрометслужбы во многих случаях проверена в натуральных условиях возможность активного целенаправленного воздействия на гидрометеорологические явления локального масштаба, такие как град, облака и осадки, туманы, грозы, лавины, заморозки и др.

Значительный вклад в развитие работ по активным воздействиям внес академик Е. К. Федоров как руководитель Гидрометслужбы, которая являлась и является головным ведомством в стране, отвечающим за развитие и координацию работ по модификации погоды в России. В его работах были впервые сформулированы принципы, положенные в основу поисков современных методов активного воздействия на гидрометеорологические процессы. Поскольку в атмосферных процессах заключена колоссальная энергия, он справедливо полагал, что воздействия на них по принципу прямого преодоления природных сил на данном уровне развития науки и техники практически невозможны, а реальные возможности управления облачными процессами состоят в отыскании их неустойчивых состояний, при которых небольшие количества энергии или специальные реагенты способны привести в действие природные силы, которые могут изменить течение процесса в нужном направлении. В своих работах он четко выделил те неустойчивые состояния в атмосфере (фазовая, термическая неустойчивость и др.), при которых следует ожидать проявления особенно эффективных каналов управления атмосферными процессами.

Предположение о возможности проведения практических работ по активному воздействию Е. К. Федоров впервые высказал в 1954 г. Через 8 лет он отметил, что „проблема активного воздействия на метеорологические процессы как раз такова, что представляет интерес для общества уже сегодня, станет актуальной в будущем”. Он указал на три основных направления: рассеяние облаков и туманов, получение дополнительных осадков и изменение развития облаков конвективных форм с целью подавления града. При этом было высказано убеждение в том, что „работы по активному воздействию могут проводиться еще до того, как будет разработана достаточно совершенная теория численного прогноза соответствующих явлений”.

В стране, впервые в мире, были развернуты работы по рассеянию облаков и туманов, начались широкие исследования по созданию средств и методов защиты сельскохозяйственных культур от градобитий.

С 1967 г. по договорам с Министерством сельского хозяйства Гидрометслужба начала крупные промышленные работы по защите сельскохозяйственных угодий от градобитий на больших

площадях в южных районах страны. В результате этих работ в стране была создана служба по борьбе с градом. Ученые Гидрометслужбы стали разрабатывать методы и технические средства воздействия. Для обеспечения этих работ академиком Е. К. Федоровым были созданы специальные научно-исследовательские подразделения по изучению процессов облако- и осадкообразования, активному воздействию на них.

Работы по искусственному увеличению осадков стали одной из основных тематик Украинского научно-исследовательского института (УкрНИИ) и Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО). С целью развития работ по исследованию физики облаков и активных воздействий на них в г. Обнинске был создан Институт экспериментальной метеорологии с уникальным аэрозольным корпусом, оборудованным комплексом установок и аппаратуры для изучения микрофизических и оптических процессов в облаках и туманах при естественном развитии и искусственном воздействии на них. На базе филиала Института прикладной геофизики (ИПГ) создан Высокогорный геофизический институт (ВГИ) в г. Нальчике с целью исследования градовых и снеголавинных процессов и активного воздействия на них. Кроме того, для организации технической базы в ЦАО создан отряд самолетов-метеолабораторий, оснащенных специально разработанной электронной аппаратурой для исследований быстроменяющихся параметров облаков и атмосферы; создан ряд макетов приборов и установок для изучения процессов, связанных с облако- и осадкообразованием как в приземном слое, так и в свободной атмосфере, а также технические средства активного воздействия на облака и туманы (ЦАО, ИЭМ, ВГИ и др.).

В России с конца 1950-х—начала 1960-х годов начались крупномасштабные работы по исследованию градовых процессов и возможности предотвращения градобитий. В этих работах приняли участие ВГИ, ЦАО, Главная геофизическая обсерватория (ГГО), Институт геофизики Грузии (ИГАН), а также другие организации Гидрометслужбы (Закавказский научно-исследовательский гидрометеорологический институт (ЗакНИГМИ), Среднеазиатский научно-исследовательский гидрометеорологический институт (СарНИГМИ) и др.). Наибольший вклад в создание технических средств воздействия сделали ЦАО, ВГИ, ГГО, ИЭМ. Проведены большие работы (ЦАО, УкрНИГМИ, Ставропольский

аучно-производственный геофизический центр (СтНППЦ) и другие НИУ) по оценке водных ресурсов облачных систем. Проводились работы по раскрытию от облачного покрова площади более 10 000 км² с различными целями (локальное воздействие на погоду, обеспечение оптической видимости во время солнечного затмения и т. п.). В 1962 г. были проведены первые опыты о динамическому воздействию на конвективные облака с целью подавления их роста. В районе озера Севан ИПГ совместно с Гидрометслужбой Армении была создана универсальная установка "Метеотрон" с использованием турбореактивных двигателей с целью создания облачных образований и получения дополнительных искусственных осадков. К сожалению, из-за возможного влияния последствий воздействия продуктов сгорания топлива на окружающую среду это направление не получило дальнейшего развития.

В начале 1960-х годов начались опытно-экспериментальные воздействия на градовые облака (Северный Кавказ, Грузия и Молдавия).

Образование конвективных облаков и осадков связано со сложными макро- и микрофизическими процессами и их взаимодействием в атмосфере. Относительная недоступность грозовых облаков для прямых инструментальных измерений является причиной того, что до настоящего времени их динамика и микрофизическая структура исследованы недостаточно полно. Несмотря на это, современное состояние исследований градовых процессов позволило построить схемы образования конвективных облаков, удовлетворительно объясняющих процесс образования ливневых осадков и связанных с ними метеорологических явлений, а также разработать физические основы воздействия на конвективные облака с целью подавления града.

Кучево-дождевые облака подразделяются на три основных типа: одноячейковые, многоячейковые и суперячейковые.

Наиболее интенсивные и продолжительные градобития связаны с развитием сверхмощных градовых облаков, которые обычно состоят из одной, реже из двух ячеек. Такие облака имеют большую горизонтальную протяженность (более 90 км в поперечнике), высоту от 10 до 15—17 км и устойчивую циркуляцию. Длина градовой дорожки иногда достигает 100—200 км. В среднем ширина градовой полосы составляет 3—5 км, длина —

15—20 км. Толщина слоя выпавшего града при суперячейковы процессах может достигать 30 см, среднее значение — около 5 см. Продолжительность выпадения града в отдельном пункте колеблется от нескольких секунд до 1 ч. Чаще всего продолжительность градобития составляет 5—10 мин.

На основании этих представлений в СССР начались большие работы по внедрению методов по предотвращению градобития. Как известно, градобития наносят большой материальный ущерб. В некоторых сельскохозяйственных районах, подверженных градобитиям, средние потери урожая составляют 15—20 %. Ежегодно мировой экономике градобития наносят ущерб, оцениваемый в несколько миллиардов долларов США. Большая часть этого ущерба приходится на сельское хозяйство. Во многих странах мира проводятся исследования по физике конвективных облаков и осуществляются проекты по борьбе с градом (Аргентина, Бразилия, Болгария, Испания, Канада, Китай, США, Франция, Германия, ЮАР и др.).

В начале 1960-х годов в России была создана эмпирическая модель градового облака, послужившая основой для разработки технологии воздействия и определившая ряд требований, которым должны удовлетворять методики и технические средства воздействия на градовые процессы. С 1967 г. производственные работы по борьбе с градом проводятся военизированными службами (ВС) Росгидромета. С 1967 г. начали работать Северо-Кавказская, Краснодарская, Грузинская, Молдавская, Азербайджанская, Армянская и Таджикская военизированные службы с 1969 г. — Узбекская ВС, с 1970 г. — Крымская ВС, с 1980 г. — Одесская ВС.

Российские метод и средства воздействия на градовые процессы с 1985 г. стали применяться (по контрактам) в Аргентине, Болгарии, Бразилии и в других странах.

Принцип искусственного подавления града базируется на способности искусственных зародышей градин конкурировать с переохлажденную воду с естественными зародышами и обуславливать в облаках критические концентрации масс воды — лед приводящих к обрушению осадков, не содержащих крупных градин.

Для создания искусственных зародышей производится засев облаков льдообразующими реагентами. Разработанные в России

протехнические составы на базе реагента AgJ имеют льдообразующую активность (при температуре -10°C), равную $(2-5) \cdot 10^{12}$ ядных частиц на 1 г пиросостава. Температурный порог действия пиросостава приходится на -5°C .

Механизм образования зародышей протекает по схеме: частица кристаллизующего реагента—ледяной кристалл—захват ледяного кристалла переохлажденной каплей—зародыш градины. Зародыши градин могут возникать также при росте и обзернении кристаллов льда.

Так как при засеве облаков не все ледяные частицы могут гать зародышами града, для создания необходимых концентраций искусственных зародышей града в зоне его зарождения засева облаков осуществляется из расчета 10^5-10^6 активных ядер на м^3 .

Эти принципы воздействия положены в основу разработанной технологии противорадовой защиты.

Основные технические средства, применяемые при проведении противорадовых работ, следующие: специализированный метеорологический радиолокатор „Радиорад“ (МРЛ-5) и автоматизированные комплексы управления операциями по воздействию; специальные противорадовые ракетные комплексы (ракеты типа „Алазань“ или „Кристалл“); средства связи и др.

В создании технических средств по подавлению града приняли участие промышленные предприятия: завод „Электроапп“, ЧПО им. Чапаева, КХЭ, ПО ЗИМ, ВНИИ „Дарс“ и др.

Острый дефицит воды в ряде регионов страны и мира становится все более ощутимым и тормозит развитие сельскохозяйственного производства и других отраслей народного хозяйства, включая гидроэнергетику.

В атмосфере Земли содержится около 600 тыс. км^3 воды, но лишь примерно 1 % ее заключен в облаках. Остальное рассеяно главным образом в приземной атмосфере (до 1,5—2 км от поверхности земли). Заставить работать на благо человека хотя бы небольшую часть этой влаги, пустить ее в народнохозяйственный оборот — одна из важнейших задач и сложнейших проблем для многих стран мира.

В 1960—1990-е и особенно в последние годы все большее внимание ученых, специалистов, хозяйственных, общественных и

государственных органов привлекает проблема получения дополнительной воды из облаков путем развития и внедрения методов активного воздействия на атмосферные процессы.

Сложность целенаправленного изменения облачных процессов в интересах человека обусловлена многими причинами. Это непростые зависимости атмосферных процессов от множества факторов, разных по значению и масштабам, которые в свою очередь сложно зависят друг от друга. Это и недостаточная изученность атмосферных процессов, связанная, в частности, и с тем что их воспроизведение в лабораторных условиях практически невозможно. Это, наконец, и необходимость тщательного выбора средств и методов воздействия на облака с целью регулирования осадков, чтобы не вызвать непредвиденных, нежелательных, и обратимых процессов, которые могут проявиться либо немедленно и в ограниченных масштабах, либо в отдаленном будущем на огромных пространствах, часто удаленных от места проведения опытов.

Развитие методов и средств регулирования атмосферных осадков, оказывающих решающее влияние на распределение водных ресурсов, в последние годы получило широкое признание в настоящее время по праву может быть отнесено к одному из приоритетных направлений исследований проблемы модификации погоды.

В нашей стране регулярные исследования возможности искусственного увеличения осадков (ИУО) были начаты практически в 1959 г. в УкрНИИ на специально созданном в Софиевском районе Днепропетровской области экспериментальном метеорологическом полигоне. В дальнейшем к решению этой задачи приступили многие НИУ и ВС Гидрометслужбы и организации других министерств и ведомств. Большую роль в развитии работ по ИУ сыграли ЗапНИГМИ, САНИГМИ, СтНПГЦ, ВС Молдавии, Узбекистана, Украины и др.

Организациями Росгидромета (ЦАО, ГГО, СтНПГЦ) проведен большой комплекс работ, направленных на изучение облачных ресурсов в различных районах страны и за рубежом (Болгария, Сирия, Куба, Монголия) с целью определения наиболее перспективных из них для организации работ по искусственному увеличению осадков, получения новых данных о строении облаков процессах облако- и осадкообразования для разработки рекоменда-

аций по воздействию и уточнению критериев пригодности обла-
ов для получения из них дополнительных осадков, а также для
азработки методов планирования и оценки работ по искусствен-
ому увеличению осадков. Экспериментальные исследования
роводились в районах Днепропетровской, Московской областей,
оволжья, Ставрополья, Якутии, Западной Сибири, в Санкт-Пе-
эргбурге, Ленинградской области и в других районах страны. На
сновании результатов проведенных работ получены новые дан-
ые для построения численных моделей холодного фронта и
нутримассовых облачных систем. Разработаны рекомендации
о усовершенствованию методов воздействия на облака различ-
ых типов, а также по оптимальному планированию и оценке эф-
ективности работ по увеличению осадков.

Значительные работы проведены по созданию технических
редств доставки реагента в облако. К настоящему времени раз-
работаны комплексы самолетного оборудования, включающие
нформационно-вычислительную систему, аппаратуру воздей-
гвия аэрозолем, углекислотную дозирующую установку. Разра-
тан и внедрен автоматизированный комплекс сбора, обработки
представления радиолокационной информации об облаках в
азных режимах.

Ценный научный материал был получен специалистами Рос-
дромета в период проведения в Испании Международного про-
кта по увеличению осадков (ПУО), который осуществлялся по
ешению ВМО и одной из основных задач которого была коли-
ественная оценка эффекта воздействия на фоне большой естес-
венной изменчивости осадков.

В результате проведения ПУО путем координирования радио-
окационных и самолетных наблюдений специалистам Росгид-
омета (ЦАО) удалось выявить устойчивую связь неоднороднос-
и поля ветра с зонами переохлажденной жидкокапельной влаги
облаках. Совместные самолетные, радиолокационные и другие
аблюдения позволили также получить дополнительные данные
физических и структурных параметрах облачных систем и вы-
олнить количественные оценки возможных эффектов воздей-
гвия.

Эти данные, а также проведенные ЦАО комплексные исследе-
ования на территории России дают возможность надежно опре-
елять и даже прогнозировать зоны засева, рекомендовать опти-

мальные схемы и технологии воздействия, улучшить метод планирования экспериментов и производственных работ по искусственному увеличению осадков.

Необходимо отметить, что в ПУО принимали участие ученые России, Испании, США, Франции, Болгарии, Канады, Швейцарии, Австралии и других стран.

В целом выполненные исследования позволили осуществить в России опытно-производственные работы по искусственному увеличению осадков в ряде регионов: Поволжье, Ставропольский край, Якутия и др. Предварительная оценка эффективности проведенных работ показывает, что увеличение суммы зимних осадков составляет в среднем около 15 %.

Успешное подавление или ослабление опасных явлений погоды, таких как туман и низкая облачность, грозы, снежные лавины, заморозки и т. п., в значительной мере повышает регулярность и безопасность работы различных видов транспорта, уменьшает потери сельскохозяйственной продукции и снижает непосредственную угрозу жизни людей.

Основы методики раскрытия аэродромов от переохлажденных туманов были разработаны ЦАО в 1950-х годах, а затем развиты в УкрНИГМИ. Рассеяние туманов проводилось с использованием самолетов-метеолaborаторий, оборудованных установками для сброса твердой углекислоты. Проведенные в 1960-1970-е годы опытно-производственные работы в аэропорте Алма-Аты, Иркутска, Днепропетровска и других с целью повышения регулярности полетов дали хорошие результаты, однако из-за дороговизны самолетные методы не получили дальнейшего развития. В связи с этим специалисты ЦАО в 1970-х годах предложили более дешевый и эффективный способ с использованием пропановых установок, который с 1976 г. начал применяться в аэропорту Кипинева. Учитывая, что использование пропана требует обеспечения повышенной безопасности, ученые ЦАО в начале 1980-х годов разработали новый метод рассеяния переохлажденных туманов с использованием наземных азотных генераторов. Исследования показали, что жидкий азот как хладореагент по эффективности кристаллообразования не уступает применявшимся ранее реагентам и имеет ряд преимуществ, в частности отличается экологической чистотой. В зимние сезоны в конце 1980-х—начале 1990-х годов в аэропортах Алма-Аты и Москв

аэропорт Шереметьево) с использованием данного метода проводились работы в широком диапазоне метеорологических условий при температуре от 0 до -25°C . Положительные результаты были достигнуты в 85—87 % воздействий. По оценкам экономических служб аэропортов, стоимость предотвращенных потерь олее чем в 10 раз превысила стоимость затрат.

С 1996 г. метод с использованием жидкого азота ЦАО начала недрять (по контрактам) в Италии (аэропорт г. Парма и автограда Венеция—Триест).

Параллельно с работами по рассеянию холодных туманов была разработана и испытана методика рассеяния низких холодных облаков самолетными средствами с использованием в качестве реагента твердой углекислоты. Ведется также поиск путей оздействия на теплые облака и туманы с целью их рассеяния.

В 1970-х годах в ВГИ разработан метод по искусственному пуску снежных лавин с целью обеспечения безопасности людей, есперебойной работы различных объектов народного хозяйства, сключения материального ущерба в лавиноопасных горных районах интенсивного народнохозяйственного освоения и массового тдыха трудящихся. Спуск лавин осуществляется путем обстрела мест скопления снега, а время спуска определяется по результатам специальных метеорологических наблюдений. Для обстрела используются артиллерийские и минометные средства, соответствующие взрывчатые вещества, специализированные ружья. Кроме того, применяется метод подрезки лавиноопасного массива.

В начале 1980-х годов Гидрометслужба создала специальные ротиволавинные подразделения (отряды), входящие в состав ЮС, на Северном Кавказе (Приэльбрусье, Рокский перевал, Домай, Аксаутское ущелье) и в Узбекистане (урочища Чимган и Ягта-Коксай). В 1993 г. постановлением Правительства Российской Федерации в составе Росгидромета при соответствующих ГМС и ВС создана противолавинная служба, подразделения которой в настоящее время функционируют на Северном Кавказе, Забайкалье, на Камчатке, Сахалине, в Колымской области и Краснодарском крае.

Определенные результаты получены в области создания методов ослабления электрической активности облаков. Выполнены ценки изменения электрического состояния атмосферы под

влиянием аэрозолей. Натурные эксперименты и численное моделирование (ГГО, ВГИ) позволили обосновать оптимальный состав технических средств воздействия и разработать требования на их создание. Наибольший эффект достигается при проведении активных воздействий на предгрозовой стадии развития грозовых явлений в облаке.

Проведены исследования по обоснованию наиболее перспективных методов борьбы с заморозками, которые показали, что применение вертолетов и специальных ветровых машин, обеспечивающих „закачку” к защищаемым от заморозков территориям с ценными сельскохозяйственными культурами более теплого воздуха из вышележащих слоев атмосферы, по своей эффективности может найти практическое применение. Учитывая дороговизну этих методов, ИЭМ и Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии (ВНИИСХМ) в 1990-х годах разработали новый тепловой метод защиты растений от заморозков, основанный на создании распределенных источников тепла путем нанесения на поверхность почвы дисперсных тепловыделяющих веществ (реагент ГК-1, в состав которого входит гидрид кальция СаОН). Применение данного метода экономически выгодно и экологически безопасно. Кроме того внесение реагента оказывает действие, аналогичное известкованию, и приводит к повышению плодородия кислых почв. В настоящее время завершаются работы по испытанию и внедрению метода в народном хозяйстве.

В заключение необходимо отметить, что было бы неправильным полагать, что в настоящее время проблема активного воздействия на гидрометеорологические процессы в целом решена, все резервы использованы. Достаточно указать на необходимость разработки нетрадиционных способов воздействия на облачные системы с использованием, например, различного вида электромагнитных, акустических и других излучений, созданием оригинальных средств доставки и диспергирования реагентов на основе применения легких воздушных баллонов, наземных генераторов, более широкого применения радиолокационных и радиометрических методов исследований и численного моделирования, быстрой разработки и оснащения исследовательских подразделений современной контрольно-измерительной аппаратурой для получения микрофизических и термодинамических

арактеристик изучаемых объектов, создания объективных и
ростых методов оценки эффективности результатов активных
здействий. Необходимо разработать юридические аспекты про-
лемы, постоянно совершенствовать организационные формы
оведения исследовательских, опытно-производственных и
роизводственных работ.

О РАЗВИТИИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

Метеорологическая радиолокация в нашей стране прошла сложный путь развития — с зарождения, широкого внедрения народное хозяйство, в особенности для обслуживания авиации до периода расцвета, когда метеорологические радиолокаторы (МРЛ) образовали единую развитую сеть, охватывающую всю территорию СССР. Отечественные МРЛ-станции некогерентного типа были самыми совершенными и наиболее дешевыми в мире. Их охотно покупали другие страны на разных континентах, имеющие своей достаточно развитой электронной промышленности.

Но уже к началу перестройки развитие отечественных МРЛ начало замедляться главным образом из-за отсутствия надежной вычислительной техники. Свою отрицательную роль сыграло возникновение нездоровой конкуренции между НИИ-разработчиком и заводом-производителем аппаратуры. Последовавший экономический развал привел практически к полному срыву финансирования новых разработок. К таким новым разработкам относятся доплеровские МРЛ, в создании которых намечали определенные успехи. Более того, выпуск обычных МРЛ, представляющих собой основной инструмент радиолокационных метеорологических сетей, практически прекратился из-за их дороговизны.

В связи с этим нынешняя техническая политика в отношении метеорологических радиолокационных средств состоит в поддержании работоспособности эксплуатируемых на сети МРЛ, в попытках проведения возможных в условиях эксплуатации модернизаций путем внедрения доплеровского режима и поляризационной селекции. Определенные достижения к настоящему времени достигнуты в области внедрения автоматических средств обработки и предоставления потребителю радиолокационной метеорологической информации в некоторых крупных аэропортах обеспеченных соответствующим финансированием.

Еще в период зарождения радиолокации было установлено, что некоторые типы радиолокационных станций (РЛС), предназначенные для обнаружения самолетов, способны обнаруживать:

зоны облаков и осадков. Так, в феврале 1941 г. с помощью 10-сантиметрового английского радиолокатора были обнаружены грозовые облака на расстоянии 13 км. В связи с этим ряд ученых именно эту дату считает датой рождения нового научного направления — радиолокационной метеорологии.

В нашей стране РЛС впервые были использованы для определения ветра на высотах в 1943 г. в Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) В. В. Костаревым и Г. И. Гольшевым. В Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (ГГО) в 1946 г. под руководством Е. Т. Рыбакова начались систематические радиоветровые наблюдения на радиолокаторе СОН-2. Появление после Великой Отечественной войны трехсантиметровых самолетных РЛС типа „Кобальт” привлекло внимание специалистов к разработке дистанционного радиолокационного метода получения информации об облаках и связанных с ними явлениях погоды (осадках, грозах, граде, шквалах) для метеорологического обеспечения авиации. Усилиями сотрудников ЦАО и ГГО В. В. Костарева, Н. Ф. Котова, П. Н. Николаева и других в ряде пунктов были организованы первые систематические радиолокационные наблюдения для своевременного штормового оповещения. Изучались также вопросы применения РЛС „Кобальт” в полете для обхода ливней и гроз (Н. Ф. Головач, А. В. Беляков, М. М. Иоффе, В. Д. Степаненко и др.).

С 1951 г. проводились исследования облаков и осадков с помощью не только трехсантиметровой, но и 10-сантиметровой РЛС. Методика применения этих РЛС предусматривала исследование ливней и гроз. С помощью первой РЛС по методике Н. Ф. Котова и других можно было получать горизонтальные разрезы дождевых облаков в радиусе до 200 км. Угол места антенны изменялся ступенями через 2° после каждого оборота антенны по азимуту. В результате были выявлены особенности макроструктуры осадков при различных синоптических условиях, а также получены статистически значимые различия вертикальных и горизонтальных геометрических размеров радиоэхо ливней и гроз.

В ГГО Е. М. Сальман с помощью 10-сантиметровой РЛС, оборудованной индикатором типа А, определил значения отражаемости дождевых облаков и осадков, общие закономерности ее вертикального и горизонтального распределения в ливнях и гро-

зах. Были также получены оценки возможности применения РЛС для измерения характеристик дождей по их радиолокационной отражаемости.

Н. Ф. Котов определил критериальное значение температуры вершины радиоэхо, равное $-22,4^{\circ}\text{C}$, что позволило разделить ливни и грозы. Оказалось, что 93 % ливней развиваются до высоты изотермы $-22,4^{\circ}\text{C}$ и 93 % гроз имеют в вершине крупнокапельной части температуру ниже $-22,4^{\circ}\text{C}$. В качестве критерия для распознавания ливней и гроз предлагалось использовать величину отношения толщины переохлажденной части кучево-дождевого облака к высоте нулевой изотермы.

С помощью указанных критериев по данным РЛС типа „Кобальт” задачу распознавания грозовых и негрозовых кучево-дождевых облаков можно было решать достаточно надежно только в радиусе 50—60 км, так как именно в этом радиусе технические параметры позволяли более или менее удовлетворительно определять высоты верхних границ указанных облаков и их горизонтальные размеры.

В дальнейшем большое внимание уделялось анализу и интерпретации радиолокационной метеорологической информации об облаках различных типов, выпадающих из них осадков, визуально ненаблюдаемых объектах тропосферы, распознаванию грозовых и ливневых очагов и т. д. В связи с недостаточным энергетическим потенциалом трехсантиметровой РЛС „Кобальт” ЦАО В. В. Костаревым и его сотрудниками была сконструирована уникальная установка, позволяющая осуществлять вертикальное зондирование тропосферы и тропосферных образований. Она имела неподвижную приемопередающую антенну диаметром 20 м. В ЛВИКА им. А. Ф. Можайского для достижения заметного повышения вероятности и дальности обнаружения облаков и осадков была применена вращающаяся двухметровая параболическая антенна для РЛС „Кобальт”. Для повышения эффективности слабоотражающих метеорологических объектов (не дождевые облака, визуально ненаблюдаемые диэлектрически неоднородности в тропосфере) В. В. Костаревым и А. Г. Гореликом был разработан накопитель, обеспечивающий повышение чувствительности приемника примерно на полтора порядка.

Опыт работы наземной сети штормоповещения РЛС „Кобальт”, экспериментальные исследования Н. Ф. Котова, П. Н. Ни

Солаева, Е. М. Сальмана, В. В. Костарева, В. Д. Степаненко, З. М. Мучника и других, а также ГГО, ЦАО, Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института УкрНИГМИ), ЛВИКА им. А. Ф. Можайского, результаты теоретических исследований К. С. Шифрина позволили сформулировать обоснованные технические требования к разработке специализированной метеорологической радиолокационной станции. Такая станция в конце 1950-х—начале 1960-х годов была разработана во Всесоюзном НИИ радиоаппаратуры (ВНИИРА) под руководством Г. Ф. Шевелы и С. И. Ваксенбурга (МРЛ-1) и стала первым отечественным МРЛ. Его рабочими длинами волн были 3 и 0,8 см. Стационарный вариант этого МРЛ, работающий на волне 3 см, был назван МРЛ-2.

С целью выяснения особенностей и метеорологической эффективности первого отечественного радиолокатора МРЛ-1 специалисты ГГО совместно с представителями других организаций провели летом 1962 и 1963 гг. экспедиции в районе Ленинградской области и вблизи г. Калинина. В этих экспедициях наряду с МРЛ-1 использовались РЛС П-35 и ПРВ-10, были организованы специальные радиозондирования и самолетные зондирования атмосферы и облаков. В результате исследований была определена вероятность радиолокационного обнаружения облаков и осадков по сравнению с данными наземной сети метеорологических станций, выявлены общие закономерности вертикальной структуры радиоэхо ливней и гроз, оценены погрешности радиолокационных измерений верхней границы кучево-дождевых облаков, изучены особенности радиоэхо облаков и осадков при различных синоптических ситуациях, проанализирована точность измерения мощности радиоэхо, эхо-сигналов с помощью МРЛ-1.

На основании экспериментальных данных было показано, что с вероятностью обнаружения, близкой к 80—100 %, МРЛ-1 имеет следующие радиусы действия: 150—200 км для гроз, 100 км для ливней и обложных дождей, 50 км для обложного неба. Облака без осадков (St, Sc, As, Ac) даже над „точкой” обнаруживаются в 50—60 % случаев.

Результаты дальнейших исследований эффективности получения и применения радиолокационной метеорологической информации в сравнении с сетью наземных наблюдений в ГГО были изложены в работах Г. В. Брылева, С. В. Гашиной, Б. Ш. Дивин-

ской, Е. М. Сальмана и В. Д. Степаненко. В них было показано что с учетом объема информации, ее точности и оперативности получения эффективность МРЛ по штормовому предупреждению в радиусе 100—150 км существенно выше, чем наземной сети метеорологических станций. Однако МРЛ не может заменить эту сеть. Оптимальная система наблюдений должна включать МРЛ, метеорологические станции, искусственные спутники Земли (ИСЗ) и другие средства.

В истории развития отечественной метеорологической радиолокации особо следует отметить открытие, сделанное сотрудниками ЦАО В. В. Костаревым, А. А. Черниковым, А. М. Боровиковым и другими, о роли крупных „сверхоблачных” частиц, играющих во многих случаях возможность измерения высоты нижней границы дождевых облаков.

А. Г. Горелик, А. А. Черников, А. В. Шупяцкий, Г. В. Брылев, В. К. Завируха, В. Д. Степаненко, А. А. Федоров, К. С. Жупахин выполнили цикл работ, посвященных исследованию особенностей радиозона от ясного неба и их связям с метеорологическими условиями и орнитологической обстановкой.

В связи с проблемой организации сети радиолокационной штормоповещения Госкомгидромет возложил на ГГО обязанности головной организации. Необходимо было прежде всего разработать обоснованное размещение МРЛ на территории с учетом метеорологического обеспечения авиации, крупных административных центров и др. Такая сеть успешно функционировала, она насчитывала более 120 МРЛ. При этом МРЛ были установлены каждой зональной гидрометеорологической обсерватории. Они должны были обеспечивать сплошное перекрытие основных промышленных и сельскохозяйственных районов, а также авиатрасс с интенсивной грозовой деятельностью. Остальная территория СССР характеризовалась дискретным перекрытием МРЛ. В связи с функционированием этой сети нужно было решить задачи, связанные со стыковкой данных, получаемых многими МРЛ. Такие задачи были решены Ю. К. Федоровым. В Гидрометцентре СССР составлялась стыкованная карта данных МРЛ для европейской части страны.

Следует отметить, что для метеорологического обеспечения аэродрома на ст. Молодежная в Антарктиде специалистами ГГ и Арктического и антарктического научно-исследовательского

института (ААНИИ) Н. С. Дорожкиным, В. С. Огуряевым и другими были организованы систематические радиолокационные наблюдения и получены интересные данные об облаках и связанных с ними осадках, развивающихся в этом районе.

С учетом требований потребителей получаемой информации (достигнутых технических возможностей МРЛ Г. Б. Брылевым, Л. В. Гашиной и другими) была создана единая методика применения данных МРЛ для штормоповещения, синоптического анализа и климатических обобщений. Созданию этой методики предшествовал целый ряд работ, посвященных не только выявлению особенностей радиоэхо различных облаков и осадков, но и разработке методик распознавания указанных атмосферных образований. Так, для распознавания ливней и гроз Е. М. Сальмамом и С. В. Гашиной был предложен критерий, характеризующий вертикальный профиль радиолокационной отражаемости. В дальнейшем были проведены численные эксперименты по распознаванию грозовых облаков с помощью различных статистических способов, основанных на критерии превышения одного орога, мажоритарном выборе, критерии с использованием дискриминантных функций и др. Оказалось, что надежность распознавания грозовых облаков с их помощью не превышает 0,85.

В связи с этим были проведены исследования возможности опосредственного радиолокационного обнаружения ионизированных каналов молний в грозовых облаках. В. Д. Степаненко и Л. М. Гальперин провели теоретический анализ, показывающий преимущества РЛС метрового и дециметрового диапазонов. В 1970 г. С. М. Гальпериным и другими были организованы специальные наблюдения одновременно с помощью РЛС метрового диапазона, МРЛ-1, грозопеленгатора и регистратора формы импульса излучения молний. Установлен факт регистрации ко-сигналов практически каждой молнии. При этом оказалось, что эхо-сигнал молнии, как правило, сопровождается собственным излучением, воспринимаемым как шумовой фон.

В дальнейшем изучение гроз проводилось только комплексно использованием МРЛ, РЛС метрового и дециметрового диапазонов, грозопеленгаторов и приемников радиоизлучений молний. Было показано частое несовпадение зон максимальной радиолокационной отражаемости с местоположением молний,

определены радиолокационные параметры молний (продолжительность, число разрядов, величина ЭПР), изучена динамика грозового облака и др. В процессе таких исследований С. М. Гальпериным, В. Н. Стасенко, В. И. Банниковым и другими был создан радиотехнический комплекс для изучения гроз и разработана методика его применения. В настоящее время этот комплекс используется для исследования грозовых облаков, развивающихся естественным путем и при активных воздействиях.

После аварии на Чернобыльской АЭС информация, полученная сетевой МРЛ-2, установленной в аэропорту Борисполь, была использована В. К. Завирухой, В. Д. Степаненко и другими для распознавания и прослеживания радиационно опасных облаков и осадков.

Крупные экспериментальные работы по оценке точности радиолокационных измерений характеристик дождей, которые сопоставлялись с данными специальной осадкомерной сети с повышенной плотностью, были проведены в ЦАО, Государственном гидрологическом институте (ГГИ), УкрНИГМИ Л. И. Безнисом Г. П. Берюлевым, А. М. Боровиковым, В. М. Мучником и др. В результате многочисленных измерений в 1964—1966 гг. установлено, что точность радиолокационного измерения осадков за время отдельного дождя, когда известен коэффициент согласования, повышается с увеличением количества выпавших осадков. Это происходит также с увеличением как площади осреднения, так и временного интервала измерений. При измерениях на малых площадях (около 100 км^2) точность радиолокационного метода эквивалентна точности осадкомерной сети с плотностью один прибор на 100 км^2 . В европейской части страны наиболее часто один осадкомер приходится на площадь $1000\text{—}2000 \text{ км}^2$. В учете этого было показано, что точность измерения суточных сумм осадков с помощью МРЛ эквивалентна точности существующей сети осадкомеров на площади $5000\text{—}10\,000 \text{ м}^2$. При меньших площадях данные радиолокационных измерений более точны, чем данные осадкомеров.

В конце 1950-х—начале 1960-х годов изучением динамических процессов в тропосфере при облачной и безоблачной погоде с помощью РЛС начали заниматься в ЦАО В. В. Костаре А. Г. Горелик, А. А. Черников, Ю. В. Мельничук, А. А. Иванов Т. И. Смирнова и др. Несколько позже аналогичные работы бы

проведены в ЛВИКА им. А. Ф. Можайского П. А. Рублевым, Э. М. Гальпериным, В. Д. Степаненко. Была разработана методика и проведены серии экспериментов с целью использования спектра флуктуаций мгновенных значений эхо-сигналов для определения относительных скоростей частиц облаков и осадков, а также распределения их по размерам. Использование спектров эхо-сигналов успешно продолжалось, в том числе и для определения зон повышенной турбулентности в облаках и осадках. В последующем в ЦАО был предложен оперативный радиолокационный метод обнаружения зон повышенной турбулентности в облаках и осадках. Метод заключался в измерении разности радиальных составляющих скоростей рассеивающих импульсных объемов, разнесенных по дальности на расстояние около 0,5—1,0 км. Измерения проводились одновременно на всех удалениях в облаке вдоль радиолуча.

Дальнейшие исследования динамических и микроструктурных характеристик облаков были связаны с применением доплеровских РЛС. В ЦАО в конце 1960-х годов А. Г. Горелик, В. Ф. Логунов и Ю. В. Мельничук разработали методику определения вертикальных движений воздуха в дождях и грозовых облаках с помощью доплеровской РЛС сантиметрового диапазона при вертикальном зондировании. В Высокогорном геофизическом институте (ВГИ) Б. Х. Тхамоков, М. Т. Абшаев и другие разработали методику и создали доплеровский радиолокационный комплекс дециметрового диапазона вертикального зондирования розогорадовых облаков и получили интересные результаты о вертикальных движениях гидрометеоров и воздуха в указанных облаках. В ГГО Ю. А. Мельник, А. В. Рыжков, В. М. Мельников и Ю. Жуков проводили работы по созданию доплеровского канала для МРЛ.

К середине 1960-х годов в ЦАО и ЛВИКА им. А. Ф. Можайского А. В. Шупяцким, А. А. Черниковым, Н. Ф. Павловым, А. А. Ивановым, Л. А. Диневичем, а затем В. Х. Корбаном и другими были выполнены интересные исследования поляризационных характеристик эхо-сигналов от различных атмосферных образований, которые продолжают и в настоящее время. Было установлено, что по поляризационным характеристикам эхо-сигналов достаточно уверенно можно проводить распознавание зон капельно-жидких и кристаллических частиц. Повышается эф-

фективность распознавания градоопасных облаков. Показано что для ослабления мешающего действия гидрометеоров можно использовать радиоволны не только с круговой, но и с линейной поляризацией при помощи антенны с переключающейся поляризацией. В дальнейшем в этом направлении успешно продолжали работать С. И. Ваксенбург в ВНИИРА, Ю. А. Мельник, А. В. Рыжков, В. В. Журавлев в ГГО; В. К. Завируха в ЛВИКА им. А. Ф. Можайского.

В последние годы актуальной стала проблема поражения самолетов молниями в облаках слоистых форм, полеты в которых разрешаются соответствующими наставлениями. В ГГО были изучены аэрологические, электрические и радиолокационные характеристики слоистообразных облаков, при полете в которых большой вероятностью можно ожидать молниевые разряды в самолет, и составлены соответствующие рекомендации для синоптиков.

Важное научно-методическое значение имели результаты связанные с особенностями эволюции и перемещения конвективных, в том числе грозowych, облаков, а также рекомендации, разработанные Г. Б. Брылевым, Г. Л. Низдойминой и другими при использовании радиолокационных данных для диагноза и прогноза погоды.

Выше отмечались работы, связанные с измерениями характеристик осадков. В последних работах получены удовлетворительные связи между полусуточными суммами осадков, выпадающих над площадями 30×30 км, и максимальными значениями радиолокационной отражаемости. Это позволяет получать в сети МРЛ данные об осадках в радиусе 100 км.

В середине 1970-х годов коллективом ВНИИРА была создана станция МРЛ-5 на волнах 3 и 10 см, предназначенная для проведения противогородовых работ и штормоповещения. Активное участие в разработке и испытаниях МРЛ-5 принимали специалисты ВГИ (М. Т. Абшаев, Б. Х. Тхамоков, М. Н. Бейтуганов, И. И. Бурцев и др.), Закавказского научно-исследовательского гидрометеорологического института (ЗакНИГМИ) (А. И. Карцвадзе и др.), Ленинградского гидрометеорологического института (ЛГМИ) (Л. Г. Качурин и др.). В связи с проведением противогородовых работ специалистами ВГИ М. Т. Абшаевым, А. Х. Аджи

вым, М. Н. Бейтугановым, Б. Х. Тхамоковым и другими были существенно углублены наши знания о грозоградовых облаках на основании использования радиолокационных данных. В 1986 г. М. Т. Абшаеву, Г. В. Брылеву, И. И. Бурцеву, В. Д. Степаненко, А. А. Черникову (Гидрометслужба); С. И. Ваксенбургу, I. В. Горностаеву, Г. Ф. Шевеле (ВНИИРА); Е. А. Бодрову, О. М. Бубнову (завод „Электромаш“); В. И. Мокшанову (НЭЦ /ВД) и М. В. Персикову (Институт радиотехники и электроники ИРЭ АН)) была присуждена Государственная премия „За разработку и внедрение в гидрометеорологическое обеспечение народного хозяйства методов и технических средств радиометеорологических наблюдений за облаками, осадками и опасными явлениями погоды”.

В середине 1960-х годов было положено начало важному этапу развития радиолокационной метеорологии — автоматизации радиолокационных метеорологических наблюдений. Технические основы аппаратуры ААОМ, выполняющей эти функции, и ее конструкция были разработаны Г. Ф. Шевелой, Е. М. Сальмамом, С. И. Ваксенбургом, В. А. Петрушевским, А. Г. Линевым и др. Дальнейшее развитие автоматизации было связано с аппаратурой „Метеоячейка”, которая, кроме того, позволяла производить сбор информации от разных датчиков (аналоговая картина МРЛ, данные ААОМ, грозопеленгатора, штормкольца). При этом информация отображалась на цветном телевизионном экране и после редактирования оператором распространялась по телевизионным каналам потребителям в аэропорту. Опыт применения МРЛ совместно с ААОМ показал заметное повышение эффективности МРЛ за счет большей оперативности, меньшей синхронности измерений радиолокационных параметров облаков, а также за счет уменьшения субъективных ошибок. Это повышение по сравнению с ручным способом составило около 20 % было установлено С. Б. Гашиной, Т. В. Ивановой, А. Г. Линевым и др. Трудности внедрения указанной аппаратуры состояли в том, что при существовавшем в то время уровне развития вычислительной техники она представляла собой сложные в производстве специализированные ЭВМ. Развитие работ в этом направлении привело к созданию Ю. А. Мельником, А. М. Гудьей, А. Г. Линевым, С. А. Маланичевым экспериментального автоматизированного радиолокационного комплекса, отличавше-

гося применением серийно выпускаемых ЭВМ М-600 и микроЭВМ „Электроника” и цветного воспроизведения информации. Опытная проверка работы этого комплекса дала хорошие результаты.

В ЦАО и на заводе „Электромаш” В. Н. Губарчук, А. П. Иванников, А. А. Иванов, Ю. В. Мельничук и другие разработали автоматизированный комплекс сбора, обработки и представления радиолокационной информации — АКСОПРИ. В его основу положена концепция создания унифицированной автоматизированной системы.

В ГГО совместно с ВНИИРА была разработана концепция комплексной автоматизации процессов сбора, обработки и представления метеорологической информации для повышения безопасности полетов и решения других задач метеорологического обеспечения. В качестве базовой предлагается структура комплексной автоматизированной системы (КАСМЕТЕО), на основе которой должны быть построены аэродромные, районные и аэродромно-трассовые системы. Используемый принцип модульности обеспечивает гибкость и позволяет в сочетании с применением стандартных интерфейсов, алгоритмов обмена, формата сообщений и гибкого программного обеспечения синтезировать структуру системы таким образом, чтобы она максимально удовлетворяла требованиям пользователей и физико-географическим условиям района обслуживания.

Основу системы составляют три подсистемы: радиолокационная метеорологическая информация, наземная метеорологическая информация (КРАМС-2), центральная метеорологическая подсистема. Созданные по модульному принципу автоматизированные комплексы МРЛ — ЭВМ могут быть взаимозаменяемым в каждом регионе и использоваться в зависимости от важности конкретных задач для данного региона.

В процессе работы большой сети МРЛ в нашей стране появилась необходимость стыковки данных МРЛ, их архивации, критического контроля и обработки для климатических обобщений. Решение этих важных задач проводится Г. Б. Брылевым, Т. С. Гольм и др. В частности, статистическая обработка данных МРЛ позволила установить влияние большого города, каким является Санкт-Петербург, на режим ливней и гроз в радиусе 100 км.

В последние годы, особенно после аварии на Чернобыльской ЭС, возникло новое направление в области применения радиодетекторов и лидаров для дистанционного определения радиоактивных, химических и других выбросов и их прослеживания, а также для оценок загрязнения местности радионуклидами с учетом их вымывания атмосферными осадками. При этом важно отметить, что факт обнаружения даже минимального выброса радиолокационно-лидарный способ надежно распознает с помощью изработанного в ГГО устройства „Подсветка”.

Анализ выполненных исследований и физических причин образования радиоактивных облаков и осадков при авариях на ЭС показал, что необходимо различать три типа этих облаков. Первый тип представляет собой аэрозольно-плазменные образования, второй — включает в себя также продукты конденсации водяного пара (капли, ледяные частицы), образованные в результате перегрева и последующей конвекции воздуха в месте аварии; к третьему типу относятся естественные облака, взаимодействующие со шлейфом радиоактивных выбросов или с двумя первыми типами указанных облаков и ставшие после этого радиоактивными.

Радиолокационно-лидарные данные об опасных облаках и осадках должны быть использованы не только для оценок радиационного загрязнения местности, но и для решения задачи предупреждения при конструировании технических систем, проведении работ по активной защите населения от радиоактивных выбросов с атомных объектов.

Важным направлением в области радиометеорологии явилось также развитие радиотеплолокационных методов исследования атмосферы и их комплексирование с методами активной радиоквации.

Теоретические исследования, выполненные в начале 1960-х годов в рамках научно-исследовательской работы „Гроза” под научным руководством К. С. Шифрина сотрудниками ГГО (Г. Шукин, М. М. Черник), ИРЭ РАН (А. Е. Башаринов, А. Колосов, Б. Г. Кутуза, Л. М. Шутко), Института физики атмосферы (ИФА РАН) (А. С. Гурвич, Н. С. Тиме), ЛВИКА Л. А. Ф. Можайского (В. Д. Степаненко), позволили достаточно полно оценить возможности, особенности и погрешности определения характеристик атмосферы, облаков и осадков с помощью

радиотеплолокаторов (РТЛ), установленных на борту летательных аппаратов и на земле.

К этому же времени относятся и первые экспериментальные исследования ГГО, выполненные Ю. И. Рабиновичем, Г. Г. Щукиным, В. В. Мелентьевым, А. И. Новоселовым на самолете Ил-18 с радиометрической аппаратурой миллиметрового и сантиметрового диапазонов волн, разработанной коллективом с трудников предприятия „Вега” под руководством С. Т. Егорова (Л. И. Малофеев, Г. Г. Лидерс, В. Г. Волков и др.).

Результаты теоретических и экспериментальных исследований первого этапа работ в области метеорологической радиолокации внесли определенный вклад как в создание спутниковой РТЛ-аппаратуры, так и в интерпретацию получаемых данных. Как известно, усилиями советских специалистов впервые в 1968 г. был осуществлен запуск ИСЗ „Космос-243” с микроновой аппаратурой геофизического назначения на борту.

В этот же период работы по исследованию атмосферы радиотеплолокационными методами проводятся в ЦАО, а затем МГАПИ под руководством А. Г. Горелика (Л. А. Пеняз В. И. Семилетов и др.), в Научно-исследовательском радиофизическом институте (НИРФИ) школой В. С. Троицкого (С. А. Жвакин, А. П. Наумов, В. М. Плечков, А. В. Троицкий и др.) и Гидрометцентре (Е. П. Домбковская).

Выполненные исследования позволили оценить возможность и точность определения влаго- и водозапаса облачной атмосферы, интенсивности осадков, вертикальных распределений температуры и влажности в атмосфере.

Важным этапом явилось комплексирование методов активной и пассивной радиолокации, позволяющее определять высоту и ее распределение в облаках, интенсивность осадков, обнаруживать зоны переохлажденной капельно-жидкой влаги, которые являются потенциально опасными для обледенения самолетов и особенно вертолетов. Кроме того, эти измерения позволяют получать климатологическую информацию о влаго- и водозапасае облаков, которая используется для оценки водного баланса Земли и его изменения.

В разработку пассивно-активного радиолокационного метода заметный вклад внесли специалисты ГГО (Г. Г. Щукин Н. Ф. Михайлов, И. А. Тарабукин, Л. П. Бобылев, Е. В. Дороф

з), МГАПИ (А. Г. Горелик, Л. В. Князев, В. В. Калашников, А. Пенязь), ИРЭ РАН (А. Е. Башаринов, Б. Г. Кутуза), ВИКА им. А. Ф. Можайского (В. Д. Степаненко), ВГИ (И. Кармов).

В настоящее время работы в области радиотеплолокации атмосферы и метеорологических образований ведутся в ГГО, ИРЭ РАН, МГАПИ, НИРФИ, ЦАО, НИЦ „Планета”, ВГИ.

СПУТНИКОВЫЕ МЕТОДЫ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ

Настоящий очерк представляет краткий обзор развития отечественных космических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) гидрометеорологического и природно-ресурсно-назначения. Период с момента запуска в июне 1966 г. первого советского метеорологического спутника „Космос-122” характеризуется бурным развитием не только космической техники, но ряда новых направлений в исследованиях атмосферы и природной среды, и имеет весьма содержательную и насыщенную историю. Благодаря энтузиазму и усилиям многих специалистов ученых Гидрометслужбы, АН СССР, других ведомств сформировались и продолжают интенсивно развиваться спутниковая метеорология, дистанционные методы исследования Земли.

В развитии космического и наземного сегментов систем ДЗЗ большую роль сыграли С. И. Авдюшин, В. И. Адасько, В. В. Асенов, Л. А. Александров, акад. А. С. Алексеев, В. В. Асму Ю. А. Афанасьев, А. И. Бедрицкий, И. П. Ветлов, А. М. Волко А. Г. Горелик, В. Н. Дядюченко, С. Т. Егоров, В. А. Загребая акад. Ю. А. Израэль, А. Г. Иосифьян, Н. П. Козлов, О. Е. Милхин, Б. В. Непоклонов, Р. С. Салихов, А. С. Селиванов, В. И. Словьев, В. А. Стрижевский, Ю. В. Трифонов, А. Ю. Трудово А. Б. Успенский, В. Л. Ферберов, В. Ф. Харитонов, Ю. К. Ходрев, акад. Н. Н. Шереметьевский и др. Большой вклад в становление и развитие спутниковой метеорологии, дистанционно изучения природной среды, методов анализа и использования спутниковой информации внесли Н. А. Арманд, В. В. Асму А. Е. Башаринов, В. Г. Блинов, В. Г. Болдырев, П. Н. Бело Е. П. Борисенков, Г. И. Борисоглебский, А. И. Бурцев, М. В. Вхаров, А. В. Бушуев, И. П. Ветлов, Н. Ф. Вельтицев, С. В. Виторов, М. А. Герман, В. А. Головкин, А. С. Гурвич, Е. В. Дзюбеко, Е. П. Домбковская, В. Н. Досов, Г. М. Иоффе, Г. Н. Исаев А. И. Ивановский, А. Б. Карасев, А. В. Карпов, В. П. Козло В. В. Козодеров, Г. А. Кокин, В. С. Комаров, акад. К. Я. Коздратьев, В. А. Кровотынцев, А. Д. Кузнецов, В. С. Лоцило акад. Г. И. Марчук, М. С. Малкевич, Ю. Л. Матвеев, В. В. Меле

тьев, О. Е. Милехин, Л. С. Минина, Ш. А. Мусаэлян, М. Назиров, В. А. Нелепо, П. А. Никитин, Л. А. Пахомов, Ю. В. Плохенко, О. М. Покровский, Т. П. Попова, П. Н. Румянцев, В. Г. Смирнов, В. И. Соловьев, Д. М. Сонечкин, Ю. Г. Спиридонов, В. М. Сутовский, Ю. М. Тимофеев, В. И. Титов, А. П. Тищенко, Г. Ф. Тулинов, В. Ф. Усачев, А. Б. Успенский, Е. М. Фейгельсон, В. И. Хамарин, И. А. Четвериков, К. С. Шифрин, Г. Г. Щукин, В. С. Эткин и многие другие.

Космические наблюдательные системы дистанционного зондирования Земли

Прогресс в области космической техники существенно повлиял на развитие наук о Земле, в том числе и метеорологии. Метеорологи одними из первых оценили уникальные возможности создания глобальных систем наблюдения окружающей среды на базе искусственных спутников Земли (ИСЗ). В результате спутниковых экспериментов в СССР и США были созданы оперативные метеорологические космические системы (МКС), ставшие неотъемлемой частью общей глобальной системы гидрометеорологических наблюдений и национальных служб погоды.

Работы по созданию метеоспутников, инициированные Гидрометслужбой, велись в нашей стране с 1960 г. На конкурсной основе после нескольких экспериментальных пусков космических аппаратов (КА) серии „Космос” головной организацией по разработке метеоспутников был определен ВНИИЭМ — Всесоюзный научно-исследовательский институт электромеханики (ныне НПП ВНИИЭМ). К настоящему времени созданы и выведены на орбиту более 80 КА гидрометеорологического и природно-ресурсного назначения. По заказу Гидрометслужбы за истекший период переданы в оперативную эксплуатацию МКС первого, второго и третьего поколений. В 1970—1980-х годах на базе КА „Метеор” второго поколения осуществлены разработка и запуски нескольких экспериментальных спутников „Метеор—Природа”, которые явились прототипом специализированных природно-ресурсных спутников серии „Ресурс-01”. Наряду с полярно-орбитальными ИСЗ в 1980-х годах велась разработка отечественного геостационарного спутника ГОМС/„Электро” (запущен в 1994 г.)

Кроме того, в 1980-е годы в СССР началось развитие океанографических спутников силами Днепропетровского машиностроительного завода (ныне НПО „Южное”, Украина) с кооперацией: оперативная эксплуатация спутников серии „Океан-01” была возложена на Госкомгидромет СССР.

Ниже приводится краткое описание перечисленных космических систем, подготовленное с использованием опубликованных материалов.

Метеорологическая космическая система „Метеор”. 25 июня 1966 г. — дата запуска КА „Космос-122”, первого отечественного экспериментального метеорологического ИСЗ. Спутник, выведенный на круговую орбиту высотой 625 км, наклоненную к плоскости экватора под углом 65° , с периодом обращения вокруг Земли 97,1 мин, был оснащен телевизионной аппаратурой для покадровой съемки облачности и подстилающей поверхности Земли вдоль трассы полета, а также комплектом радиометров для актинометрических измерений уходящего потока радиации, отраженной и излученной Землей.

В результате запуска в 1967 г. двух КА — „Космос-144” и „Космос-156” — сформировалась орбитальная группировка метеоспутников, которая вместе с наземными пунктами приема, обработки и распространения данных Гидрометслужбы образовала экспериментальную МКС первого поколения „Метеор”. Помимо указанных спутников для пополнения системы „Метеор” в период 1967—1969 гг. на орбиту были выведены КА „Космос-184”, „Космос-206”, „Космос-226” и „Космос-243”.

На борту перечисленных КА устанавливались две телевизионные камеры для съемки на освещенной стороне Земли с шириной полосы обзора около 1000 км и пространственным разрешением 1,25—2,0 км. Для аналогичных съемок на теневой стороне Земли использовалась сканирующая аппаратура телевизионного типа, работающая в инфракрасном (ИК) диапазоне 8—12 мкм с шириной полосы обзора около 1000 км и разрешением 15 км в надире. Актинометрическая аппаратура была представлена двумя узкоугольными сканирующими и двумя надирными радиометрами, работавшими в диапазонах 0,3—3,3, 3—30 и 8—12 мкм.

Прием информации с первых метеоспутников осуществлялся в подмосковном г. Щелково. Принятые ТВ-снимки по факси-

гильной линии связи передавались на фототелеграфные устройства Гидрометцентра СССР. Данные актинометрических измерений регистрировались на магнитных лентах и также поступали в Гидрометцентр.

КА серии „Космос”, входившие в систему „Метеор” первого поколения (получили с 1969 г. общее название „Метеор”), выводились на приполярную орбиту высотой 690 км с наклоном 1° , а начиная с КА „Метеор-10” (10 — порядковый номер, 1971 г.) — на орбиту высотой 900 км. Список запущенных в период до 1975 г. метеоспутников можно найти в работе М. А. Германа „Спутниковая метеорология”.

Информация, полученная с метеоспутников первого поколения, способствовала интенсивному развитию спутниковой метеорологии, а также дала обширный материал создателям системы „Метеор”, особенно в части совершенствования информационно-измерительной аппаратуры. В результате был создан модернизированный метеорологический КА второго поколения „Метеор-2”. Запуск первого спутника серии „Метеор-2” состоялся 1 июля 1975 г., а с 1977 г., после запуска второго КА „Метеор-2”, началась штатная эксплуатация системы „Метеор” в интересах Гидрометслужбы.

Измерительные средства системы спутников „Метеор-2” обеспечивали дважды в сутки глобальный обзор Земли; информация КА „Метеор-2” непрерывно передавалась в режиме прямой передачи (РТ) на малые пункты приема во всем мире.

Метеорологическая измерительная аппаратура на спутниках системы „Метеор-2” включала:

— сканирующий телефотометр для прямой передачи изображений (разрешение в надире 2 км, полоса обзора 2100 км, диапазон 0,5—0,8 мкм);

— сканирующую аппаратуру телевизионного типа с возможностью запоминания изображений (разрешение в надире 1 км, полоса обзора 2200 км, диапазон 0,5—0,8 мкм);

— сканирующий восьмиканальный ИК радиометр (174 К) для дистанционного термического зондирования атмосферы;

— сканирующий ИК радиометр (разрешение в надире 8 км, полоса обзора 2600 км, диапазон 8—12 мкм) для получения изображений облачного покрова, снежных и ледяных полей, оценки температуры поверхности океана (ТПО).

Научное и техническое руководство созданием МКС „Метеор-2” (всего было запущено 25 КА этой серии) осуществлялось главным конструктором А. Г. Иосифьяном и его заместителям Н. Н. Шереметьевским, Ю. В. Трифоновым, В. И. Адасько.

В начале 1980-х годов с учетом накопленного опыта и мировой практики в Гидрометслужбе были подготовлены предложения по усовершенствованию и модернизации системы „Метеор-2”, а именно по созданию двухъярусной МКС „Планета-С” составе средневысотных усовершенствованных КА „Метеор” высокоорбитального (геостационарного) КА „Электро”.

На базе КА „Метеор-2” в Истринском филиале ВНИИЭМ по руководством главного конструктора В. А. Адасько был создан новый спутник „Метеор-3”, который запускался на более высокую орбиту — около 1200 км. Основной целью разработки КА „Метеор-3” являлось повышение информативности и улучшение потребительских свойств спутниковой гидрометеорологической информации. Всего было запущено 7 КА серии „Метеор-3”.

Оперативное функционирование спутников „Метеор-3” дважды в сутки обеспечивало глобальный обзор Земли и передачу данных на основные пункты приема информации Гидрометслужбы в Москве (Обнинске), Новосибирске и Хабаровске. С помощью ТВ аппаратуры и ИК радиометра „Климат” получали изображения в полосе 3100 км с линейным разрешением 1 и 3 км соответственно. Кроме аппаратуры для получения изображений и атмосферного зондировщика 174К, на отдельных КА „Метеор-3” устанавливалась экспериментальная аппаратура, предназначенная для дистанционного зондирования атмосферного озона (СФ) разработан в ЦАО, TOMS — в США), оценки компонентов радиационного баланса (РБ) (сканирующий радиометр ScaRaB, разработана Франция—СССР).

Запуск спутников „Метеор-3” сыграл положительную роль в улучшении гидрометеорологического обеспечения, решении задач Гидрометслужбы. Однако уже на этапе их проектирования разработки стали очевидны направления дальнейшей модернизации, поскольку наметилось существенное отставание по сравнению со спутниками NOAA (США) в номенклатуре измерительной аппаратуры и ее информативности. Отсутствие в составе полезной нагрузки многоканальных сканирующих радиометров для получения изображений высокого пространственного разреш

ния, современных атмосферных зондировщиков ИК и СВЧ диапазонов спектра, системы сбора данных с наземных наблюдательных платформ существенно снижало информативность отечественных метеоспутников, затрудняло их интеграцию с зарубежными МКС. Подтвердилась также необходимость запуска метеоспутников на солнечно-синхронные орбиты (наклонение примерно 98°).

Перечисленные недостатки КА „Метеор-3” стимулировали работы по созданию модернизированных КА „Метеор-3М”. Запуск первого КА этой серии на солнечно-синхронную орбиту, созданного под руководством главного конструктора Р. С. Салихова, состоялся в декабре 2001 г. В качестве основной полезной нагрузки следующих КА этой серии, которые должны разрабатываться во ВНИИЭМ под руководством главного конструктора Ю. В. Трифонова (со сроком запуска в 2005 и 2008 гг.), предусмотрены усовершенствованные атмосферные зондировщики СВЧ и ИК диапазонов спектра — МТВЗА (микроволновый температурно-влажностный зондировщик атмосферы) и ИКФС (инфракрасный Фурье-спектрометр), а также многоканальный сканирующий радиометр высокого разрешения для получения изображений и система сбора данных с платформ. В случае успешной реализации намеченной программы спутники „Метеор-3М” приблизятся по своим информационным характеристикам к современным спутникам серии NOAA и будущему европейскому метеоспутнику METOP (запуск в 2005 г.). Появится реальная возможность интеграции отечественных полярно-орбитальных метеоспутников в глобальную международную МКС.

Геостационарный метеорологический спутник ГОМС/„Электро”. В конце 1970-х годов ВНИИЭМ приступил к созданию высокоорбитального компонента системы „Планета-С” — геостационарного оперативного метеорологического спутника ГОМС). По согласованию с ВМО для ГОМС была определена точка стояния 76° в. д.

Первый геостационарный КА ГОМС/„Электро” № 1, разработанный под руководством главного конструктора Ю. В. Трифонова, был выведен на орбиту 1 ноября 1994 г. и вошел в состав системы геостационарных спутников, в которую, кроме него, входят два КА GOES (США), КА METEOSAT (ЕВМЕТСАТ — Европейская организация по эксплуатации метеорологических

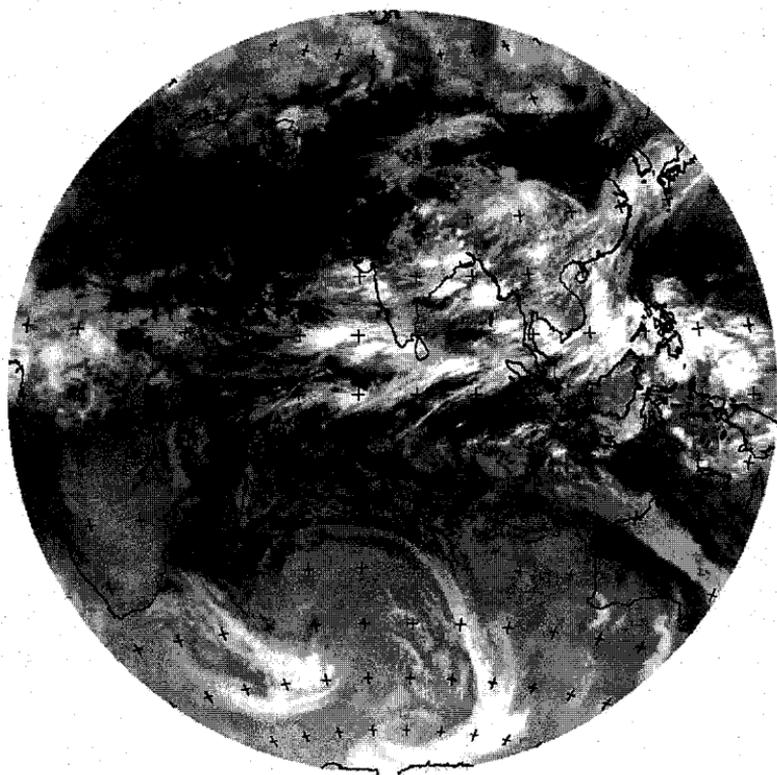


Рис. 1. Изображение диска Земли в ИК диапазоне, ГОМС „Электро”.
Съемка от 05.08.1998 г. (9.00 ч)

спутников) и GMS (Япония). На КА „Электро” были установлены система сбора данных с платформ и бортовой телевизионный комплекс (БТВК), предназначенный для получения изображений в видимом (0,4—0,7 мкм) и ИК (6,0—7,0 и 10,5—12,5 мкм) диапазонах спектра. Пространственное разрешение в надире — 1,5 км в видимом и 8,0 км в ИК диапазоне; периодичность получения изображений — 1 кадр/ч, длительность ТВ-кадра — около 13,5 мин.

Из-за неполадок в работе БТВК с борта КА „Электро” поступали только ИК изображения (рис. 1). Вся поступившая ИК информация проходила процедуру геометрической и радиометрической коррекции, после чего направлялась на тематическую обработку и одновременно распространялась через КА „Электро” в формате WEFAX. Результатом тематической обработки являлись цифровые карты ТПО, характеристик облачного покрова. Изображения в формате, аналогичном WEFAX, передавались в прогностические подразделения Гидрометцентра. В сентябре 1998 г. оперативное функционирование КА „Электро” № 1 прекратилось. Завершение разработки и запуск следующего КА этой серии с целевой аппаратурой повышенной информативности (10 каналов видимого и ИК диапазонов) планируется на 2006 г.

Экспериментальная программа „Метеор—Природа”. Спутники „Метеор” второго поколения были выбраны в качестве базовых для реализации программы „Метеор—Природа” — изучения природных ресурсов Земли из космоса. Выполнение программы началось в 1974 г. запуском экспериментального спутника. Всего на орбиты было выведено пять КА. Запуск последних трех спутников на солнечно-синхронные орбиты с высотой около 350 км и наклоном 98° позволил проводить регулярно повторяющиеся съемки в условиях равной освещенности.

В состав полезной нагрузки первых КА „Метеор—Природа” входили сканеры малого (МСУ-М) и среднего (МСУ-С) разрешения — 1 км и 200 м соответственно. В 1980—1982 гг. был проведен спутниковый эксперимент со сканерами более высокого пространственного разрешения. КА „Метеор—Природа” (запущен на солнечно-синхронную орбиту 18 июня 1980 г.) имел на борту сканер высокого разрешения МСУ-Э (разрешение ~ 30 м) и сканер среднего разрешения с конической разверткой МСУ-СК (разрешение 200 м).

Оптико-электронная (МСУ-Э) и оптико-механическая (МСУ-Ж) аппаратура и ее модификации разработаны в НИИ космического приборостроения под руководством главного конструктора А. С. Селиванова.

Спутниковая система природно-ресурсного назначения „Ресурс-01”. Спутник „Метеор—Природа” (запущен 18 июня 1980 г.)

благодаря наличию на борту комплекса многоспектральной аппаратуры среднего и высокого разрешения рассматривается как первый спутник экспериментальной системы природно-ресурсного назначения — КА „Ресурс-01” № 1. Работы по созданию серии спутников „Ресурс-01” проводились во ВНИИЭМ под руководством главного конструктора Ю. В. Трифонова.

КА „Ресурс-01” № 2 и № 3 были выведены на солнечно-синхронные орбиты высотой 650 км в апреле 1988 г. и ноябре 1994 г. соответственно. Переход на передачи по цифровой радиолинии резко повысил качество принимаемой информации, позволил заменить фотоизображения цифровыми, регистрируемыми на магнитных лентах.

Состав бортовой измерительной аппаратуры спутников идентичен — два комплекта аппаратуры МСУ-СК и два комплекта аппаратуры МСУ-Э. Комплекты МСУ-Э могли работать одновременно, увеличивая почти вдвое полосу обзора. МСУ-Э имел полосу обзора 45 км (при „перенацеливании” оптической оси — около 780 км), разрешение в надире 45 м и работал в трех спектральных диапазонах — 0,5—0,6, 0,6—0,7 и 0,8—0,9 мкм. Аппаратура МСУ-СК в полосе обзора 600 км при разрешении 170 м работала в четырех спектральных диапазонах — 0,5—0,6, 0,6—0,7, 0,7—0,8, 0,8—1,0 мкм и при разрешении 600 м — в диапазоне 10,5—11,8 мкм.

10 июля 1998 г. на солнечно-синхронную орбиту высотой 835 км был выведен КА „Ресурс-01” № 4, имевший на борту модернизированный информационный комплекс, а также метеорологическую и гелиогеофизическую аппаратуру.

Модернизированная аппаратура МСУ-Э имела разрешение 30 м в полосе обзора 60 км (с расширением захвата при „перенацеливании” до 500 км) и работала в тех же диапазонах, что и аналогичная аппаратура КА „Ресурс-01” № 2 и № 3. В аппаратуре МСУ-СК предусмотрен дополнительный спектральный канал ближнего ИК диапазона — 3,5—4,1 мкм для детектирования очагов пожаров.

Метеорологическая аппаратура была представлена сканирующим телефотометром для прямой передачи ТВ изображений в режиме АРТ, а также сканирующим радиометром ScaRaB для измерения компонентов РБ.

Спутниковая система океанографического назначения „Океан-01”. Целями создания космической наблюдательной системы „Океан-01” являлись изучение Мирового океана, мониторинг ледовой обстановки в Арктике и Антарктике, обеспечение проводки судов по Северному морскому пути, исследование океанских и морских шельфов.

Первый спутник серии „Океан-01” был запущен 28 сентября 1983 г. (КА „Космос-1500”). Штатная эксплуатация системы началась после запуска в 1986 г. третьего спутника „Океан-01” (КА Космос-1766”). Всего в системе „Океан-01” запускалось семь спутников. „Океан-01” № 4 не вышел на расчетную орбиту. Спутник „Океан-01” № 8, запускавшийся по совместной российской-украинской программе, прекратил свою работу через год.

Спутники системы „Океан-01” запускались на приполярные орбиты высотой 600—650 км с наклоном 82—83° и имели в качестве полезной нагрузки:

— РЛСБО — радиолокационная станция бокового обзора (рабочая длина волны 3,2 см, полоса обзора 450 км, разрешение 5—2,0 км);

— РМ-08 — сканирующий СВЧ-радиометр (рабочая длина волны 0,8 см, полоса обзора 550 км, разрешение 15 км);

— РТВК — радиотелевизионный комплекс (МСУ-М и МСУ-С);

— „Кондор” — система сбора и передачи данных с автономных морских и ледовых станций.

Из данных, полученных с помощью РЛСБО, РМ-08 и МСУ-М, а борту спутника формировалось совмещенное изображение одного и того же участка поверхности единого масштаба и близкого пространственного разрешения.

Прием информации осуществлялся отраслевыми центрами гидрометслужбы в Москве, Новосибирске и Хабаровске (на частоте 466,5 МГц), а также в малых автономных пунктах приема информации — АППИ (на частоте 137 МГц).

Данные системы „Океан-01” использовались в оперативной работе Гидрометслужбы. На регулярной основе проводилось оперативное картирование ледовой обстановки по трассе Северного морского пути, причем радиолокационные карты обстановки ранились на одном из оперативных серверов НИЦ „Планета”. Кроме того, был организован доступ к радиолокационным картам через сеть INTERNET.

В рамках российско-украинского сотрудничества в 2004 г. планируется осуществить запуск усовершенствованного океанографического спутника „Сич-1М”, который наряду с РЛСБО будет иметь на борту многоканальный сканер/зондировщик МТВЗА.

Наземный комплекс приема, обработки и распространения спутниковых данных. Неотъемлемой частью описанных космических систем ДЗЗ является наземный комплекс приема, обработки и распространения спутниковых данных (НКПОР). Гидрометслужба СССР приступила к созданию и развитию НКПОР (включая технические средства, методологию приема, обработки, распространения спутниковой информации), начиная с момента запуска первых метеоспутников. Важными этапами в создании отраслевого НКПОР, получившего статус общегосударственного, стали:

- развертывание приемных центров для работы с отечественными и зарубежными МКС в Москве (Обнинске), Новосибирске и Хабаровске;

- разработка малых станций приема и создание сети АППИ;

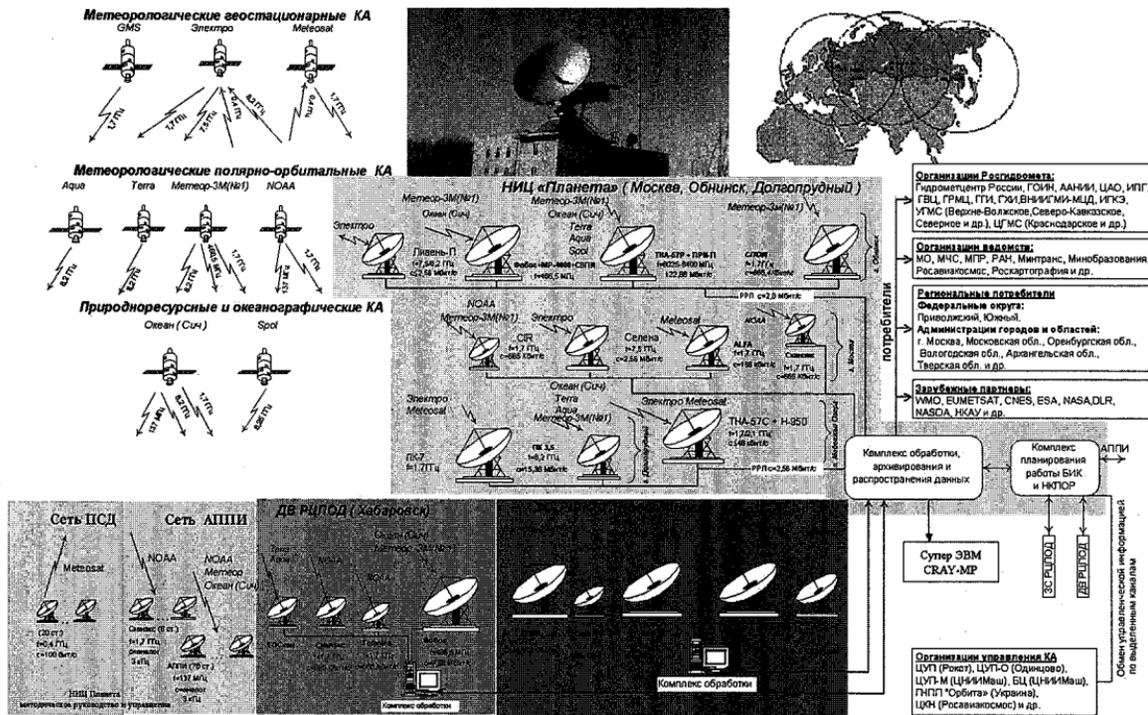
- организация приема, обработки и распространения на регулярной основе данных отечественных природно-ресурсных океанографических ИСЗ;

- организация оперативного приема, обработки и распространения цифровой информации с зарубежных МКС.

Необходимость получения полного объема информации каждого витка потребовала построения наземного комплекса в составе трех региональных центров приема и обработки данных (РЦПОД), расположенных в Москве (Обнинске), Новосибирске и Хабаровске. Зоны приема этих центров при высоте спутниковых орбит 600—1000 км и радиовидимости антенных систем в радиусе 2000—2500 км перекрываются, что обеспечивает прием данных со всей территории России, стран СНГ.

Кроме основных центров, в системе Гидрометслужбы работают несколько десятков малых АППИ. Инициатива в создании технических средств и развертывании сети АППИ принадлежит Гидрометслужбе. Следует отметить большой вклад Л. А. Александрова, В. Ф. Харитонова (особенно на начальном этапе) в организацию работ. Заметный вклад в последующее развитие НКПОР Росгидромета внесли В. В. Асмус, О. Е. Милехин, А. Ю. Трудовой, Ю. К. Ходырев и многие другие специалисты.

НАЗЕМНЫЙ КОМПЛЕКС ПРИЕМА, ОБРАБОТКИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДАННЫХ РОСГИДРОМЕТА



289

Рис. 2. Структурная схема наземного комплекса приема, обработки и распространения спутниковых данных (НКПОР Гидрометслужбы РФ).

Большие изменения претерпели системы обработки спутниковой информации. С развитием вычислительной техники произошел переход от регистрации и обработки принятой информации, изготовления выходной продукции на больших и специализированных ЭВМ к выполнению этих процедур на персональных компьютерах и рабочих станциях.

Существенный прогресс достигнут в организации обмена распространения спутниковой информации. Наряду с использованием наземных каналов связи (важный этап — организация обмена спутниковыми данными по каналу Вашингтон—Москва конце 1960-х годов), ГСТ, в настоящее время активно развивается межмашинный обмен, а также обмен по мировой компьютерной сети INTERNET.

На рис. 2 приведена структурная схема НКПОР Росгидромета.

Исследования по спутниковой метеорологии и дистанционному зондированию Земли

Развитие спутниковой метеорологии и методов ДЗЗ происходило в нескольких относительно самостоятельных направлениях: анализ изображений облачности, дистанционное метеорологическое зондирование, спутниковая радиолокация, климатологические применения спутниковых данных, изучение природных ресурсов. Ниже дан краткий обзор исследований по каждому из перечисленных направлений.

Дешифрирование изображений облачного покрова и использование их в синоптическом анализе и прогнозе погоды. моментом получения первых спутниковых изображений (снимков) облачного покрова по настоящее время указанная информация является основной, используемой в синоптическом анализе и прогнозе погоды. Развитие методов дешифрирования изображений, т. е. идентификации на них метеорологических или иных объектов, осуществлялось первоначально и достаточно длительное время на материале спутниковых измерений, представленных в аналоговой форме — снимках (фотоизображениях), полученных в видимом и ИК диапазонах спектра. Это затрудняло выработку формализованных правил интерпретации

ем не менее даже при таком качественном анализе изображений можно было получить большое количество дополнительной метеорологической информации (сведения о характере облачного покрова, типе синоптического процесса, количественные оценки скорости ветра, вертикальных движений). Уже первые результаты визуального анализа спутниковых снимков облачности послужили мощным стимулом для развертывания исследований в гидрометцентре СССР и других НИУ Гидрометслужбы. Этому способствовало развитие сети АППИ, позволяющих осуществлять прием изображений в режиме АРТ (аналоговые изображения с полярно-орбитальных спутников серии „Метеор”, ОАА) и затем в формате WEFAX (аналоговые изображения с геостационарных спутников).

Первое в Гидрометслужбе СССР подразделение по спутниковой метеорологии было создано в 1961 г. в Центральном институте прогнозов; отдел возглавил И. П. Ветлов. Начиная с 1963 г. сотрудники отдела приступили к регулярной обработке снимков американского спутника ESSA, затем спутников серий „Космос” и „Метеор”. Обработка включала нанесение географической этики и дешифрирование, т. е. выделение областей, занятых облаками разных типов, снегом, ледниками. Определялись положения циклонов, фронтов, струйных течений.

Первоначальное развитие приемов и методов анализа и классификации спутниковых изображений связано с именами многих сотрудников Гидрометцентра СССР. Следует отметить И. Н. Белова, А. И. Бурцева, И. П. Ветлова, Н. Ф. Вельтищева, Л. П. Домбковскую, Г. Н. Исаеву, Л. С. Минину, Ш. А. Мусаэля, Т. П. Попову, Д. М. Сонечкина и многих других. Вначале обработка и анализ снимков осуществлялись путем визуального дешифрирования и практически без применения технических средств. Заметный вклад в организацию машинной обработки спутниковых данных сделан Е. П. Борисенковым, И. А. Четвериковым. Первая схема автоматической классификации ТВ снимков с ИСЗ „Метеор”, предложенная Д. М. Сонечкиным, базировалась на анализе статистических характеристик и текстурных признаков. Дальнейшие исследования показали, что задача идентификации облачности может решаться с привлечением статистических алгоритмов теории распознавания образов. Следует отметить, однако, что практическое применение алгоритмов по-

добного класса в Гидрометслужбе сдерживалось отсутствием в сокопроизводительной вычислительной техники. „Второе дыхание” данный подход обрел с появлением первых ПЭВМ, графических рабочих станций. В настоящее время у нас в стране существует ряд систем автоматической обработки и классификации многоспектральных изображений облачного покрова.

Наибольшие успехи в области оперативного использования спутниковых данных были достигнуты при составлении прогнозов синоптическим методом. В отличие от дискретных наземных синоптических наблюдений эти данные представили более полную картину глобального распределения облачности. Одновременно они позволили в различных районах земного шара более детально исследовать связи между структурой облачного покрова и погодообразующими процессами. В цикле работ, выполненных под руководством Н. Ф. Вельтищева, исследовались связи между формой облаков (ячейки, гряды и др.) и структурой температурного поля.

Совокупность приемов и методов, разработанных для дешифрирования изображений и построения схематизированных карт облачности, получила название „нефанализ”. Развиваемые первоначально применительно к изображениям в видимой области спектра методы нефанализа нашли свое отражение в монографии Л. С. Мининой „Практика нефанализа”, изданной в 1970 г.

Дальнейшее развитие методов анализа облачности было связано с совместным использованием снимков в видимом и ИК диапазонах спектра.

Было показано, что по характеру рисунка изображения облачности на снимках можно определять местоположение и интенсивность внетропических и тропических циклонов, атмосферных фронтов и зон внутритропической конвергенции, местоположение зон выпадения осадков, очагов активной грозовой деятельности, высотных циклонов, ложбин и гребней, струйных течений. Можно также оценивать устойчивость воздушных масс проследить влияние топографии местности, термической неоднородности подстилающей поверхности и местной циркуляции на распределение облачности, судить о характере поля воздушных течений и др.

Исследования динамики облачных полей позволили выработать рекомендации к прогнозу возникновения, эволюции и пер-

ещения циклонов, атмосферных фронтов и других метеорологических объектов, определяющих погоду.

Метод анализа мезомасштабных облачных форм позволил идентифицировать физические условия их формирования на фоне крупномасштабных атмосферных движений. Большое внимание уделялось изучению механизма мезомасштабной циркуляции, связанной с процессами конвекции. Спутниковые данные радиационной температуре, полученные с помощью актинометрической аппаратуры, благодаря работам В. Г. Болдырева, И. Копровой и других специалистов стали применяться для приближенной оценки высоты верхней границы облаков.

Перечисленные возможности интерпретации спутниковых данных сделали их важным компонентом при составлении синоптических прогнозов погоды общего пользования и экстренных предупреждений об опасных природных явлениях.

Результаты работ по методам дешифрирования облачного порога и использования спутниковых снимков были суммированы в Технической записке ВМО № 75 (1966 г.); в последующем по рекомендации ВМО была подготовлена Техническая записка МО № 124 (английский вариант — 1972 г.) под ред. Р. К. Андерсона и Н. Ф. Вельтищева, которая на многие годы стала основным руководством по интерпретации спутниковых снимков облачности. Техническая записка содержит атлас типов облаков облачных систем (коллекция идентифицированных ТВ и ИК снимков), описание методов использования спутниковых данных в экваториальных широтах и тропиках, косвенной оценки различных метеовеличин.

Результаты исследований по указанной проблеме в 1970-е годы опыт работы со спутниковыми данными нашли свое отражение в „Руководстве по использованию спутниковых данных в анализе и прогнозе погоды“, подготовленном специалистами гидрометеорологической службы СССР и социалистических стран в рамках работ по программе „Интеркосмос“. В руководство включены материалы по интерпретации снимков облачности в целях анализа мезомасштабных и локальных атмосферных процессов, анализа и прогноза синоптического положения в тропиках. Новым по сравнению с предыдущими публикациями является включение материалов по дешифрированию снимков в СВЧ диапазоне спектра. Измерение интенсивности уходящего СВЧ излучения позволяет

детектировать зоны осадков, оценивать водозапас и фазовый состав облаков, а также определять содержание водяного пара капельно-жидкой воды в атмосфере над водной поверхностью. работах Е. П. Домбковской, Л. М. Митника и других исследований были предложены методы комплексного анализа изображений облачного покрова в СВЧ, ИК и видимом диапазоне спектра для выделения чисто кристаллических облаков, оценки характера погоды и относительной вертикальной мощности облаков. Обзор и обобщение методов анализа СВЧ измерений применительно к индикации облаков можно найти в монографии К. Я. Кондратьева, В. В. Мелентьева „Космическая дистанционная индикация облаков и влагосодержания атмосферы (1986 г.).

Важное направление анализа спутниковых данных связано оценкой атмосферных движений, т. е. определением модуля направления вектора ветра по последовательности изображений облачного покрова с геостационарных ИСЗ. Орбита геостационарного спутника создает уникальную возможность непрерывного наблюдения за процессами, происходящими на больших территориях земного шара. Ряд последовательных изображений (через 30 мин) позволяет проследить динамику перемещений облачных образований, а также получить количественные оценки направления и скорости ветра, пользуясь гипотезой о том, что и которые типы облаков (трассеры — конвективные, перистые облака) перемещаются со скоростью воздушного потока. Созданы процедуры определения векторов ветра (вначале интерактивных, затем полностью автоматизированных) основывалось на анализе трех последовательных изображений. В НИУ Гидрометслужбы подобные исследования проводились главным образом с использованием информации с зарубежных геостационарных спутников. Планируется продолжить эту работу после запуска следующего спутника „Электро” № 2 в 2006 г.

Дистанционное метеорологическое зондирование. Одним из основных разделов спутниковой метеорологии является дистанционное метеорологическое зондирование, т. е. совокупность методов и средств получения количественной информации о параметрах системы атмосфера—подстилающая поверхность на основе интерпретации данных спутниковых измерений. К настоящему времени созданы и эксплуатируются системы дистанционно-

метеорологического зондирования на базе полярно-орбитальных геостационарных ИСЗ, с помощью которых оперативно получают количественные данные о вертикальных распределениях температуры и влажности в атмосфере, содержании отдельных газовых составляющих, характеристиках облачного покрова, температуре подстилающей поверхности.

На первых этапах особое внимание уделялось развитию методов дистанционного зондирования, основанных на интерпретации измерений собственного теплового излучения системы атмосфера—подстилающая поверхность в ИК и СВЧ диапазонах спектра; в отечественной литературе за указанным направлением закрепилось название „дистанционное термическое зондирование атмосферы” (ДТЗА).

Принципиальная возможность использования результатов путниковых измерений уходящего теплового излучения системы атмосфера—подстилающая поверхность, косвенных по отношению к искомым метеовеличинам, для определения вертикального профиля температуры была отмечена уже в конце 1950-х годов. Последовавшие затем теоретические исследования различных аспектов метода, реализация экспериментальных программ, прогресс в космическом приборостроении и технологиях привели к созданию в середине 1970-х годов первой оперативной системы ДТЗА на базе метеорологических спутников серии NOAA. Результаты этого этапа развития систем ДТЗА суммированы в Технической записке ВМО № 166, подготовленной с участием специалистов Гидрометслужбы СССР.

С конца 1970-х годов на борту спутников серии NOAA устанавливается более информативная аппаратура TOVS (с 1998 г. аппаратура ATOVS), включающая ИК модули HIRS/2, SSU и СВЧ модуль MSU (AMSU). Это позволило создать оперативную глобальную систему термического зондирования, которая стала всепогодной”. Повышение пространственной плотности зондирований и заметное улучшение точности результатов ДТЗА привели, в свою очередь, к расширению области их использования. Данные ДТЗА, представленные в кодовой форме SATEM, по каналам ГСТ поступают в крупнейшие прогностические центры, они дополняют данные наземной сети аэрологического зондирования и усваиваются в оперативных схемах численного анализа полей метеовеличин.

В нашей стране инициатива и руководство исследованиями области дистанционного метеорологического зондирования при надлежат акад. К. Я. Кондратьеву. Существенный вклад в исследование различных аспектов проблемы ДТЗА внесли Е. П. Борисенков, П. Н. Белов, А. И. Бурцев, А. В. Карпов, В. С. Комаров, В. П. Козлов, М. С. Малкевич, Б. Д. Панин, Л. А. Пахомов, Ю. В. Плохенко, О. М. Покровский, Ю. М. Тимофеев, А. Б. Успенский, В. И. Хамарин и др. В результате теоретических исследований и их экспериментальной проверки, проводившихся в ЛГУ, академических институтах, НИУ Гидрометслужбы (ГТО, Гидрометцентр СССР, ГосНИЦИПР, ЦАО), были разработаны эффективные методы „обращения” данных косвенных измерений ДТЗА, связанные с численным решением некорректных обратных задач, а также созданы методы анализа информационного содержания и оптимизации состава спутниковых измерений ДТЗА. Длительное время у нас и за рубежом обсуждалась оптимизация состава измерений и выбор наиболее подходящих спектрорадиометрических приборов. В работах В. П. Козлова, О. М. Покровского, Ю. М. Тимофеева, А. Б. Успенского и других ученых были предложены различные оптимальные схемы радиационных измерений с небольшим числом каналов умеренного спектрального разрешения в диапазонах полосы поглощения углекислого газа 4,3 и 15 мкм. Натурные эксперименты со спектрометром ЦАО на борту КА „Метеор-8” (Л. А. Пахомов и др.) подтвердили большинство теоретических выводов и послужил основанием для создания отечественной оперативной системы ДТЗА первого поколения на базе восьмиканального ИК радиометра 174К (устанавливался в 1980-х годах на спутниках „Метеор-2, „Метеор-3”).

В ГосНИЦИПРе и Гидрометцентре СССР был подготовлен программно-информационный комплекс обработки данных измерений радиометра 174К, который обеспечивал получение и передачу результатов ДТЗА (в виде сводок SATEM) по каналам связи. Глобальные сводки SATEM регулярно поступали в базу данных Гидрометцентра СССР, однако их использование было ограничено из-за недостаточной точности результатов температурного зондирования.

В программе NOAA уделялось большое внимание повышению точности зондирований в условиях облачности за счет увеличения пространственной плотности измерений и создания СВЧ атмосферных зондировщиков. Несмотря на достигнутый прогресс, остается актуальной проблема оптимизации состава спутниковых измерений.

Последняя проблема имеет принципиальное значение вследствие недостаточной точности (1,5—2,5К, 30 %) и грубого вертикального разрешения (3—5 км) данных спутникового температурного и влажностного зондирования, получаемых с помощью современных систем ДТЗА. Дело в том, что требования основных пользователей, обобщенные и объявленные ВМО, включают достижение точности и вертикального разрешения порядка 1К и 1 км для температуры и 10 % и 1 км для относительной влажности в тропосфере.

В этой связи предметом теоретических проработок и спутниковых экспериментов явилось изучение информативности „квазинепрерывных” спектров уходящего ИК излучения, измеряемых с помощью спектрометров-интерферометров. Важным этапом стал выполненный под руководством Л. А. Пахомова международный эксперимент с трассовым спектрометром-интерферометром (разработка ГДР—СССР в рамках программы „Интеркосмос”), установленным на борту КА „Метеор—Природа” № 2 в 1977 г. Как показали исследования В. А. Головки, В. Н. Досова, Т. А. Пахомова, А. Б. Успенского и др., использование квазинепрерывных спектров с разрешением $\sim 5 \text{ см}^{-1}$ позволяет улучшить качество температурных зондирований, однако требуемые уровни точности и разрешения не достигаются даже в условиях безоблачной атмосферы. Дальнейшие теоретические проработки и эксперименты с самолетным Фурье-спектрометром, выполненные за рубежом, показали, что к объявленным требованиям по точности и разрешению результатов ДТЗА можно приблизиться по крайней мере при отсутствии облачности) за счет радикального улучшения спектральной разрешающей способности и доведения ее до $0,3\text{—}0,5 \text{ см}^{-1}$. Подобные измерения предполагается производить с помощью спектрометров-интерферометров в рамках программ развития оперативных систем ДТЗА ведущих зарубежных стран после 2005 г.

В 1990-е годы дальнейшее развитие системы ДТЗА в нашей стране сдерживалось главным образом из-за отсутствия предложений со стороны отечественных приборостроительных фирм. Существенного прогресса в этом направлении следует ожидать в случае успешной реализации программы создания Фурье-спектрометра ИКФС для КА „Метеор-3М”, о которой уже говорилось выше.

Проблема улучшения качества результатов ДТЗА напрямую связана с повышением эффективности их усвоения в численных схемах анализа и прогноза метеополей. О. М. Покровский одним из первых в отечественной литературе указал на целесообразность совмещения интерпретации косвенных измерений ДТЗА и объективного анализа метеополей в рамках единой процедуры поскольку при этом наилучшим образом удастся учесть пространственные корреляционные связи искомым метеовеличин, а также оптимально согласовать разнородные виды информации. Развитие и практическая реализация подобного подхода привели к созданию в ряде ведущих зарубежных прогностических центров оперативных схем трехмерного (3D-Var) анализа полей. На очереди — разработка и внедрение процедур четырехмерного пространственно-временного анализа.

Остановимся коротко на одной из основных задач дистанционного метеорологического зондирования — определении температуры подстилающей поверхности T_s . Эксперименты по дистанционному определению T_s в условиях безоблачной атмосферы начались сразу после установки на борт КА актинометрической аппаратуры и одноканальных ИК радиометров, работавших в диапазоне 8—12 мкм (или 10,5—12,5 мкм). В результате исследований и разработок В. Г. Болдырева, М. С. Малкевича, Л. И. Копровой, В. И. Соловьева в ГосНИЦИПРе была создана оперативная технология глобального картирования T_s по данным одноканальных ИК радиометров, спутников „Метеор-2”. В дальнейшем эта технология была модернизирована и адаптирована к измерениям ИК радиометра „Климат” спутников „Метеор-3”. Ее оперативное применение обеспечивает получение спутниковых оценок T_s в условиях безоблачной атмосферы со средней квадратической погрешностью в диапазоне 1,5—2,0 К. Теоретические исследования В. М. Сутовского, А. Б. Успенского и спутниковые эксперименты 1970—1980-х годов показали, что заметного повышения

точности дистанционного определения T_s (средняя квадратическая погрешность около 1 К) можно добиться, переходя к многоканальным измерительным схемам и, в частности, измерениям в каналах 10,5—11,5; 11,5—12,5 мкм „расщепленного” окна прозрачности 10,5—12,5 мкм. Подобный состав измерений обеспечивает уже около 20 лет радиометр AVHRR ИСЗ NOAA. Благодаря работам В. И. Соловьева, П. В. Люшвина и других в Гидрометслужбе созданы и функционируют системы получения цифровых карт T_s для внутренних и окраинных морей европейской части России по данным AVHRR регионального покрытия. Запанированная установка на борт „Метеор-3М” № 2 многоканального сканирующего радиометра, имеющего, подобно аппаратуре AVHRR, два канала „расщепленного” окна прозрачности, позволит создать отечественную систему глобального картирования ГПО с улучшенными точностными характеристиками, удовлетворяющими большинству требований ВМО.

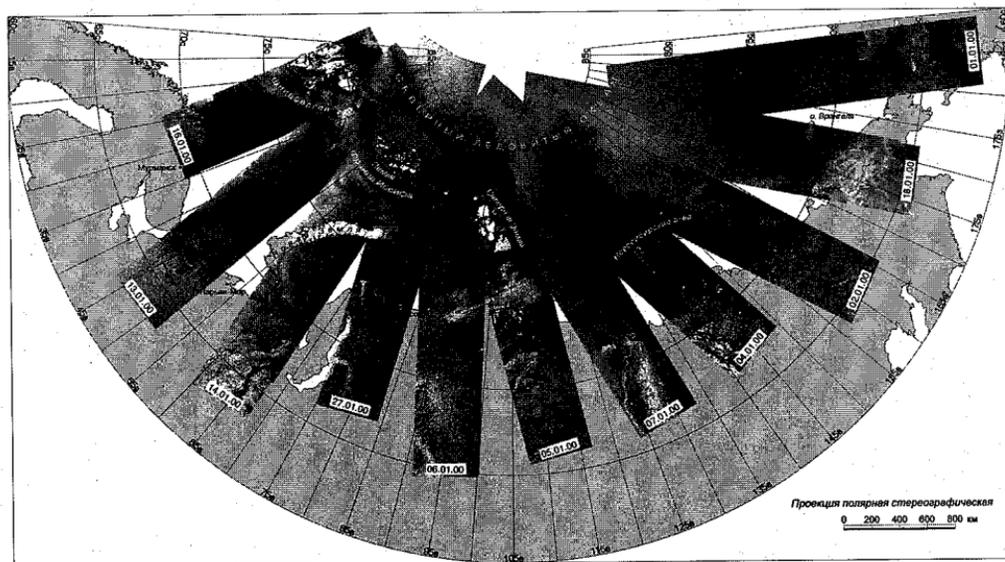
Стоит отметить, что дистанционные методы определения температуры поверхности суши (ТПС) развиты в гораздо меньшей степени и не доведены до уровня оперативных технологий. Это объясняется большей сложностью задачи, в частности необходимостью корректного учета дополнительного мешающего фактора — нечерноты поверхности. Прогресса в решении задачи дистанционного определения ТПС следует ожидать за счет повышения информативности спутниковых измерений (например, использование измерений Фурье-спектрометра ИКФС).

Спутниковая радиолокационная метеорология. Запуск в сентябре 1983 г. КА „Космос-1500” с установленными на его борту радиолокационной станцией бокового обзора (РЛСБО) и сканирующим СВЧ радиометром диапазона 8 мм (РМ-08) положил начало работам по спутниковой радиолокационной метеорологии. Как уже отмечалось выше, основное назначение РЛСБО — всепогодное (в условиях облачности и в любое время суток) наблюдение за состоянием водной поверхности и ледяным покровом морей и океанов (рис. 3).

Анализ поступивших снимков РЛСБО показал, что на свободной ото льда морской поверхности наблюдается существенная мезомасштабная изменчивость интенсивности рассеяния радиолокационного сигнала. Результаты исследований специалистов АНИИ, Гидрометцентра СССР, ГосНИЦИПРа, ИРЭ АН УССР,

ИСЗ „Океан-01” № 7, РЛСВО

300



Хабаровского РВЦ и других организаций, систематизированные в спецвыпуске журнала „Исследование Земли из космоса” (1985 г.) и обобщенные в монографии „Радиолокация поверхности Земли из космоса” (1990 г.), показали, что указанная мезомасштабная изменчивость является следствием влияния на приводный ветер таких атмосферных процессов, как атмосферные фронты, циклоны, конвективные вихри и цепочки мезовихрей, мезомасштабные конвективные гряды и ячейки, атмосферные внутренние гравитационные волны, зоны осадков и др.

Анализ снимков РЛСВО, полученных в весенний период, показал их высокую чувствительность к контрастам влажности в самом верхнем слое почвенного и снежного покровов. Вследствие этого спутниковая радиолокационная съемка оказалась весьма удобным инструментом для точного определения границ схода снежного покрова, оценки степени увлажнения самого верхнего слоя почвы, выявления мезомасштабных пространственных структур районов выпадения осадков на сухую почву.

Были разработаны методы количественного анализа снимков РЛСВО для оценки величины мезомасштабной изменчивости жоростей приводного ветра в районах атмосферных волн, атмосферной конвекции в районах конвективных осадков, а также для распознавания градовых осадков и градоносных облаков над поверхностью суши. Установлено, что снимки РЛСВО могут успешно использоваться для диагноза опасных и особо опасных осадков и града над сушей, а также для обнаружения районов экваторий с опасными и особо опасными ветрами и оценки значений максимальных скоростей приводного ветра. Используемая в настоящее время методика обработки цифровой информации РЛСВО обеспечивает получение данных о локальных значениях модуля максимальной скорости приводного ветра в диапазоне от 0 до 40 м/с с допустимой для практических задач погрешностью ± 3 м/с.

Исследования, выполненные в ГосНИЦИПре, позволили создать методы и технологии практического использования цифровой информации спутниковых РЛСВО для решения задач ежесуточного, декадного и ежемесячного наблюдения за границами распространения ледяного покрова в районах Арктики и Антарктики, определения сплоченности и возраста морских льдов, их рассеивающих свойств, а также наблюдения за переме-

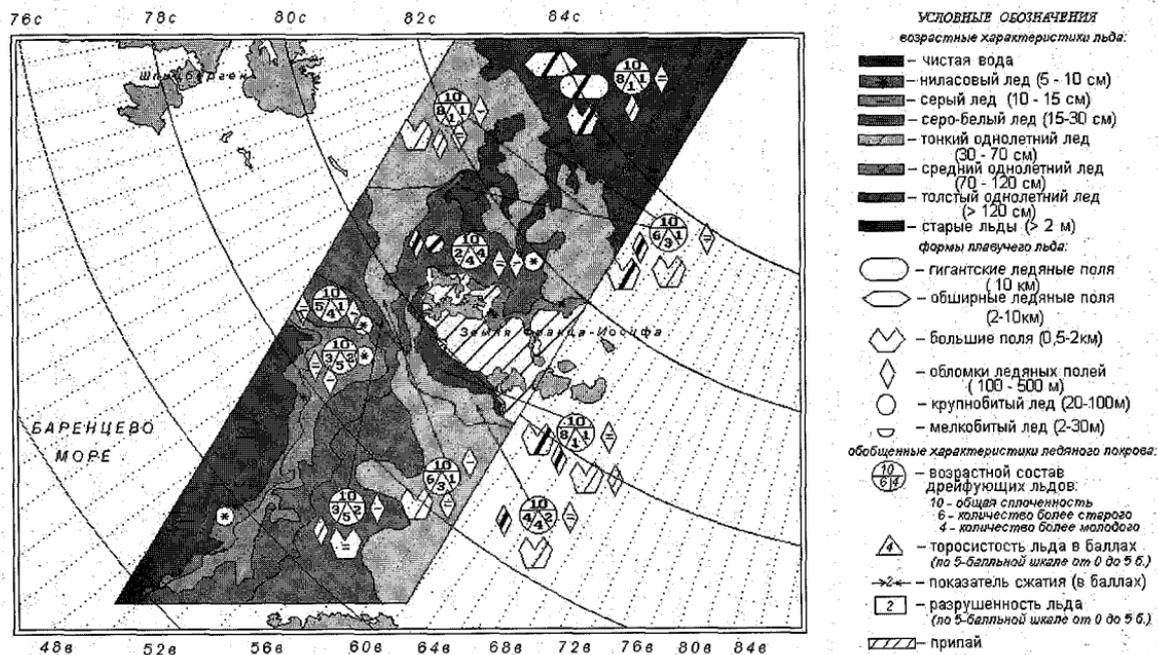


Рис. 4. Карта-схема ледовой обстановки (северо-восточная часть Баренцева моря) составлена по данным ИСЗ „Оке-

цением и размерами отдельных айсбергов. При этом льды и айсберги выступают в роли своеобразных гидротермодинамических граसरсов.

Карта-схема ледовой обстановки, построенная по результатам обработки и интерпретации фрагмента снимка РЛСБО ИСЗ „Океан № 7”, относящаяся к северо-восточной части акватории Баренцева моря, приведена на рис. 4.

В заключение отметим большую роль в создании методов анализа и использования данных РЛСБО многих специалистов ГосНИЦИПРа и НИЦ „Планета”: В. В. Асмуса, М. В. Бухарова, З. А. Кровотынцева, О. Е. Милехина, М. Назирова, П. А. Никишина, А. П. Пичугина, Ю. Г. Спиридонова, И. С. Трениной и др.

Спутниковая климатология. Возможность изучения Земли как планеты, ее климата и его глобальных изменений существенно возросли благодаря развитию космических средств наблюдений. Цель спутниковой климатологии — изучение климата Земли и его изменений с использованием спутниковых данных. Ученые и специалисты Гидрометслужбы внесли большой вклад в становление и развитие спутниковой климатологии облачности и исследования радиационного баланса Земли (РБЗ).

За период регулярных спутниковых наблюдений был накоплен большой объем фотомонтажей облачного покрова и карт неанализа. По предложению акад. Г. И. Марчука в 1975 г. было принято решение проводить обработку указанных материалов вручную для визуальной оценки общего количества облачности узлах регулярной сетки $5 \times 10^\circ$. Указанная работа систематически велась в Гидрометцентре СССР, ГосНИЦИПРе и НИИГМИ—МЦД, где работами руководил В. И. Титов. Полученные на основе измерений ИСЗ серии „Метеор” архивы данных были использованы для исследования статистических характеристик глобального поля облачности. В последний период указанная работа автоматизирована, и данные о количестве облачного покрова в узлах регулярной сетки получают в НИЦ „Планета” в результате анализа монтажей изображений с нескольких стационарных ИСЗ. Стоит отметить, что, по инициативе ВМО, в рамках Всемирной программы исследований климата с 1983 г. выполняется Международный проект по спутниковой климатологии облачного покрова (ISCCP), исходной информацией для

которого являются данные полярно-орбитальных и геостационарных метеоспутников. Одна из задач проекта состоит в анализе статистических характеристик глобального поля облачности. Описанные исследования по климатологии облачного покрова на основе данных ИСЗ „Метеор” полностью соответствуют целям и задачам проекта ISCCP.

Второе важное направление исследований по спутниковой климатологии — анализ временных рядов спутниковых наблюдений РВЗ и его компонентов (альbedo, длинноволнового излучения, солнечной постоянной) по данным наблюдений отечественных и зарубежных метеоспутников. Как уже отмечалось выше на борту КА типа „Космос” и серии „Метеор” неоднократно устанавливалась актинометрическая аппаратура с отдельной регистрацией уходящего излучения в спектральных диапазонах 0,3—3 мкм (отраженная солнечная радиация) и 3,0—30,0 мкм (собственное излучение системы Земля—атмосфера). Результаты оценок компонентов РВЗ с анализом их географического распределения представлены в монографии К. Я. Кондратьева „Спутниковая климатология” (1983).

В 1990-е годы значительный прогресс был достигнут в создании спутниковой измерительной аппаратуры. Специалистам Гидрометслужбы СССР и Франции при участии ученых Германии был разработан радиометр СРРБ (сканирующий радиометр радиационного баланса, ScaRaB). Инициатором и руководителем работ по созданию СРРБ со стороны Гидрометслужбы был Л. А. Пахомов. Установка СРРБ совместно с прибором ИСП (измеритель солнечной постоянной) отечественной разработки на борту ИСЗ „Метеор-3” № 7 позволила сформировать архивы наблюдений и продолжить архив данных измерений аппаратурой ERBE КА „Nimbus”. С июля 1998 г. несколько месяцев аналогичная аппаратура функционировала на борту КА „Ресурс-О1” № 1. Все это позволяет значительно интенсифицировать исследование различных аспектов радиационной климатологии.

Изучение природных ресурсов Земли из космоса. Для своевременного и эффективного контроля за состоянием природной среды и рациональным природопользованием на огромных площадях, труднодоступных и малонаселенных территориях и в суровых климатических условиях космическая информация имеет решающее значение.

Для изучения природных ресурсов Земли в России используется информация с российских спутников „Ресурс-01”. Съёмочная аппаратура ИСЗ „Ресурс-01” имеет более высокое пространственное разрешение и более узкую полосу обзора по сравнению с аппаратурой метеорологических спутников серий „Метеор” или NOAA. Она не предназначена для обеспечения ежедневной съёмки всей территории России. С ее помощью можно производить только выборочную съёмку конкретных районов. Высокое пространственное разрешение съёмочной аппаратуры позволяет изучать заданный район более детально.

Информация с природно-ресурсных ИСЗ используется в основном для решения двух типов задач: оперативных и не оперативных. Первый круг задач связан с обнаружением и оперативным картированием быстро протекающих (на земной поверхности) процессов и явлений. Данная информация необходима для оперативной оценки местоположения, масштабов, границ явлений природного или техногенного характера, которые часто встречаются в различных регионах России (см., например, топографию „Природа Земли из космоса”).

Второй круг задач связан с обследованием территорий или оценкой текущего состояния окружающей среды заданного района. Такая работа необходима для уточнения топографии местности, выявления медленно протекающих изменений ландшафта, оценки экологического состояния окружающей среды. Решение этих задач связано с распознаванием и классификацией видимых элементов ландшафта на космических изображениях с использованием либо визуальных методов дешифрирования, либо методов автоматизированной классификации. Необходимым элементом при распознавании характеристик ландшафта является валидация выделенных классов по наземным и картографическим данным. При интеграции спутниковых, наземных картографических данных целесообразно использовать геоинформационные системы и технологии.

Работы по анализу и практическому применению космической информации высокого разрешения проводились достаточно широким фронтом, в том числе в Гидрометслужбе СССР, начиная с запусков первых КА „Метеор—Природа”. Среди НИУ Гидрометслужбы следует отметить ГосНИЦИПР (в последующем ИИЦ „Планета”), специалисты которого В. В. Асмус, В. Г. Бли-

нов, В. В. Козодеров, В. А. Кровотынцев, О. Е. Милехин Ю. Г. Спиридонов, А. П. Тищенко и другие внесли заметный вклад в развитие методов анализа данных природно-ресурсных ИСЗ. Рассмотрим примеры исследовательских проектов, выполненных в последние годы в НИЦ „Планета” по указанной тематике.

Мониторинг воздействия на окружающую среду нефтяных и газовых разработок в Западной Сибири. Добыча нефти и газа в Западной Сибири привела к серьезным экологическим проблемам, связанным главным образом с нарушением норм строительства и эксплуатации коммуникационных сетей и буровых установок.

Работы по российско-французскому проекту „Геоинформационная система на основе спутниковых данных для мониторинга воздействия на окружающую среду нефтяных и газовых разработок в Западной Сибири (район Сургута)” велись в 1994—1995 гг. В качестве объекта исследования выбрана нефтеносная территория, расположенная к северо-востоку от г. Сургут. Перечислим основные результаты выполнения проекта.

Создана и передана для использования администрации Сургутского района территориальная информационная система для определения текущего состояния окружающей среды, содержащая географически привязанные спутниковые изображения („Ресурс-01”, „Алмаз”, СПОТ, ЕРС), материалы их автоматизированной и визуальной интерпретации. Получен ряд новых картографических документов: включая тематическую карту восточной части Сургутского района, карты зон риска поверхностных загрязнений, изменения ландшафта и инфраструктуры и др. Отработана методология идентификации и классификации по спутниковым изображениям различных объектов земной поверхности с точки зрения их способности задерживать или распространять нефтяные загрязнения.

Спутниковый мониторинг опустынивания. По данным ЮНЕП (Программа ООН по окружающей среде), в настоящее время опустыниванием охвачено порядка 70 % всех засушливых земель, что составляет около четверти земной суши. В России самой наиболее интенсивного опустынивания является территория Калмыкии (Калмыкия расположена в северо-западной части Прикаспийской низменности). Наибольшие темпы деградации

очвенно-растительного покрова наблюдаются в районе Черных земель (около 40 % территории Калмыкии), где за последние 30 лет площадь очагов опустынивания увеличилась более чем в 10 раз. Калмыкия включена ЮНЕП в список территорий, подверженных наиболее интенсивным процессам опустынивания.

Для мониторинга процессов опустынивания на территории алмыкии необходимо осуществлять сбор информации о состоянии почвенно-растительного покрова несколько раз в периоды максимумов вегетационного цикла (конец мая—начало июня и сентябрь) с интервалом 1—2 недели. При этом нужно одновременно охватывать обширные территории. Эффективным средством решения данной задачи является организация космической съемки территорий размерами от нескольких десятков до нескольких тысяч километров с периодичностью от 1 до 15 дней.

Для этого целесообразно комбинировать различные виды космической информации: аппаратурой высокого разрешения (данные спутников „Ресурс-01”) производится съемка тестовых участков; затем полученные результаты экстраполируются на всю исследуемую территорию на основе информации среднего и низкого разрешения (данные NOAA).

В результате выполнения проекта организована регулярная космическая съемка районов опустынивания Калмыкии аппаратурой различного пространственного разрешения; осуществлен сбор комплексной картографической информации по исследуемому региону; проведена автоматизированная цифровая обработка и интеграция различных видов космической информации; построены цифровые тематические карты региона опустынивания Калмыкии, содержащие информацию о различных видах почвенно-растительного покрова.

Наблюдения за лесными пожарами. Использование космических данных позволяет существенно улучшить противопожарную охрану лесов. Пожары, обнаруженные в течение 5—15 ч после их возникновения обычно могут быть локализованы и потушены. По истечении данного срока чаще всего этого сделать не удается, что приводит к массовой гибели леса.

Космическая информация используется для ежедневной оперативной оценки метеорологической и пожароопасной обстанов-

ки, обнаружения пожаров и контроля их динамики. Применяется в основном информация с ИСЗ NOAA и „Метеор”, а также данные аппаратуры MODIS КА „Terra”, „Aqua” (США), позволяющие в пожароопасные периоды давать оценку обстановки дважды в сутки. При обработке используются либо температурные ИК каналы для обнаружения „горячих точек”, либо каналы в видимого диапазона для идентификации дымовых шлейфов. Ограничения таких систем предупреждения связаны с необходимостью иметь безоблачные условия для наблюдений.

Спутниковый мониторинг наводнений. Ежегодно в мире расходы на проекты по защите от наводнений составляют около 500 млн. долларов США. Поэтому задачи прогнозирования, обнаружения, контроля и оценки последствий наводнений имеют важное экономическое и социальное значение.

Обширность речных пойм и быстрота протекающих на них процессов затопления и опорожнения, с одной стороны, и недостаточная густота сети гидрологических постов — с другой, затрудняют получение сведений о наводнениях наземными средствами. На основе космической информации можно определять основные гидрологические параметры, характеризующие процесс наводнения.

Интеграция спутниковых данных в геоинформационной системе (ГИС) совместно с картографическими материалами, результатами наземных обследований и другой геокодированной информацией позволит получать принципиально новые информационные продукты.

Для российско-французского проекта по спутниковому мониторингу наводнений в качестве исследуемых объектов были выбраны Волго-Ахтубинская пойма и пойма р. Белой в России и ее участка на территории Франции. Исходная спутниковая информация включала архивные и оперативные данные КА „Ресурс-01”, „Океан-01”, СПОТ и ЕРС-1. Результаты обработки анализа данных запланированных съемок в совокупности с архивными данными позволили построить карты зон риска возможных разливов в исследуемых районах и развить методы совместной обработки и использования данных российских и европейских ИСЗ для прогнозирования, мониторинга и оценки последствий наводнений.

Космический мониторинг участка проектируемой железной дороги „Карпогоры—Вендинга”. Данный проект выполнялся в рамках Программы СКМ „Север”.

Участок Карпогоры—Вендинга протяженностью около 215 км расположен в междуречье рек Пинеги и Вапки и проходит по малонаселенной слабо освоенной территории. В природном отношении характеризуется среднетаежными равнинными ландшафтами с развитием еловых, сосновых и мелколиственных лесов. В связи с предстоящей активизацией хозяйственной деятельности в зоне строительства железной дороги и связанным с ней увеличением нагрузки на природную среду появилась необходимость в проведении предэксплуатационного обследования этой территории на основе использования спутниковых данных.

При выполнении работы основным источником дистанционной информации являлись данные сканера МСУ-Э КА „Ресурс-01”. Чтобы покрыть спутниковой съемкой всю притрассовую полосу местности, понадобилось 8 космических изображений, отобранных за три года непрерывного космического мониторинга этого района за летние месяцы 1995—1997 гг.

В результате предварительной обработки из 8 космических изображений получен монтаж обследуемой территории. Первоначально монтаж был сформирован для одного спектрального канала, затем эта технология была распространена на другие спектральные каналы, и в итоге было сформировано цветосинтезированное изображение. Далее на основе автоматизированной классификации многозональных монтажей построена тематическая карта всего района пролегания железнодорожной магистрали. Определены основные виды ландшафтов, находящиеся в зоне строительства железной дороги.

СОЛНЕЧНО-АТМОСФЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗВИТИЕ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ

В конце 1950-х и начале 1960-х годов завершилось создание ракетно-ядерного щита для обороны СССР.

Активное участие в работах по исследованию влияния испытаний ракетно-ядерного оружия на окружающую природную среду принимала Академия наук СССР. В частности, было необходимо:

— уточнить и исследовать вариации естественных параметров верхней атмосферы (плотность, состав, давление, температуру) с целью обеспечения точных траекторий полета баллистических ракет;

— исследовать вариации геомагнитного поля и радиационную обстановку в околоземном космическом пространстве (ОКП) целью оценки влияния геомагнитного поля и радиационной обстановки на ракетно-космическую технику;

— исследовать влияние ядерных взрывов на радиационную обстановку в окружающей природной среде (на поверхности Земли, в атмосфере и ОКП).

Исследования по вышеперечисленным проблемам были начаты в Геофизическом институте АН СССР (ГеоФИАН, директор - академик О. Ю. Шмидт) и Институте ядерной физики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (директор — академик С. Н. Вернов).

В январе 1956 г. на базе подразделений ГеоФИАН был создан Институт прикладной геофизики АН СССР (ИПГ, директор - академик Е. К. Федоров), которому было поручено решение вышеперечисленных проблем.

Ракетные, спутниковые и лидарные исследования верхней атмосферы

Развитие ракетной техники позволило начать исследование околоземного космического пространства прямыми контактными методами при установке научной аппаратуры в головные ча

ти ракет или в специальные приборные контейнеры, которые с помощью ракет доставлялись в верхние слои атмосферы.

Для этих целей в ИПГ для измерения структурных параметров верхней атмосферы на высотах выше 100 км (нейтрального и ионного составов, плотности и температуры) были разработаны специализированные для условий ракетных экспериментов масс-спектрометры и манометры различных типов.

В 1958 г. разработанный в ИПГ радиочастотный масс-спектрометр РМС-1 был успешно использован для измерений ионного состава верхней атмосферы В. Г. Истоминым на 3-м ИСЗ. В это же время по техническому заданию ИПГ в СКВ аналитического приборостроения (г. Санкт-Петербург) проводились разработка и изготовление радиочастотных масс-спектрометров типа МХ6401—МХ6407 опытными партиями.

С помощью этих приборов в 1959—1960 гг. были проведены исследования ионного состава В. Г. Истоминым и нейтрального состава А. А. Похунковым на академических ракетах Р2А и Р5А разработки С. П. Королева на высотах в интервалах от 100 до 210 и от 100 до 430 км соответственно.

Эти эксперименты позволили получить данные по составу верхней атмосферы, существенно менявшие сложившиеся представления о доминировании легких газов (Н, N и О) в атмосфере Земли на высотах более 100 км. Оказалось, что основным компонентом нейтральной атмосферы до высот 180—200 км остается молекулярный азот, выше начинает доминировать атомарный кислород, а водород и атомарный азот остаются малыми примесями до высот порядка 1000 км.

Кроме того, в этих экспериментах для условий высокой солнечной активности были выявлены и измерены высоты гравитационного разделения нейтральных газов атмосферы (N_2 и Ar).

В экспериментах по измерению ионного состава впервые были обнаружены ионы метеорного происхождения.

Для обеспечения систематических измерений структурных параметров верхней атмосферы и выявления закономерностей ее изменчивости под воздействием различных факторов как естественного, так и искусственного происхождения по техническому заданию ИПГ были разработаны и внедрены в практику исследований до высот 180—240 км метеорологические ракеты МР-12, МР-20 и МР-25.

Для запуска этих ракет по техническому заданию ИПГ были созданы станции ракетного зондирования атмосферы (СРЗА „Волгоград” (в районе Капустина Яра) и на о. Хейса (Земля Франца-Иосифа). Кроме того, пусковые установки и комплексы радиотехнических измерительных средств были оборудованы на научно-исследовательских судах (НИС) Гидрометслужбы „Профессор Зубов” и „Профессор Визе”.

Для обеспечения ракетных и спутниковых экспериментов по техническому заданию ИПГ на Сумском заводе электронных микроскопов было организовано серийное производство радиочастотных масс-спектрометров МХ6407П — последней модификации из опытных разработок СКВ аналитического приборостроения АН СССР.

На базе этого прибора на Сумском заводе в 1970-х годах были разработаны радиочастотные масс-спектрометры типа ИВА-1 нескольких модификаций.

С помощью масс-спектрометров упомянутых выше типов за период с 1958 по 1992 г. было проведено около 350 результативных ракетных и 10 спутниковых экспериментов.

Ввиду того что во всех модификациях радиочастотного масс-спектрометра использовался однотипный датчик — 3-каскадный анализатор, изготовлявшийся в течение нескольких десятков лет по неизменной вакуумной технологии, можно утверждать, что получен уникальный по масштабам и однородности массив данных. С помощью этих же типов масс-спектрометров проводились ракетные эксперименты по программам научно-технического сотрудничества с Францией и Индией в период с 1968 по 1986 г. Пуски осуществлялись с помощью индийских ракет „Сентавр” с полигона в Тумбе (Индия, геомагнитный экватор), а также французских „Драгон” и „Вероника” на полигонах в Ландах (юго-запад Франции, Бискайский залив) и в Куру (Французская Гвиана).

Ракетные эксперименты проводились в широком диапазоне гелиогеофизических условий: в разных фазах (минимум, максимум и переходные фазы) в течение трех циклов солнечной активности; в экваториальных, средних и авроральных широтах; в различные сезоны года и время суток; в широком интервале геомагнитной активности ($A_p = 4...82$, $K_p = 0...7$).

Спутниковые эксперименты проводились, кроме упомянутого 3-го ИСЗ, на специализированных для аэрономических исследований космических аппаратах „Космос-196“, „Космос-272“, „Электрон-2“, „Электрон-4“, „Венера-1“, „Венера-4“, „Астра“, „Экран“, „Метеор“, „Прогресс“ и др.

Полученные данные использовались для построения первых эмпирических моделей, а впоследствии послужили основанием для разработки в 1990 г. Госстандарта Союза ССР „Атмосфера Земли верхняя. Модель химического состава“, ГОСТ 15645.154—90.

Эта модель для интервала высот от 80 до 800 км была построена на основе обобщения и анализа мировых спутниковых данных по масс-спектрометрическим измерениям состава атмосферы Земли; для аппроксимации этих данных на меньшие высоты использовались теоретическое моделирование и результаты радиозондирования.

1. Анализ данных ракетных экспериментов показывает наличие значительных вариаций состава в зависимости от условий и причин возмущений. Изменчивость может достигать фактора 3 и более в интервале высот 110—150 км, а в полярных областях может превышать фактор 10. Высотные профили часто имеют волновой характер, что свидетельствует о наличии интенсивных динамических процессов на высотах выше 110 км и приводит к выводу о доминировании в верхней атмосфере нестационарных состояний (с вероятностью около 0,8).

Кроме того, было обнаружено отличие высотных профилей относительных концентраций основных компонентов от модельной аппроксимации спутниковых данных по барометрическому закону в сторону малых высот, доступных только ракетному зондированию.

Абсолютное расхождение на высотах нижней термосферы (20 км), увеличиваясь с высотой, выходит за пределы ошибок и достигает значения 9,5 % на высоте 140 км. Различие экспериментальных и модельных профилей обусловлено заметным влиянием неучтенной в модели многокомпонентной диффузии при высоких градиентах температуры в нижней термосфере. Поэтому для повышения точности модели требуется корректировка высотных профилей и абсолютных значений в подспутниковом интервале высот (100—200 км).

2. На основе анализа пространственно-временной изменчивости нейтрального состава на высотах выше 100 км при статистической обработке данных ракетных экспериментов (для ряда более 20 лет) было выявлено наличие заметного уменьшения концентрации атомарного кислорода за исследуемый период наблюдений (1966—1992 гг.). Статистически обоснованная величина годового тренда в изменении концентрации атомарного кислорода на высоте 150 км — около 1 % по линейной и экспоненциальной регрессиям. Это означает, что характерное время жизни этого компонента атмосферы по линейной регрессии составляет около 100 лет.

Ввиду того что при анализе были учтены и исключены естественные, обусловленные изменчивостью солнечной активности причины, выявленный отрицательный тренд содержания атомарного кислорода в верхней атмосфере имеет техногенное происхождение, так как исследованный период характеризовался интенсивным освоением околоземного космического пространства.

3. Результаты анализа приводят к выводам о целесообразности и безусловной необходимости постоянного спутникового мониторинга структурных параметров верхней атмосферы, что позволит получать реальные характеристики при суммарном воздействии всех факторов, определяющих изменчивость состояния верхней атмосферы. Данные мониторинга будут использоваться для адаптации модели верхней атмосферы к реальным условиям и на основе скорректированной модели будут просчитываться уточненные прогнозы состояния верхней атмосферы, в том числе с учетом антропогенных факторов.

В Институте прикладной геофизики для организации такого мониторинга на основе многолетних исследований и разработок созданы модельные и инструментальные основы подсистемы верхней атмосферы в рамках Гелиогеофизической службы.

4. Кроме того, возникает безотлагательная необходимость разработки рекомендаций по международной регламентации и пользования ОКП в различных целях. В противном случае, если неконтролируемое воздействие на структуру верхней атмосферы будет продолжаться теми же темпами, то, как это следует из полученных данных, через обозримый период один из основных

компонентов верхней атмосферы может претерпеть катастрофические изменения с трудно предсказуемыми последствиями.

5. В экспериментах на спутниках, кроме данных по глобальному распределению структурных параметров земной атмосферы, получены важные практические результаты по изучению свойств околообъектовой среды, пространственно-временной изменчивости ее состава, плотности, температуры нейтральной и ионизированной компоненты.

Исследовались временные характеристики сорбционных процессов. Была выявлена асимметрия плотности собственной внешней атмосферы относительно вектора скорости при заметных угловых скоростях вращения космического аппарата. Ввиду этого обстоятельства для исключения искажений и сбоев в работе систем ориентации рекомендуется использовать в качестве управляющего параметра набегающий поток нейтральных частиц и его зависимость от угла атаки при одновременном исключении фона от собственной внешней атмосферы и от претерпевших соударения с поверхностью и частично термализованных частиц набегающего потока. Прототипом такого устройства может служить разработанный в ИПГ нейтральный зонд, на который имеется авторское свидетельство.

Анализ результатов исследований на ракетах и спутниках позволил систематизировать данные по зависимости характеристик околообъектовой среды от работы двигателей на космическом аппарате, их расположения, от конструкции объекта, используемых материалов, степени герметизации, траектории и геопеогофизических условий.

Эти данные послужили основанием для разработки рекомендаций по оптимизации работы космических объектов, повышению эффективности управления их полетом, рациональному размещению и защите приборов на внешней оболочке космических аппаратов, а также по работе космонавтов в открытом космосе.

6. Важные практические результаты были получены в ракетных пусках в 1986—1989 гг. на средних широтах и в полярных областях с борта НИС „Профессор Зубов”, в которых проводились активные эксперименты (совместно с Горьковским государственным университетом). Впервые с борта ракеты осуществлялись и исследовались волновые разряды в ионосфере Земли. Эти

разряды формировались полем излучения бортовой дипольной антенны на частотах локального плазменного резонанса.

Для возбуждения волновых полей напряжением амплитудой 1 кВ на частоте 480 кГц подводилось между корпусом ракеты и антенной в виде проволочного кольца диаметром 2 м, поднятого на высоту около 2 м над головной частью ракеты. Высокочастотный сигнал модулировался низкими частотами 240 и 960 Гц по специальной циклограмме.

Кроме бортовых приборов диагностики (автоколебательный зонд, фотометр, счетчик заряженных частиц с энергией выше 3 кэВ, анализатор низких частот, датчики магнитного поля), в эксперименте на средних широтах осуществлялся наземный прием радиоизлучения в широком диапазоне частот и оптического свечения разряда. Время запусков ракет было согласовано по времени с пролетом спутников „Аркад-3”, „Активный” и „Ионо зонд” для регистрации создаваемых в ионосфере эффектов с помощью бортовой спутниковой аппаратуры.

Успешно проведенные 6 ракетных экспериментов позволили получить несколько фундаментальных результатов, имеющих научное и практическое значение. Во-первых, разработан и экспериментально подтвержден метод глубокой модуляции высыпаящихся частиц большой энергии (свыше 40 кэВ) плазменно-волновым разрядом, возбуждаемым бортовым электромагнитным источником на высотах 100—150 км. Другими словами, реализуется стимуляция высыпания заряженных частиц, влияние на полярный электроджет и полярные сияния (искусственная Аврора). Во-вторых, подтверждается возможность образования борта ракеты плазменно-волнового канала больших геометрических размеров (длиной свыше 1 км, диаметром около 10 м, концентрацией электронов 10^7 см^{-3}).

Этот канал может выполнять несколько функций. С одной стороны, он может служить помехой, „ложной целью”, засветкой для различного рода следящих систем. С другой стороны плазменный шнур вдоль магнитной силовой линии может рассматриваться как высокоэффективная антенна для ОНЧ-волн и может обеспечивать надежную связь из космоса с наземными и подводными приемными станциями.

Зарегистрированные на спутниках и Земле сигналы в ОНЧ диапазоне, сформированные в плазменно-волновом канале при

разряде от ракетного бортового источника, уверенно показывают превышение над уровнем шумов. Это обстоятельство свидетельствует о возможности разработки принципиально нового способа космической радиосвязи.

Модификация способа, примененная в последнем ракетном эксперименте (образование вокруг ракеты искусственного газового облака), позволяет расширить возможности этого нового способа связи. Становится возможным использование нового способа связи на орбитальных космических аппаратах и зондирующих ракетах без ограничения по высоте.

7. В Институте прикладной геофизики проводятся работы по изучению влияния солнечной активности на климат, погоду и живые организмы.

Получен ряд результатов, не имеющих аналогов за рубежом.

Разработан метод, позволяющий выделять в атмосферных возмущениях влияние солнечной активности и впервые получить количественные характеристики солнечно-обусловленных возмущений термобарического поля в тропосфере. Выделена система циркуляции в атмосфере, связанная с развитием геомагнитных возмущений.

Выявлены пространственные закономерности солнечно-атмосферных связей.

Разработан сценарий проявления солнечной цикличности в многолетних колебаниях атмосферных и океанических параметров на примере Северной Атлантики. Выявлена солнечно-зависимая повторяемость определенных атмосферных циркуляционных форм.

В колебаниях радиационного баланса в атмосфере обнаружена квазиодиннадцатилетняя цикличность.

Получены характеристики частотных структур связей в системе Солнце—Земля.

8. Рассматривались и анализировались связи пространственной изменчивости энергетических характеристик атмосферных процессов, электрического и магнитных полей с солнечной активностью и здоровьем человека с целью выявления пространственно-временных закономерностей этих связей.

Вариации рассматриваемых полей неоднородны в пространстве и во времени. Масштабы неоднородностей зависят от геофизических, климатических и географических условий. По-

этому влияние солнечной активности на здоровье человека также зависит от характера воздействующих факторов и имеет пространственно-временную неоднородность.

Полученные результаты исследований в дальнейшем должны стать основой для разработки механизма, отвечающего реальной структуре солнечно-атмосферных связей и их пространственно-временной изменчивости, могут быть полезными для учета влияния солнечной активности на погоду и климат в долгосрочных прогнозах погоды, а также для разработки географически районированных методик прогноза влияния солнечной активности на здоровье человека.

9. Весьма важным и перспективным самостоятельным направлением оптических исследований атмосферы представляются развитые в Институте прикладной геофизики под руководством Г. Ф. Тулинова с участием сотрудников ИПГ (М. С. Иванова, Ю. П. Дудолодова, Д. В. Антонова, Л. Н. Трифонова, Е. Н. Давыдова, В. Н. Кузьменко, В. А. Смеркалова, С. Г. Тулинова и др.) опытно-конструкторские работы по созданию серии лидаров наземного, морского и космического базирования и проведению с их помощью исследований атмосферы.

Начиная с 1970-х годов в ИПГ были разработаны и внедрены в практику исследований атмосферы:

— резонансный лидар для зондирования мезосферного натрия с оптико-механической системой сканирования лазерного луча (о. Хейса);

— релеевский лидарный комплекс на НИС „Профессор Зубов” (Топаз-С);

— резонансный лидар на НИС „Профессор Визе”;

— резонансно-релеевский (двухчастотный) лидарный комплекс (о. Хейса);

— макет передвижного лидарного комплекса для локации искусственных образований в атмосфере;

— четырехлазерный лидар АЛИССА, установленный в модуле „Природа” космической станции „Мир” для исследований облученного покрова и атмосферы Земли.

При проведении лидарных исследований высоких слоев атмосферы Центральной Арктики в период 1975—1988 гг., а также лидарных исследований в акватории Атлантики с борто

ИИС „Профессор Зубов” и „Профессор Визе” в период 1985—1992 гг. получены следующие результаты:

— выявлены основные пространственно-временные вариации мезосферного натрия в полярной области;

— показана метеорная природа наблюдаемых двух максимумов в интегральном содержании натрия в зимний период;

— установлены широтные и сезонные вариации содержания натрия;

— с использованием мезосферного натрия как трассера установлены параметры гравитационных волн, показано, что их источником может быть перемещение циркумполярного вихря;

— выявлено аномальное поведение мезосферного натрия в айоне Бразильской геомагнитной аномалии;

— определены пространственно-временные характеристики в аспределении продуктов извержения вулканов Рукс (1985 г.) и Гинатубо (1991 г.) в стратосфере Атлантики;

— проведена экспериментальная и теоретическая проверка возможности лидарной локации искусственных облаков, создаваемых ракетами в термосфере при проведении экспериментов ктивного типа.

В период с 27 сентября 1996 г. по 4 июля 1999 г. было проведено более 50 сеансов лидарного зондирования системы Земля—атмосфера из космоса в ночных условиях с помощью лидара ЛИССА. Протяженность трасс зондирования в сеансах составляла от 2400 до 10 000 км.

Пространственное разрешение лидарных измерений составляло: по высоте — 150 м, вдоль трассы — 960 м, поперек трассы — 40 м. При частоте 50 импульсов в секунду все трассы наблюдались без пропусков. Всего было получено около 10 000 вышних профилей лидарных эхо-сигналов, отраженных облаками безоблачной атмосферой, и тысячи эхо-сигналов, отраженных дстиляющей поверхностью различного вида.

В Институте прикладной геофизики:

— проведены сбор, архивация и раскодирование полученной станции „Мир” телеметрической информации, привязка изменений по высоте и подспутниковым координатам зондирования, распечатка регистрограмм высотного хода лидарных эхо-сигналов в цифровом виде по каждому сеансу;

— разработаны методики и проводятся работы по первичной и статистической обработке полученных массивов лидарных измерений в интересах решения задач оптики атмосферы, метеорологии, прогнозов погоды и уточнения климатических расчетов.

Радиационная космофизика и создание гелиогеофизической службы

Началом работ ИПГ в области радиационной космофизики можно считать 1959 г.

В конце мая или в начале июня этого года институту было поручено разработать аппаратуру для измерения с ракет ионизирующих излучений при проведении высотных ядерных взрывов. Директор института Е. К. Федоров обратился с этой задачей к зав. отделом Р. М. Когану, а тот предложил поручить эти работы молодым инженерам: физику П. М. Свидскому и специалисту по электронике Н. К. Новожиловой, поскольку к этому времени большинство сотрудников, имевших большой опыт исследований радиоактивных следов ядерных взрывов, уже разъехались из Москвы для проведения летних экспедиционных работ на различных, как тогда было принято говорить, „объектах”, а поставленные сроки выполнения работы не позволяли откладывать ее до возвращения опытных сотрудников из экспедиций. Директор не смутился, что очень ответственное задание поручается молодым людям (и это вообще характерно для Е. К. Федорова), начинающим практически „с чистого листа”.

Исходная информация была очень ограниченной. Она сводилась к следующему. Ионизирующие излучения ядерного взрыва имеют „мгновенную” и „запаздывающую” компоненты. Мгновенное гамма-излучение возникает в момент деления ядер, и его длительность определяется временем протекания цепной реакции в веществе боеприпаса, зависящим, очевидно, от конструктивных параметров бомбы, нам совершенно неизвестных. Несколько проще была ситуация с запаздывающим гамма-излучением осколков деления, поскольку оно меньше зависит от конструкции „изделия”, так как регистрируется после разлета (и парения) этой конструкции.

Для получения консультации о временных характеристиках мгновенного гамма-излучения Е. К. Федоров направил сотрудников с соответствующим секретным предписанием во ВНИИОФИ. Однако директор этого института, мило побеседовав с ними, сказал, что не может дать такую информацию без специального разрешения из Министерства. В результате Е. К. Федоров предложил исходить из величины одна микросекунда плюс-минус по-рядок (и, как выяснилось позднее, оказался прав).

Другая сложность, также связанная с особой секретностью, возникла, когда нужно было разработать конструктивное оформление приборов для установки их на ракету, поскольку выданный для связи с военными офицер не мог дать соответствующей документации ни по конструкции, ни по климатике и т. д. (оходило до курьезов...

Позже (начиная с осени) к работам подключилась значительная большая группа сотрудников ИПГ, как специалистов по ядерному приборостроению и дозиметрии (М. В. Никифоров, I. К. Переяслова, М. Н. Назарова, И. Е. Петренко и др., молодые специалисты из МИФИ — А. Б. Малышев, С. И. Авдюшин), ак и имевших опыт ракетных исследований атмосферы (под руководством Г. И. Голышева — сотрудники отдела С. М. Полоско-а).

1. 1959—1961 гг. — разработка и изготовление оригинальной аппаратуры:

а) для установки на болванку головной части ракеты Р-12 полностью автономный комплекс с сохраняющимся при падении контейнером с записью результатов измерений);

б) для установки и проведения наблюдений на вертикальных ускорениях ракет Р-5 (в гораздо более комфортных условиях для работы аппаратуры: наличие герметизированных контейнеров, снабженных системой стабилизации, телеметрией для передачи данных и т. д.).

2. 1961—1962 гг. — проведение измерений, обработка данных, предварительный анализ результатов.

Как выяснилось позднее, решение о проведении этого цикла испытательных высотных взрывов было принято в ответ на американскую операцию „Аргус”.

Для представления о ней приведем цитаты из современного издания энциклопедии „Космонавтика” А. Железнякова: „Одной

из самых секретных операций, проведенных армией США во время реализации программы создания ракетно-ядерного оружия, стал эксперимент "Argus". Он был осуществлен в августе—сентябре 1958 года и та завеса секретности, которая окружала операцию, была сравнима разве что с подготовкой и проведением первого взрыва ядерной бомбы на полигоне Alamogordo (штат Нью-Мексико, США) 16 июля 1945 года.

Основной целью проводимого эксперимента являлись исследование действия поражающих факторов ядерного взрыва, произведенного в условиях космического пространства, на земные радиолокаторы, системы связи и электронную аппаратуру спутников и баллистических ракет. Кроме того, предполагалось изучить взаимодействие радиоактивных изотопов плутония, высвобождавшихся во время взрыва, с магнитным полем Земли".

О высотных испытательных взрывах, проводимых ИПГ, в энциклопедии „Космонавтика” А. Железнякова говорится следующее: „Серия испытаний получила в документах условное наименование операции „К” и была призвана исследовать влияние высотных ядерных взрывов на работу радиоэлектронных средств, том числе, а скорее в первую очередь, на работу средств системы противоракетной обороны (система „А”)... Первые два эксперимента были проведены 27 октября 1961 года („К1” и „К2”), три других — 22 октября, 28 октября и 1 ноября 1962 года („К3”, „К4” и „К5”). К этому времени США провели аналогичные испытания в районе атолла Джонстона в акватории Тихого океана, но о них я намерен рассказать в следующий раз... В каждом эксперименте производился последовательный пуск с ракетного полигона в Капустином Яре двух баллистических ракет Р-12, направленных в „центр обороны” системы „А” (полигон в Сары-Шагане), причем их головные части летели по одной и той же траектории одна за другой с некоторым запаздыванием друг от друга. Первая ракета была оснащена ядерным зарядом, который подорывался на заданной для данной операции высоте, а в головной части второй были размещены многочисленные датчики, призванные измерить параметры поражающего действия ядерного взрыва. Как я уже отметил, „основная партия” в эксперимента принадлежала системе ПРО и именно перед ней ставились основные задачи: обнаружить и сопровождать радиолокационными средствами вторую ракету (без ядерного заряда) и осуществить с

захват противоракетой „В-1000” (главный конструктор — етер Дмитриевич Грушин) в телеметрическом варианте (без боевой части).

Высота подрыва ядерных зарядов составляла: в операциях С1” и „К2” — 300 и 150 километров при мощности головной части в 1,2 килотонны. Высота подрыва ядерных зарядов в операциях „К3”, „К4”, „К5” — 300, 150, 80 километров соответственно при существенно больших мощностях зарядов, чем в первых двух операциях (300 килотонн).

Кроме системы „А” в эксперименте участвовали специально привлеченные технические средства, сосредоточенные вдоль трассы полета баллистических ракет, здесь же работали ионизирующие станции, производились запуски метеозондов и геофизических ракет. На всех радиоэлектронных средствах фиксировались нарушения их работы, вызванные ядерными взрывами”.

Информация об этих испытаниях до сих пор остается лишь секретной. Официальные документы о них не опубликованы и вероятнее всего еще долго останутся закрытыми.

Даты проведения испытаний удалось выяснить, воспользовавшись публикациями в американской серии "Nuclear Weaponsatabook Working Papers".

3. Вместе с получением прямых наблюдательных данных о характеристиках проникающих излучений высотных (космических) ядерных взрывов стали готовиться к реализации программы подготовки космической системы для контроля соблюдения соглашений (или мораториев) о прекращении ядерных испытаний в космосе. Возможность надежного контроля была одним из главных условий для заключения таких соглашений и активно суждалась, в частности, на международных переговорах в 58 г., когда советскую делегацию возглавлял Е. К. Федоров. этому туру переговоров рядом видных советских ученых (Л. Гинзбург, Я. Л. Альперт и др.) были подготовлены соображения и оценки по возможным методам обнаружения взрывов. Среди представленных делегацией материалов было и предложение Р. М. Когана о регистрации взрыва по мгновенному гамма-излучению с помощью системы из нескольких детекторов, расположенных по схеме совпадений.

4. Поскольку конечный результат работы системы контроля зависит от соотношения величин „полезного сигнала” и уровня

помех, уже в 1961 г. начали проработку вопросов об измерении таких характеристик космического фона радиационных потоков, которые важны при реализации конкретных методов обнаружения. В институте своими силами были разработаны и изготовлены (Ю. М. Кулагин, П. М. Свидский, С. И. Авдюшин) макетные образцы аппаратуры, которые были использованы для установки на первых пробных запусках спутников Днепропетровской серии. В частности, 21.12.1961 г. в 12 ч 30 мин UTC космодрома Капустин Яр, стартовый комплекс „Маяк-2”, был осуществлен пуск ракеты-носителя „Космос-63С1”, которая должна была вывести на околоземную орбиту советский спутник ДС-1, сер. № 2 (1961 1221F), с такой аппаратурой. Аппаратуру пуску подготовил С. И. Авдюшин. К сожалению, спутник на орбиту не вышел из-за аварии ракеты-носителя на 354-й секунде полета.

5. Далее в очень сжатые сроки был разработан и в промышленном исполнении (Оборонный завод на Украине, под Киевом) изготовлен уже достаточно совершенный комплекс бортовой аппаратуры для радиационных измерений на спутниках. Он включал систему сцинтилляционных и гейгеровских детекторов для измерения характеристик гамма-, рентгеновского и корпускулярного излучения. Часть детекторов была включена в схемы совпадений различной кратности. Регистрировались скорости счета совпадений и автономные скорости счета детекторов.

6. Комплекс был установлен на спутник, который должен был запустить к моменту проведения очередной операции „К”

7. 20.10.1962. В 4 ч 00 мин UTC с космодрома Капустин Яр стартовый комплекс „Маяк-2”, осуществлен пуск ракеты-носителя „Космос-63С1”, которая вывела на околоземную орбиту советский спутник „Космос-11” (00441/1962 Бета Тэта 1). Капитан ДС-А1, сер. № 1, выведен на орбиту с параметрами: наклон орбиты — 49°; период обращения — 96,1 мин; минимальное расстояние от поверхности Земли (в перигее) — 245 км; максимальное расстояние от поверхности Земли (в апогее) — 921 км.

Это был первый советский спутник с запоминающим устройством (ЗУ), рассчитанным на запись в течение 800 мин. К сожалению, при управлении этим спутником с наземного комплекса была подана команда на воспроизведение информации через достаточно большое время (всего один виток), а такая возмо-

ость не была отработана при создании ЗУ. В результате ЗУ не ключилось на последующую работу.

В мае следующего года был уже успешный запуск точно такого же спутника, который получил обозначение „Космос-17”. На эм были получены важные данные о величинах и микроструктуре потоков проникающих излучений, возникающих при взаимодействии энергичных космических лучей с веществом аппарата, данные о вариациях интенсивности ГКИ и частиц, захваченных в геомагнитную ловушку. В частности, получены величины потоков энергичных электронов, инжектированных при американском ядерном испытании „Старфип” 9 июля 1962 г.

Обстоятельства сложились так, что запуск и работа с материалами этого спутника послужили прологом к развитию в ИПГ нового направления по обеспечению пилотируемых космических полетов.

В начале июня 1963 г., практически сразу по возвращении группы сотрудников ИПГ (П. М. Свидский, М. Н. Назарова и Е. Петренко) с пуска ИСЗ „Космос-17” (запуск 22 мая 1963 г., высота 260—788 км, угол наклона орбиты 49°), по запросу Комиссии по исследованию и использованию космического пространства им было поручено оценить радиационные условия на массах пилотируемых КА „Восток”. Работа велась под руководством зав. отделом ИПГ канд. техн. наук Р. М. Когана, использовались данные измерений потоков ионизирующих излучений йгеровскими и сцинтилляционными счетчиками в составе аппаратуры ИПГ на спутнике „Космос-17”.

Как выяснилось позже, полученная оценка (15 миллид/сутки) оказалась близкой к значениям, зарегистрированным портвыми дозиметрами в последовавших вскоре космических полетах В. Быковского и В. Терешковой (старты 14 и 16 июня 1963 г. соответственно).

Это был первый опыт ИПГ по радиационному обеспечению пилотируемых космических полетов, послуживший прологом к официально оформленной лишь через 10 лет (в 1973 г.) Службе контроля и прогноза радиационной обстановки в ОКП. Он позволил определить и опробовать некоторые подходы и принципы, реализованные затем в Службе.

„Космос-17” был одним из первых спутников, оснащенных автономным ЗУ (на 800 мин) с достаточной емкостью. Это

позволило получить с необходимой детальностью практически глобальную структуру поля потоков на высоте полета, а затем рассчитать с ее использованием требующиеся дозовые характеристики.

Следующий важный этап в изучении вариаций проникающих излучений в ближнем космосе и их связи с другими проявлениями магнитосферной активности относится к периоду 1964—1966 гг. На базе идей, заложенных в приборы на спутниках „Космос-11” и „Космос-17”, в СНИИПе, одной из наиболее квалифицированных приборостроительных организаций Главного космического управления, по заданиям ИППГ и с участием его сотрудников был разработан бортовой аппаратурный радиометрический комплекс на базе более совершенной элементной базы и с более широким набором сцинтилляционных детекторов. Это обеспечивало получение более детализированной информации о составе излучений.

02.07.1965. В 04 ч 08 мин UTC с космодрома Капустин Яр стартовый комплекс № 86/1, осуществлен пуск ракеты-носителя „Космос-63С1”, которая вывела на околоземную орбиту советский малый научный спутник „Космос-70” (01431/1965 052А) КА типа ДС-А1, сер. № 7, выведен на орбиту с параметрами: вклонение орбиты — $48,8^\circ$; период обращения — 98,43 мин; минимальное расстояние от поверхности Земли (в перигее) — 229 км; максимальное расстояние от поверхности Земли (в апогее) — 1154 км.

Наблюдения на этом спутнике подтвердили и уточнили основные результаты по составу, структуре и вариациям проникающих излучений, полученные на ИСЗ „Космос-11” и „Космос-17”. Были измерены также эффекты возникновения и развития активности в веществе космического аппарата при полете в области больших потоков энергичных протонов внутри радиационного пояса.

Полученные результаты и накопленный опыт, с одной стороны, и развитие международных отношений с целью разрядки международной напряженности — с другой, позволили сформулировать новые мирные инициативы по созданию регулярной службы радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве для обеспечения космических полетов, и Е. К. Федоров, возглавивший к тому времени Гидрометслужбу страны, выступал с таким предложением. Эта инициатива, однако, не встретила должного

нимания и поддержки у „космических академиков“; возможно, определенную роль при этом сыграли и конъюнктурные соображения.

„Ну и шут с ними, — сказал Е. К. Федоров. — Вот сейчас ведется подготовка первого спутника для создаваемой Космической метеорологической системы. Сумеете быстро разработать комплекс бортовой аппаратуры, обеспечивающей регулярные непрерывные измерения необходимых параметров радиационной обстановки, провести наблюдения и оперативную обработку данных, тогда разговор будет другим“.

И все было подготовлено, так что на первом же спутнике „Мегеор-1“ № 1 (запущен 26 марта 1969 г., высота 630—713 км, угол наклона орбиты 82°) начал работать радиометрический комплекс РМК. Созданный на основе идей и опыта прежних разработок, он по ряду параметров соответствовал или даже превосходил мировой уровень для того времени. Широкий набор детекторов, включавший гейгеровские и сцинтилляционные счетчики разных размеров, с различной экранировкой и с соответствующим выбором порогов дискриминации выходных сигналов, был рассчитан на получение суммарных и отдельных данных о потоках энергичных электронов и протонов, проникающих за определенные значения защиты — от $4 \cdot 10^{-2}$ г/см² и до нескольких г/см² и более; соответствующие пороговые энергии выбирались по протонам — 5, 15, 25 и 40 МэВ (по электронам это 150 и 500 кэВ, 1,6 и 3,1 МэВ), а также 65 МэВ и в энергетическом окне 30—80 МэВ. Необходимый широкий динамический диапазон регистрируемых плотностей потоков достигался за счет различия геометрических факторов детекторов излучений и применения электронной цифровой квазилогарифмической системы регистрации скоростей счета импульсов. Оригинальная бортовая автоматическая регистрирующая система (БАРС), включающая электронные жемы с цифровой регистрацией и сжатием информации и запоминающее устройство с емкостью на 800 мин, создавалась в сотрудничестве с коллективом талантливых разработчиков лаборатории В. О. Вяземского в ЛЭТИ (после трагической гибели Вяземского в 1984 г. лабораторию возглавил С. С. Соколов).

Цифровая форма бортовой регистрации и передачи данных по телеметрии позволила быстро ввести в действие систему опера-

тивной обработки на ЭВМ (тогда это была „Минск-26”) принимаемой с ИСЗ информации.

Первые же результаты наблюдений показали удачность как выбора космической платформы, так и разработанной аппаратуры для мониторинга радиационных условий в ОКП. Уже через четыре дня после запуска, 30 марта 1969 г., была зарегистрирована вспышка солнечных космических лучей, а 11 апреля — еще одно вторжение в магнитосферу Земли потоков энергичных протонов от хромосферной вспышки 10 апреля, продолжавшееся более 10 дней, причем интенсивность в максимуме в тысячи раз превышала обычный фоновый уровень и достигала $10^4 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ для протонов с энергией более 5 МэВ.

14 октября 1970 г. удалось зарегистрировать повышенные потоки гамма-излучения при прохождении спутника над территорией Китая, интерпретировать их как излучение радиоактивного облака проведенного там приземного ядерного взрыва, оценить характеристики облака и его движения.

Были также получены новые данные о динамике потоков электронов и протонов радиационных поясов Земли.

Оперативно обрабатываемая космическая радиационная информация („штормовая” — сразу после приема данного витка и „глобальная” — в форме суточной карты изолиний потока на орбите ИСЗ) предоставлялась руководящим органам космической отрасли, в том числе руководителям в те времена сравнительно краткосрочных полетов пилотируемых кораблей „Союз”, начиная с № 9. Поэтому, когда Е. К. Федоров повторно, в 1973 г., обратился в ВПК с предложением о создании при ГУГМС Службы радиационной обстановки в космосе, это предложение получило поддержку. Было дано поручение подготовить соответствующее решение Совета Министров СССР. При согласовании материалов к этому решению от Президента АН СССР М. В. Келдыша, который считал, что Академии следует вести только фундаментальные исследования*, поступило предложение передать в ГУГМС из АН действовавшую там Ионосферно-магнитную службу (в ИЗМИРАНе)

*Заметим, что эта точка зрения послужила формальным основанием для вывода ИПГ в 1963 г. из состава АН, поскольку в его названии имелось слово „прикладной”.

Как результат межведомственных согласований Постановление Совета Министров СССР от 12 ноября 1973 г. предусматривало сосредоточение в ГУГМС работ по обеспечению заинтересованных ведомств и других потребителей оперативной информацией и прогнозами состояния верхней атмосферы и космоса, организацию с этой целью Службы контроля и прогноза радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве и передачу в ГУГМС Ионосферно-магнитной службы*.

Головной организацией этих служб был определен Институт прикладной геофизики, на который были возложены функции Главного прогностического центра в национальном масштабе и представителя страны в Международной службе космической погоды (ранее URSIGRAM, в настоящее время International Space Environment Service—ISES) в качестве Регионального центра предупреждений RWC Moscow. Внутри страны получение необходимых для службы оперативных наблюдательных данных базируется на измерениях потоков излучений в ОКП на спутниках Государственной метеорологической космической системы Метеор” и на сборе данных с наземных солнечных, ионосферных и магнитных станций с использованием АСПД „Погода”.

С целью улучшения обслуживания потребителей в отдаленных районах с учетом их специфики дополнительно были организованы четыре Региональных центра службы (в Мурманске, Новосибирске, Хабаровске и Ташкенте).

Наряду с функциями по выдаче потребителям регулярной информации Институт активно вел новые разработки, а также координировал и поддерживал работу других ведомств, обеспечивая наблюдательными данными, совершенствуя и развивая методы контроля и прогноза космической погоды. В результате же к концу 1970-х годов была разработана прогрессивная концепция построения и развития действовавших служб как единой геофизической службы, которая должна включать в себя несколько подсистем для контроля и прогноза отдельных явлений, формирующих космическую погоду, с учетом их специфики взаимосвязи:

*Кроме того, по предложению Минздрава с целью радиационно-медицинского обеспечения космических полетов в Институте медико-биологических проблем организовывалась Служба радиационной безопасности экипажей ПКК.

- солнечной активности, состояния межпланетной среды магнитосферы,
- ионосферы и распространения радиоволн,
- нейтральной верхней атмосферы,
- радиационной обстановки в ОКП.

Единая наблюдательная сеть, средства сбора, обработки и ведения информации до потребителей строятся из условия обеспечения работы указанных подсистем.

Были начаты работы по реализации концепции, выполнен ряд методических разработок. Полученные результаты соответствовали самому передовому уровню и были признаны за рубежом, однако в 1990-е годы работы по развитию основных систем службы были фактически заморожены.

Разработанная тогда концепция в основных чертах сохраняет актуальность и по сей день. Прежде всего это относится к необходимой наблюдательной сети, включающей наземный и многоярусный космический сегмент, охватывающий измерения с ИС на малых высотах, геостационарной орбите, а также солнечно-межпланетный мониторинг с гелиоцентрических КА (активно осуществляется в последние годы на Западе).

Солнце, погода и климат: сегодняшний взгляд на проблему

Проблема влияния солнечной активности на состояние тропосферы, т. е. на погоду и климат, интересует метеорологов и геофизиков в течение уже почти столетия. Причины такого интереса очевидны. Важность изучения и прогнозирования погоды и климата трудно переоценить. Уже очень давно известно, что солнечная активность сильно изменяется (число солнечных пятен изменяется от 0 до 200 и более) и имеет хорошо выраженную 11-летнюю периодичность. Состояние же земной атмосферы целиком определяется притоком солнечного излучения. Таким образом, напрашивается очевидный, на первый взгляд, вывод: погоде и климате должны проявляться хорошо выраженные эффекты солнечной активности, учет которых должен существенно улучшить метеорологические прогнозы.

Однако проблема далеко не так проста и вызвала немало споров. Более того, многие специалисты отрицали существование

заметного отклика солнечной активности в поведении тропосферы, поскольку нет очевидных механизмов влияния изменчивой части солнечного излучения на нижние слои атмосферы. Лишь в последнее десятилетие появились принципиально новые взгляды на проблему, основанные как на новых физических механизмах взаимосвязи атмосферных слоев, так и на новых подходах к анализу экспериментальных данных, т. е. к выделению указанного отклика на фоне многочисленных вариаций метеорологических параметров.

Краткий исторический экскурс

Именно на выводе о неизбежном влиянии солнечной активности на погоду и климат была основана позиция многих исследователей, которые еще в 1920—1930-е годы утверждали, что все процессы на Земле (и прежде всего погода и климат) контролируются солнечной активностью.

Упомянем лишь одно имя, интересное прежде всего для российского читателя. Речь идет о А. Л. Чижевском и его монографии „Земное эхо солнечных бурь”. Она являет собой прекрасный пример подхода к проблеме солнечно-атмосферных связей (а также влияния солнечной активности на различные явления в биосфере Земли и в человеческом обществе), характерного для 1920—1930-х годов.

В ней приводится большое число сопоставлений самых различных явлений метеорологического и биологического характера с солнечной активностью. В качестве индикатора солнечной активности неизменно выступает число солнечных пятен R . Что же касается сопоставляемых с R явлений, то они весьма разнообразны и разнородны, например: число бурь на оз. Байкал, время прилета жаворонков в Курской губернии, число вспышек холеры в Индии. При этом выбор параметров нигде не аргументируется. Почему, например, в Курской, а не в Ярославской губернии? Почему на Байкале, а не, скажем, на Онежском озере или на Иссык-Куле?

Нигде не приводится никаких статистических оценок получаемых выводов. Такие понятия, как доверительный интервал, уровень надежности и т. д., без которых не обходится ни одно со-

поставление данных в современной геофизике, здесь полностью отсутствуют. Наличие связи тех или иных явлений с солнечной активностью постулируется на основании схожести кривых изменения со временем величины K (индекса возмущенности магнитного поля Земли) и рассматриваемого параметра.

Наконец, приводится много весьма общих рассуждений о влиянии Солнца на жизнь на Земле. Эти рассуждения сегодня не представляют серьезной ценности, поскольку основываются не тогдашних представлениях о физике Солнца и околоземного космического пространства. Понятия, без использования которых сегодня просто невозможно вести серьезный разговор о солнечно-земных связях, такие как солнечный ветер, межпланетное магнитное поле, магнитосфера, радиационные пояса, выбрось корональной материи и многие другие, в то время просто не были известны.

Эта монография не стоила бы столь подробного разбора, если бы в последнее время и сама книга и имя ее автора не упоминались в нашей стране неоправданно часто в связи с проблемой солнечно-земных связей, причем без какого-либо серьезного анализа того, что и на основании каких данных утверждал автор.

По мере развития космических исследований в 1960-е и 1970-е годы многие исследователи возвращались к проблеме солнечно-погодных связей. Во второй половине 1970-х годов, когда основные современные представления о физике солнечной системы уже сформировались, специалисты разделились на „верующих” и „неверующих”. К первым относились те, кому удалось найти значимые корреляции между параметрами солнечной активности и характеристиками тропосферы, ко вторым — те, кто таких корреляций не нашли. К последним относилось подавляющее большинство метеорологов, поскольку при анализе длинных рядов метеорологических данных „в лоб” (т. е. путем сопоставления индексов солнечной активности и метеопараметров за каждый год) выявить отклик тропосферы на изменения солнечной активности не удавалось. А раз так, то и все рассуждения о значительном влиянии солнечной активности на погоду и климат повисали в воздухе.

Существенным прорывом в проблеме солнечно-атмосферных связей явилась серия работ группы К. Лабичке, в которых было показано, что отклик атмосферы (как в стратосфере, так и в тро

посфере) на вариации солнечной активности становится сильным и статистически значимым, если учитывать эффект так называемых квазидвухлетних вариаций. Дальнейшие исследования указанной группы привели к уточнению реакции атмосферы на изменения солнечной активности (см. ниже).

За два последних десятилетия существенно уточнились наши знания о распределении энергии по спектру солнечного излучения и о зависимости разных областей этого спектра от солнечной активности. Появились данные и об очень долговременных (несколько веков) вариациях солнечного излучения, отклик на которые может быть найден в столь же долговременных вариациях атмосферных характеристик.

Все это позволяет сегодня по-новому взглянуть на проблему влияния Солнца на погоду и климат. Далее для краткости мы будем называть ее проблемой Солнце—погода, помня, что речь идет о влиянии именно солнечной активности на кратковременные (погода) и долговременные (климат) вариации в тропосфере. Прежде чем переходить к современному взгляду на эту проблему, сформулируем основные трудности, которые возникают при ее решении.

Принципиальная постановка проблемы

При кажущейся очевидности влияния Солнца на погоду существуют две принципиальные трудности. Первая — общий поток солнечной энергии, приходящей к Земле, практически постоянен. В околоземное пространство от Солнца приходит около 10^{12} МВт энергии, при этом изменчивая часть составляет меньше миллионной части от этого значения. В этих оценках учитывается приток энергии и за счет волнового излучения и за счет корпускул (которые представляют собой наиболее изменчивый агент), но все же видно, что изменения (с солнечной активностью) затрагивают лишь очень малую часть общего притока энергии.

К такому же выводу ведут и сопоставления общего потока волновой энергии, приходящей от Солнца (так называемой солнечной постоянной S). Уже первое десятилетие спутниковых патрульных наблюдений солнечной радиации показало, что солнечная постоянная действительно постоянна с большой сте-

пенью точности. Между величинами S , измеренными на спутниках серии „Нимбус” в 1978 г. (максимум активности) и 1984 г. (близко к минимуму солнечного цикла), разница оказалась около 2 Вт/м^2 при средней величине S за этот период около 1376 Вт/м^2 .

В этом и состоит первая трудность проблемы солнечно-погодных связей — приток энергии от Солнца постоянен с высокой степенью точности. Как видно из приведенных выше цифр, изменения от минимума к максимуму солнечной активности в современных циклах составляют около 0,15 %. В таком случае не ясно, как такие небольшие изменения могут существенно влиять на изменения тропосферных характеристик. Более того, энергия, приходящаяся на изменчивую часть солнечного спектра, очень мала и по сравнению со средней энергией атмосферных образований (скажем, одного циклона). Известно, что примерно треть приходящей солнечной энергии поглощается либо поверхностью земли (и переизлучается в виде инфракрасного излучения, поглощаемого атмосферой), либо непосредственно атмосферой. Таким образом, энергия, участвующая в метеорологических процессах и идущая на формирование метеорологических образований, лишь немногим меньше всего притока солнечной энергии, тогда как энергия, заключенная в изменчивой части солнечного спектра, составляет лишь ничтожную долю последней (например, вся ультрафиолетовая радиация с длиной волны менее 300 нм несет энергии около 1 % от S).

Вторая трудность рассматриваемой проблемы состоит в том, что даже эта небольшая доля общего потока солнечной энергии, приходящей к Земле, не доходит ни до поверхности земли, ни до тропосферы, а поглощается в основном даже выше стратосферы — в мезосфере и нижней термосфере. Это в равной мере справедливо и для волновой (ультрафиолет, рентген), и для корпускулярной (электроны радиационных поясов, солнечные протоны) радиации Солнца. Следовательно, если влияние солнечной активности на погоду существует, то должен существовать какой-то механизм передачи воздействия коротковолнового и корпускулярного излучения на мезосферу и термосферу вниз в тропосферу. Очевидных механизмов такой передачи нет.

Вариации солнечного излучения

При детальном анализе ежедневных наблюдений полного потока солнечного излучения были обнаружены кратковременные (несколько недель) уменьшения S , превышающие систематические вариации в солнечном цикле и достигающие 3 Вт/м^2 . Эти уменьшения связывают в первом приближении с увеличением числа солнечных пятен на диске и с прохождением активных областей. Однако прежде всего важно, что такая изменчивость S существует, ибо она может играть роль в солнечно-погодных (т. е. достаточно краткосрочных) связях.

Принципиально новые возможности рассмотрения проблемы влияния Солнца на климат открывает реконструкция прошлых циклов солнечной активности. Солнечную постоянную удалось восстановить с 1610 г. до настоящего времени. При этом было обнаружено, что до 1800 г. наблюдалась очень хорошая корреляция изменения S с температурными аномалиями в северном полушарии ($k = 0,86$). Это означает, что практически все отклонения температуры были в тот период связаны с изменениями солнечного излучения. Для более позднего периода (1800—2000 гг.) получен несколько меньший коэффициент корреляции (0,73), что может быть связано с индустриальным воздействием на атмосферу, происходящим в XX в.

Проекстраполировав связь S и приповерхностной температуры, найденную в доиндустриальную эру (до 1860 г.), получили, что половина наблюдаемого роста T в $0,55^\circ\text{C}$ в последующий период времени могла бы быть отнесена за счет роста S . Однако $0,36^\circ\text{C}$ из этого роста приходится на период после 1970 г. Для того периода указанная выше связь S и T может объяснить лишь одну треть ($0,11^\circ\text{C}$) наблюдаемого увеличения T , следовательно, оставшиеся две трети должны быть отнесены за счет антропогенных эффектов.

Анализ частоты явления Эль-Ниньо с 1700 по 1985 г. показал, что наиболее ярко выраженные явления наблюдались в периоды аномальной солнечной активности и что 63 % из них происходили на фазе спада солнечного цикла. Учитывая, что Эль-Ниньо влияет на климат практически в глобальном масштабе,

полученные выводы свидетельствуют о связи климата с солнечной активностью.

Таким образом, работы последнего десятилетия показывают, что на больших временных интервалах (более 100 лет) наблюдается связь климатических параметров с циклами солнечной активности.

Следует отметить работы, где сделана попытка проследить связь климата с магнитным моментом Земли в течение последних 12 тыс. лет. Поскольку такая связь обнаружена и поскольку магнитный момент должен быть связан с изменением других параметров космической погоды, можно полагать, что и на больших временных интервалах климат был связан с солнечной активностью.

Поиски корреляций

Как уже указывалось выше, поиски вариаций метеорологических параметров в зависимости от солнечной активности долгое время были безуспешными. Существенным прорывом в эти исследования явилась серия работ группы Лабицке. В этих работах было показано, что отклик атмосферных параметров на изменение солнечной активности становится хорошо выраженным, если рассматриваются отдельно годы различных фаз квазидвулетних вариаций (КДВ).

При разбиении всего массива лет на годы разных фаз КДВ для зимнего периода почти всегда появляется значимая корреляция индексами солнечной активности R или F (10,7), причем эта корреляция может быть как положительной, так и отрицательной.

Весьма важно, что был получен такой же результат для приземного давления и температуры на ряде станций американского региона. При рассмотрении всех лет наблюдений корреляции между метеопараметрами и солнечными индексами отсутствовала. При разделении же всех данных по фазам КДВ получалась значимая корреляция для обоих массивов. В данном случае уж речь идет о прямой связи солнечной активности с климатом данных пунктов, поскольку для анализа брались среднемесячные значения приземного давления и температуры и именно для них были найдены значимые корреляции с R . Анализ данны

показал, что в летний период вариации давления в стратосфере объясняются в основном вариациями солнечной активности. В зимний период 11-летние вариации моделируются вариациями, связанными с фазами КДВ.

Такая же картина получена и для вариаций температуры в стратосфере. Таким образом, и температура и давление в стратосфере летом имеют тенденцию быть выше в периоды максимумов солнечной активности и ниже в периоды минимумов.

В свою очередь, между вариациями стратосферных параметров (например, h (30)) и температурой в различных слоях тропосферы также получена хорошо выраженная корреляция.

Таким образом, в результате десятилетней серии работ Таблицке и ее группы было показано, что связь параметров тропосферы (температуры и давления) с солнечной активностью существует, но носит сложный пространственный и временной характер. Именно поэтому попытки найти корреляции метеорологических параметров „в лоб” в течение многих десятилетий заканчивались неудачами.

Солнечное коротковолновое излучение и магнитная активность — это два основных фактора, которые изменяются при изменении солнечной активности. Но если указанное излучение не достигает поверхности и необходимо искать специальные (триггерные) механизмы его влияния на нижнюю атмосферу, то проявления магнитной активности могут непосредственно влиять на явления в тропосфере.

Известно, что верхняя атмосфера демонстрирует хорошо выраженную реакцию на геомагнитные бури. Эта реакция весьма разнообразна и вызвана двумя принципиальными процессами: высыпанием корпускул и усилением токов в ионосфере. В нижней стратосфере и тропосфере также наблюдается отклик на геомагнитные возмущения. Однако этот отклик не так хорошо выражен, как, скажем, в области F2 ионосферы, и обусловлен совсем другими процессами (см. ниже).

В ранних исследованиях была обнаружена связь с геомагнитными бурями развития зимнего понижения давления на уровне 00 гПа в североамериканской и североатлантической зонах. Изменение приземного давления в европейском и сибирском секторах после сильных спорадических магнитных бурь было обнаружено в серии работ группы Мустеля. Эти области, как было по-

казано, являются наиболее чувствительными к солнечному и геомагнитному влиянию зонами в северном полушарии.

Были обнаружены понижение в результате магнитных бурь приземного давления в Северной Атлантике, углубление исландской депрессии, усиление зональной циркуляции на уровне 500 гПа и соответствующие изменения температуры в Северной Атлантике и Европе. При этом соответствующие эффекты были лучше выражены зимой, чем летом.

В работах группы Буха по выделению влияния геомагнитных бурь на приземную температуру в различных областях северного полушария, как в средних, так и в высоких широтах, было показано, что это влияние может отличаться даже по знаку из-за изменения полей давления и циркуляции. Позже этой же группой были получены результаты для полей ветра в тропосфере, при чем эффект также зависел от фазы КДВ и был лучше выражен в зимний период. Следует, однако, подчеркнуть, что отклонения поля ветра от средних значений получились существенно различными для низкой и высокой геомагнитной активности, хотя региональный характер этих отклонений сохранялся.

Были сформулированы три особенности реакции тропосферы на геомагнитные бури.

1. Тропосферные эффекты носят макрорегиональный характер; причиной этого является, видимо, важная роль изменения циркуляции и орографии. Наиболее „магниточувствительными“ областями являются Северная Атлантика и Европа, с одной стороны, и сибирско-алеутская область — с другой.

2. Реакция тропосферы на магнитные бури гораздо лучше выражена в зимний период, чем в летний. Это связано, видимо, тем, что зимой меньше прямой приток солнечной энергии в тропосферу, и со стабильностью атмосферы.

3. Реакция тропосферы в зимний период существенно зависит от фазы КДВ.

Поскольку неоднократно высказывались предположения, что в передаче влияния солнечной активности на погоду и климат может важную роль играть стратосферный озон, связь последнего с магнитной активностью исследовалась особенно тщательно

СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ РАБОТ ПО МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

В 1950—1960-х годах XX в. антропогенное воздействие на природную среду достигло значительного уровня. Резко возросло загрязнение природных сред, в первую очередь атмосферного воздуха, поверхностных вод.

При планировании и осуществлении хозяйственной деятельности в период интенсивного индустриального развития общества учет гидрометеорологических характеристик, определяющих перенос загрязняющих веществ в атмосфере, гидросфере и миграцию их в почве, приобретает особое значение. Яркие выраженные негативные последствия привели к тому, что в 1970-х годах была признана объективная необходимость создания непрерывно действующей информационно-измерительной службы наблюдений, оценки и прогнозирования (мониторинга) происходящих изменений в состоянии природной среды и в загрязнении атмосферного воздуха, поверхностных вод и почвы в результате возрастающих техногенных нагрузок (хотя ряд наблюдений такого характера существовал и ранее). С 1970-х годов и по настоящее время данные именно этой службы являются основой для оценки влияния загрязнения на здоровье населения и состояние флоры, регулирования и ограничения неблагоприятных воздействий от конкретных источников.

Исторически, как за рубежом, так и в СССР, это реализовывалось в первую очередь в целях оценки неблагоприятных последствий испытаний ядерного оружия. В 1950—1960-е годы эти задачи решались путем привлечения учреждений и организаций гидрометслужбы и Академии наук СССР к выполнению специальных научно-исследовательских работ по конкретным направлениям, объектам или территориям. Повышению эффективности работ способствовало создание в 1955 г. по инициативе академика И. В. Курчатова, М. А. Садовского и Е. К. Федорова Института прикладной геофизики (ИПГ) АН СССР (первым директором стал академик Е. К. Федоров, затем Ю. А. Израэль). Основное направление этого института приступило к указанным работам с 1953 г., на полигонах страны — с 1959 г.

Постановлением Совета Министров СССР от 4 февраля 1961 г. № 103-41 в Гидрометслужбе была создана Общегосударственная радиометрическая служба наблюдений и информации. Основной задачей этой службы являлась оценка радиационно-обстановки на всей территории страны и радиоактивного загрязнения окружающей природной среды за счет глобального распространения продуктов ядерных взрывов, производившихся в отечественных и зарубежных полигонах.

Во исполнение этого постановления в центральном аппарате ГУГМС было сформировано специальное структурное подразделение — 2-й отдел под руководством Н. К. Гасилиной (с 1963 г.)

На большинстве метеорологических станций были установлены рентгенометрические приборы типа „Спутник” и ДПП-5 для измерения мощности дозы гамма-излучения в весьма широком диапазоне: от фоновых значений (3—10 мкР/ч) до десятков Р/ч. Эти приборы способны измерять и потоки бета-излучения.

Приборы предназначались для измерений в случае повышения уровня гамма-излучения в любых нестандартных ситуациях (атомные аварии, распространение радиоактивного облака при испытаниях ядерного оружия, в случае ядерного конфликта). Эти приборы сыграли исключительно важную роль после аварии на Чернобыльской АЭС.

Кроме этого, на многих метеостанциях регулярно выставлялись планшеты для сбора глобальных и локальных радиоактивных выпадений. Планшеты пересылались в лаборатории для определения суммарной радиоактивности, спектрометрической и радиохимического анализов. Кроме того, в 70 городах стран были установлены воздуходувки с целью отбора проб из большого объема воздуха на фильтры с последующим их анализом для определения концентрации радиоактивных продуктов в приземном слое атмосферы.

Кроме описанной широкой сети наблюдений, была создана функционировала специализированная система измерения радиоактивного загрязнения — система авиационной разведки радиоактивности в природных средах, главным образом для гамма-съемки радиоактивного загрязнения местности. Определяющий вклад в развитие этой системы внес Институт прикладной геофизики, носящий имя его основателя — академика Е. К. Форова.

Институт прикладной геофизики осуществлял с помощью летных лабораторий (до 6 самолетов различного типа) исследования и регулярные измерения радиоактивного загрязнения (включая аэрозольную составляющую) в атмосфере, гамма-съемку местности на атомных полигонах страны и за их пределами. Эти работы на полигонах осуществлялись совместно со специалистами Министерства обороны. Институт проводил также наземные измерения радиоактивности.

При переходе ИПГ в состав Гидрометеорологической службы директор института Е. К. Федоров в 1963 г. был вновь назначен начальником Главного управления гидрометслужбы при Совете Министров СССР — ГУГМС) функции головной организации в осуществлении радиационного мониторинга за ним сохранились (впоследствии к этой работе присоединилась Лаборатория мониторинга природной среды и климата Госкомгидромета и АН СССР (директор Ю. А. Израэль), на базе которой в 1990 г. был организован Институт глобального климата и экологии (также войного подчинения)). Институтом была проведена гамма-съемка большинства следов радиоактивных облаков, образовавшихся при наземных ядерных взрывах (когда формируется наибольшее загрязнение местности), от многих взрывов в атмосфере. Работы проводились в сложных условиях высоких полей радиоактивных лучений. За эти работы несколько десятков сотрудников института были удостоены правительственных наград.

Кроме этих институтов, радиационным мониторингом (сбором и интерпретацией данных с метеорологической сети) занимался Институт экспериментальной метеорологии ГУГМС (впоследствии НПО „Тайфун“, директор Г. А. Середа, затем Ю. С. Семенов). Регулярно выпускались сборники с результатами измерений. Измерения радиоактивности на больших расстояниях от источников загрязнения проводились также на судах Гидрометслужбы и других ведомств в Атлантическом и Тихом океанах.

В 1960-х—начале 1970-х годов ИПГ осуществил самолетную гамма-съемку глобального загрязнения всей территории Советского Союза. Было установлено, что средний „запас“ накопленного на территории долгоживущего радионуклида цезия-137 (период полураспада около 30 лет) составляет около 0,1 Ки/км

(максимальные значения до 0,3—0,4 Ки/км), а стронция-90 (период полураспада 28 лет) в 1,85 раза меньше (около 0,06 Ки/км)

Институт прикладной геофизики провел большую работу по оперативному измерению радиоактивного загрязнения атмосферы, местности и вод рек после аварий на атомном предприятии „Маяк” в 1957 и 1967 гг. Измерения стронция-90 на местностях осуществлялись рядом организаций, в том числе Институтом глобального климата и экологии, преемником ИПГ в этой проблеме, и в последующие годы. По результатам этих измерений построены детальные карты радиоактивного загрязнения местности Уральского региона.

Большим испытанием для всей системы Госкомгидромет для ее работников, а особенно для системы радиационного мониторинга явилась тяжелая авария на Чернобыльской атомной электростанции.

Радиационный мониторинг после чернобыльской аварии

26 апреля 1986 г. после получения информации от Советом Министров УССР об аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) первая группа специалистов Укргидромета (Г. Г. Потуридис) на вертолете утром 26 апреля провела обследование обстановки в районах, прилегающих к АЭС, о результатах которого в 11 ч было доложено по телефону, в 13 ч — письменно, по прибытии в СССР. 27 и 28 апреля на специальном самолете радиационной разведки АН-30Рр Госкомгидромета (В. Н. Петров и А. Б. Иванов) была проведена аэрогамма-съемка над ЧАЭС и отобраны пробы аэрозолей из атмосферного воздуха над поврежденным реактором. Все гидрометстанции (оснащенные рентгенометрическими приборами „Спутник” и ДПП-5), расположенные на территориях Киевской и Гомельской областей, со второй половины дня 26 апреля 1986 г. стали осуществлять ежечасное измерение мощностей доз гамма-излучения, а с 27 апреля в такой режим работы включились практически все метеостанции, расположенные на европейской части СССР.

Первый письменный доклад Госкомгидромета СССР о радиационной обстановке на территории, прилегающей к ЧАЭС, и территориях переноса загрязненных воздушных масс был представлен в ЦК КПСС и Совет Министров СССР 27 апреля 1986 г.

На своем первом заседании 29 апреля 1986 г. Оперативная группа Политбюро ЦК КПСС по вопросам, связанным с ликвидацией последствий аварии на Чернобыльской АЭС, заслушав доклад председателя Госкомгидромета о радиационной обстановке в районе аварии, приняла решение: „Принять к сведению сообщение т. Израэля по этому вопросу. Обязать т. Израэля организовать четкую и достоверную информацию об уровнях радиации на отдельных территориях, немедленно вылететь в район аварии для принятия практических мер”. Сразу после этого заседания, 29 апреля, Ю. А. Израэль вылетел в Чернобыль, где оставался последние дни апреля и практически весь май.

С этого дня в течение нескольких недель в Госкомгидромете функционировали два „штаба”: один — в Чернобыле во главе с Ю. А. Израэлем, второй — в Москве во главе с его первым заместителем Ю. С. Седуновым. Из этих штабов и шла основная информация к руководству и на места о радиационной обстановке в зоне аварии. В качестве ответственных по территории Белоруссии были командированы заместитель председателя Госкомгидромета В. Г. Соколовский, по территории России — заместитель председателя Госкомгидромета А. Н. Чилингаров и директор Института прикладной геофизики С. И. Авдюшин.

Позже для объединения усилий специалистов различных министерств, ведомств (Госкомгидромета СССР, Минздрава СССР, Минатома СССР, Минобороны СССР, Академий наук СССР, УССР, БССР и др.), выполнявших работы по контролю радиационной обстановки непосредственно в районе ЧАЭС, решением Правительственной комиссии от 13.06.86 г. в г. Чернобыле была образована Оперативная межведомственная группа по оценке радиационной обстановки. Ее деятельность возглавили представители Госкомгидромета СССР (в июне—декабре 1986 г. Е. Д. Стуксин, В. В. Челюканов, Ю. С. Цатуров, С. И. Авдюшин, А. А. Шевцов).

С 30 апреля доклады о радиационной обстановке для решения первоочередных задач по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС представлялись ежедневно Госкомгидрометом СССР в Совет Министров СССР. Информация о радиационной обстановке на территории Украинской ССР стала представляться Укргидрометом систематически в ЦК КПУ, Совет Министров УССР, Верховный Совет УССР, КГБ УССР с 28 апреля 1986 г. Данные о ра-

радиационной обстановке в г. Киеве передавались ежедневно в указанные адреса начиная с 30 апреля — с момента повышения уровней радиации в Киеве (в этот день здесь были зарегистрированы средние уровни в 1,4 мР/ч, максимальный уровень радиации — 2,2 мР/ч — отмечался на проспекте Науки; 7 мая — 0,7 мР/ч, 15 мая — 0,2 мР/ч). Аналогично осуществлялось Белгидрометом информирование партийных и советских органов республики о радиационной обстановке на территории Белорусской ССР. Обобщенные данные по территории РСФСР систематически стали представляться в Совет Министров РСФСР начиная с 9 мая 1986 г.

Выступая по телевидению 14 мая 1986 г., Президент СССР М. С. Горбачев отметил: „Организации метеослужбы ведут постоянное наблюдение за радиационной обстановкой на земле, на воде и в атмосфере. Они оснащены необходимыми техническими средствами, используют специально оборудованные самолеты вертолеты и пункты наземного контроля”.

Госкомгидрометом СССР (учитывая большие масштабы загрязнения) наряду с задействованием всей наземной наблюдательной сети был организован оперативный контроль за уровнями загрязнения и распространением радиоактивных продуктов из зоны аварии с использованием авиационных измерительных средств. В работах было задействовано 5 самолетов и 3 вертолета (затем их число увеличилось до 10). Главными в этих работах были Институт прикладной геофизики, НПО „Тайфун”, Лаборатория мониторинга природной среды и климата. Институтами был максимально использован опыт работы, приобретенный на атомных полигонах и после уральской аварии. Это явилось залогом высокопрофессиональной работы в сложнейших условиях аварии. 30 апреля 1986 г. в Совет Министров СССР Госкомгидрометом была представлена карта-схема радиационной обстановки в 30-километровой зоне ЧАЭС и на прилегающих к ней территориях Украины и Белоруссии по состоянию на 29 апреля 1986 г. 2 мая в Чернобыле на заседании Правительственной комиссии возглавляемой Н. И. Рыжковым, на котором было принято решение об эвакуации населения из 30-километровой зоны, демонстрировалась более детальная карта. Эта карта была передана руководству 2 мая. В результате выполнения 30 апреля — 7 мая 1986 г. аэрогамма-съемок были определены основные контуры

дальнего радиоактивного загрязнения местности, включающие, помимо основной зоны загрязнения непосредственно вокруг АЭС, территории на стыке Могилевской, Гомельской областей БССР и Брянской области РСФСР. Повышенные уровни загрязнения были отмечены в Черкасской, Ровенской, Житомирской областях УССР, Калужской, Орловской и Тульской областях РСФСР, а также на различных участках Винницкой и Ивано-Франковской областей УССР, Брестской области БССР и меньшие уровни — в ряде других областей. Указанные материалы позволили создать обобщенную карту мощности доз гамма-излучения, приведенную к дате 10 мая 1986 г., на основе которой принимались оперативные решения по проведению (завершению основного этапа) эвакуации населения, режиму проживания населения, а также по осуществлению программы детального наземного обследования загрязненных территорий. С первых дней аварии был налажен контроль за радиоактивным загрязнением Киевского водохранилища, особенно тщательный в районе водозабора. Была утверждена программа научных исследований юны загрязнения.

Самая ближняя зона (непосредственно вокруг АЭС, в радиусе до 10 км), территория АЭС, промплощадки и г. Припять исследовались подразделениями химических войск Министерства обороны СССР, дозиметристами с ЧАЭС и специалистами Института атомной энергии им. И. В. Курчатова.

Данные изотопного анализа первых проб воздуха, воды и почвы, отобранных 26 апреля — 1 мая, показали, что около 30 % общей активности приходилось на долю иода-131 (период полураспада — 8 суток). Кроме иода-131, в пробах были обнаружены другие радионуклиды. В пробах (в основном в ближней зоне, зоне отселения) были обнаружены долгоживущие изотопы тронция-90 и плутония-239, 240. В представленных Госкомгидрометом СССР документах (а также в докладе на заседании Правительственной комиссии в Чернобыле 2 мая) обращалось внимание на наиболее опасное для человека на данном этапе, особенно для детей, поступление в организм иода-131 с молоком и через органы дыхания. Эти данные передавались Минздраву СССР.

В период прохождения загрязненных воздушных масс отмечалось наличие „горячих частиц” в приземном слое атмосферы практически во всех населенных пунктах „ближней” зоны за-

грязнения, а также в прилегающих к ней населенных пунктах Гомельской, Могилевской и Брянской областей, подвергшихся радиоактивному загрязнению.

Госкомгидрометом СССР с использованием данных Министерства обороны СССР и других министерств и ведомств была составлена карта мощностей доз гамма-излучения, на которую были нанесены изолинии, приведенные к дате 10 мая 1986 г.: 20 мР/ч (территорию с уровнями загрязнения выше 20 мР/ч было предложено объявить зоной отчуждения), 5 мР/ч (территория с уровнями загрязнения 5—20 мР/ч — зона полной эвакуации населения), 3 мР/ч (3—5 мР/ч — зона жесткого контроля и временного отселения детей и беременных женщин). Характерно, что, кроме карт, были представлены таблицы для каждого населенного пункта, особенно предназначенного к эвакуации. Назначение указанных зон определялось совместно с Минздравом СССР и Минобороны СССР, исходя из установленного Минздравом СССР норматива аварийного облучения — 10 бэр на первый после аварии год. С целью снижения поступления радионуклидов в организм человека с продуктами питания и ингаляционным путем летом 1986 г. были введены дополнительные критерии по плотности загрязнения почв основными долгоживущими нуклидами: 7, а затем 15 Ки/км² — цезием-137, 3 Ки/км² — стронцием-90, 0,1 Ки/км² — плутонием-239, 240. В связи с этими требованиями были развернуты массовые измерения изотопного состава загрязненных почв. Сводная записка о результатах первого этапа измерений и исследований радиационной обстановки была направлена Госкомгидрометом в Совет Министров СССР на имя председателя Совета Министров Н. И. Рыжкова. Приведем текст этой записки.

Председателю Совета Министров СССР
Товарищу Рыжкову Н. И.

Об оценке радиационной обстановки и радиоактивного загрязнения природной среды при аварии на Чернобыльской АЭС

В результате аварии на Чернобыльской АЭС около 5 проц. радиоактивных продуктов, накопившихся за 3 года работы в реакторе, вошло за пределы промышленной площадки станции.

Из образовавшегося облака сформировался радиоактивный след на местности в западном и северном направлениях (в соответствии с метеорологической обстановкой). Затем из зоны реактора в течение нескольких дней истекала мощная струя газообразных и летучих продуктов. Через 12 дней после аварии струя за пределами станции практически не обнаруживалась, ее интенсивность уменьшилась в 100—1000 раз.

Авиационными (5 самолетов и 3 вертолета) и наземными средствами Госкомгидромета осуществлена детальная радиационная съемка загрязнения атмосферы и местности. Непрерывная съемка загрязненной территории продолжается.

Вся наземная метеорологическая сеть европейской территории страны подключена к наблюдениям за радиоактивностью. Зона существенного загрязнения местности (с уровнем радиации более 5 мР/час) простирается на запад на удаление 75 км, на север — 60 км от АЭС, ее площадь составляет около 3000 кв. км.

Изучен изотопный состав загрязнения атмосферы и местности — основными компонентами загрязнения являются изотопы иода-131, теллура-132, стронция-89, нептуния-239, рутения-103, стронция-90. В первые недели особую опасность представляет изотоп иода-131 (содержание 10—50 проц.), легко попадающий в организм человека с пищей (особенно с молоком), затем — изотопы стронция-89 (период полураспада 2 месяца), стронция-90 (28 лет) и цезия-137 (30 лет).

На загрязненной территории обнаружено большое число высокоактивных „горячих” частиц, представляющих большую опасность при попадании в легкие при пылеобразовании. Особую опасность при попадании в легкие представляет изотоп плутония-239, также обнаруженный на загрязненной местности.

Авиационная разведка и наземные измерения показали, что радиационные продукты в первые 4—5 дней после аварии распространились на большие расстояния в различных направлениях (в соответствии с метеорологической обстановкой). Повышение уровней загрязнения (выше фоновых в 10—50 раз) наблюдалось практически по всей юго-западной части европейской территории СССР. Площадь с уровнем радиации более 0,2 мР/час превысила 200 тыс. кв. км.

Небольшое количество радиоактивных продуктов ветрами распространилось на территории Румынии, Польши, Болгарии, Югославии, Скандинавских стран — в количестве, не представляющем ни-

какой опасности для здоровья населения. Максимальные уровни радиации на границе с Румынией и ПНР не превышали 0,15—0,2 мР/час. Такие же уровни наблюдались и на территории Румынии, Болгарии и Польши. На территориях других названных стран загрязнение было значительно меньше.

Во всех странах подъем уровня загрязнения природных сред был кратковременным и значительно меньшим существующих норм, в том числе рекомендованных МАГАТЭ для случаев аварий на АЭС.

В последующие дни радиационная обстановка повсеместно стабилизировалась — истечение газовых и летучих продуктов из зоны реактора существенно уменьшилось, атмосферное загрязнение рассеялось, в загрязненной зоне происходит уменьшение радиоактивности в соответствии с распадом, существенное повышение радиоактивности в загрязненных зонах практически исключено.

Общее количество радиоактивности, выпавшей на ближнем (около 100 км) следе, оценивается в 10^7 кюри, на дальнем следе — $1,4 \cdot 10^7$ кюри (всего около $2,4 \cdot 10^7$ кюри).

Наиболее острым вопросом радиационной обстановки и ее возможных последствий в районе Чернобыльской АЭС в настоящее время (середина мая) и в ближайший период становится вопрос радиоактивного загрязнения поверхностных вод и источников водоснабжения.

Первый пик увеличения радиоактивности воды был связан с непосредственным выпадением радиоактивных продуктов из облака и струи на зеркало водоемов. Эта радиоактивность падает, происходит ее разбавление с новыми потоками чистой воды, в Киевском водохранилище радиоактивность 20.05.86 не превышала $(1—2) \cdot 10^{-10}$ к/л.

Следующую волну радиоактивности следует ожидать со смывом радиоактивных веществ дождевыми осадками. При смыве дождями радиоактивности со следа можно ожидать ее появления в р. Припять и других мелких реках в районе загрязненной местности и Киевском водохранилище и ниже по Днепру.

При этом концентрация в Киевском водохранилище может в 5—10 раз превышать норму (но будет находиться в пределах норм установленных для случаев аварий на ЧАЭС, при условии, если будет исключен центральный источник загрязнения — сток радиоак-

тивности с промплощадки и прилегающего участка (площадью около 20 кв. км) с поверхностными и подземными водами.

Этот участок в основном обвалован, чтобы не допустить поверхностного стока с него в р. Припять. Однако этого недостаточно в связи с очень малым расстоянием до стариц р. Припяти и возможной фильтрацией в них загрязнения с подземными водами. В связи с этим было предложено создать в грунте стену вокруг площадки (специальным грейфером прорывается траншея на глубину до 25—70 м и заливается раствором глины и цемента). Такая стена полностью исключает сток и миграцию радиоактивности с подземными водами.

В случае изоляции зоны промплощадки сток радиоактивности со всего следа в течение года не превысит общей радиоактивности, попавшей в воду при прохождении облака.

Госкомгидрометом, Минздравом СССР и Министерством обороны СССР разработаны рекомендации по критериям возможности проживания и необходимости эвакуации населения с загрязненной территории с учетом внешнего и внутреннего облучения, в том числе опасными долгоживущими изотопами, попадающими в человека с пищей, — стронцием-90 и цезием-137.

Территории с уровнем радиации более 5 мР/час на 10 мая 1986 г. признаны опасными для проживания населения, требующими временного выселения (площадь такой территории составляет 2900 кв. км).

На территории с уровнем радиации менее 5 мР/час (примерно до 0,5 мР/час) требуется введение жесткого контроля за радиоактивностью продуктов питания, особенно молока.

Таким образом, в некоторых небольших районах с уровнем радиации более 5 мР/час за пределами 30-километровой зоны требуется дополнительная эвакуация населения. Территории с уровнем радиации более 20 мР/час признаны непригодными для проживания населения и ведения сельского хозяйства (даже вахтовым методом) и должны быть отчуждены на длительное время (площадь этой зоны составляет около 900 кв. км). В этой зоне основную опасность определяет наличие большой плотности загрязнения долгоживущим стронцием-90 (более 1 Ки/км²).

В этой зоне возможна организация заповедника и необходимо ведение научных исследований трансформации и миграции радиоактивных веществ, широких радиозэкологических исследований. При осуществлении широкого комплекса мероприятий по обеспечению

безопасности населения и ведения хозяйства в загрязненных зонах следует максимально использовать опыт, накопленный после уральской аварии 1957 г. На обширной загрязненной территории и водных системах, связанных с этой территорией, необходимо осуществление регулярного контроля за радиоактивностью природной среды. Такой контроль осуществляется и должен осуществляться и впредь органами Госкомгидромета и ряда других ведомств.

Ю. А. Израэль
20 мая 1986 г.

Из текста записки видно, что специалистами Госкомгидромета уже в начале мая были выявлены основные особенности радиоактивного загрязнения после аварии на ЧАЭС, что позволило принять оптимальные решения по предотвращению негативных последствий (эвакуация населения, режим жизни и питания на загрязненных территориях, признанных медиками приемлемыми для проживания, учет изотопного состава загрязнений, вопросы питьевой воды и предотвращение загрязнения воды рек и водохранилищ, вопросы распространения радиоактивности на большие расстояния, в том числе и в другие страны и т. п.).

В этих работах, кроме учреждений и организаций Госкомгидромета СССР, приняли участие институты АН СССР, АН УССР, АН БССР, институты Минздрава СССР и союзных республик, лаборатории Минобороны СССР и Госагропрома СССР и республик, Минсредмаша СССР, а также других организаций. В июне—июле 1986 г. были составлены первые карты плотности загрязнения почв, на которых были нанесены изолинии плотности загрязнения цезием-137 — 40 и 15 Ки/км², стронцием-90 — 3 Ки/км² и плутонием-239, 240 — 0,1 Ки/км², и списки населенных пунктов со значениями плотности загрязнения этими радионуклидами. Кроме того, в начале июня по данным аэрогамма-спектрометрической съемки были построены карты плотности загрязнения цирконием и ниобием-95, лантаном-140, рутением-103. В ходе анализа проб наряду с определением содержания этих радионуклидов проводилось также количественное определение полного состава гамма-излучающих изотопов. При расчете доз использовался полный спектр изотопов, включая не только гамма-излучающие радионуклиды.

На основе этих карт принимались решения по ограничению использования местных продуктов питания, введению контроля а содержанием радионуклидов в них и выплате компенсаций населению для приобретения чистых привозных продуктов.

Карты загрязнения наиболее опасными изотопами, в первую очередь цезием-137, направлялись в Советы Министров УССР, РСФСР, а оттуда в соответствующие облисполкомы. Некоторые карты посылались непосредственно руководителям областей.

Территории с плотностью загрязнения цезием-137 выше 5 Ки/км² были выявлены в Киевской, Житомирской, Гомельской, Могилевской и Брянской областях, а стронцием-90 и плутонием-239, 240 выше установленных критериев (соответственно Ки/км² и 0,1 Ки/км²) оказались локализованы практически полностью внутри зоны отселения (хотя эти изотопы в меньших количествах обнаруживались и на больших удалениях).

Поскольку в выполнении работ по изотопному анализу участвовало около 30 организаций различных министерств и ведомств, возникла необходимость в экспертизе полученных данных. Только прошедшие экспертизу данные наносились на карту и рассылались в Совет Министров СССР и союзных республик, Академию наук, Минздрав СССР и другие организации.

Эта работа решением Правительства от 30 октября 1986 г. была поручена Межведомственной комиссии по радиационному контролю природной среды при Госкомгидромете СССР. Начиная с этого времени вся информация о радиоактивном загрязнении природной среды проходила через Межведомственную комиссию и только после ее одобрения рассылалась во все советские, партийные органы, министерства и ведомства.

Отметим, что в конце 1986 г. 70 наиболее отличившихся специалистов Госкомгидромета за самоотверженный труд, проявленный при ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС, были удостоены правительственных наград; из них орденом Ленина — Д. А. Израэль; орденом Трудового Красного Знамени — А. А. Борзилов, Н. К. Гасилина, В. Н. Петров, Ф. Я. Ровинский, Д. С. Седунов, Н. П. Скрипник. Всего орденами были награждены 36 человек, в том числе С. Г. Малахов, И. А. Колосков, Д. С. Цатуров, В. В. Челюканов, Е. Д. Стукин, Ю. М. Покумейко и другие, несколько человек были награждены в 1987 г.

В связи с 10-летием со времени аварии на Чернобыльской АЭ в 1996 г. орденом Мужества были награждены А. И. Бедрички (за организацию в июне 1986 г. экспедиции и участие в установках в 30-километровой зоне ЧАЭС на территории Белоруссии автоматических комплексов ТМ-910 „Лавина” для передачи метеорологических данных и радиационной обстановки) и С. М. Вакуловский и несколько человек медалями. Е. Д. Стукин, проработавший около 8 лет после аварии непосредственно в Чернобыле, организовавший там центр по изучению поведения радионуклидов на местности в 60-километровой зоне, был представлен орденом Мужества.

В 1987 г. все работы по уточнению радиационной обстановки проводились в районах с высокой плотностью загрязнения. Работы были направлены на уточнение положения изолиний с плотностью загрязнения цезием-137 — 40 и 15 Ки/км², стронцием-90 — 3 Ки/км² и плутонием-239, 240 — 0,1 Ки/км². Эти данные подтверждали полученные в 1986 г. положения изолиний по стронцию-90 и плутонию-239, 240 — они находились внутри зоны отселения. По цезию-137 расположение изолиний было уточнено. Неоднократно проводилось детальное обследование радиационной обстановки по отдельным населенным пунктам, где загрязнение было существенным.

В связи с уточнением Минздравом ряда критериев для продуктов питания (особенно молока) возникла необходимость уточнить радиационную обстановку на территории с плотностью загрязнения ниже 15 Ки/км², поскольку на отдельных типах почв даже при меньших уровнях загрязнения наблюдалось превышение установленных нормативов. В 1988 г. были определены территории с плотностью загрязнения 5 Ки/км² (по цезию-137), а на многих территориях получены данные о более низких уровнях. В 1989 г. работы проводились по получению данных на территории с меньшей плотностью загрязнения и по построению изолиний 1,0 Ки/км². На картах, одобренных в декабре 1989 г. Межведомственной комиссией по радиационному контролю природной среды при Госкомгидромете СССР, в заседании которой принимали участие, кроме членов комиссии, представители местных советских органов, общественности и неформальных организаций, оконтурены территории с изолиниями по цезию-137

0, 15, 5 и 1 Ки/км²; по стронцию-90 — 3, 2, 1 Ки/км²; по плутонию-239, 240 — 0,1 Ки/км².

Карта плотности загрязнения местности цезием-137 в масштабе 1:500 000 была составлена на основе:

— данных аэрогамма-спектральных съемок, выполненных подразделениями Госкомгидромета СССР и Мингео СССР в период 1986—1989 гг. В пределах 6-километровой зоны масштаб съемок — 1:50 000—1:100 000 и крупнее (расстояние между маршрутами 500—1000 м), на остальной территории — 1:200 000 (расстояние между маршрутами 2000 м), осреднение результатов измерений вдоль маршрута проводилось по отрезкам протяженностью до 400 м;

— данных гамма-спектрального анализа проб почвы, отобранных в 1986—1989 гг. подразделениями Госкомгидромета СССР и других ведомств более чем в 10 тыс. населенных пунктов по данным нескольких сот тысяч измерений, впоследствии число измерений достигло миллиона).

Большая часть карты была построена по данным аэрогамма-спектрометрических съемок, которые корректировались результатами наземного пробоотбора по усредненным значениям плотности загрязнения цезием-137 в пробах почвы в пределах населенных пунктов и их окрестностей. При этом рассматривались лишь те населенные пункты, по которым число отобранных проб превышало пять.

Общая площадь загрязненных территорий с плотностью загрязнения выше 5 Ки/км², как следовало из карты, составляла примерно 30 тыс. км². Распределение загрязненных территорий по союзным республикам бывшего СССР (км²) и плотность загрязнения, включая территории, с которых проведена эвакуация населения, представлены в таблице.

В последующие годы продолжались работы по уточнению радиационной обстановки, в том числе на территориях сопредельных областей.

„Пятнистая” структура на карте плотности загрязнения местности цезием-137 характерна не только для всей загрязненной территории, но проявляется также на отдельных ее участках. Однако выделить при выбранном масштабе карт тонкую пятнистую структуру загрязнения отдельных участков местности, в том

Республика	Плотность загрязнения цезием-137, Ки/км ²		
	5—15	15—40	более 40
БССР	10 160	4210	2150
УССР	1 960	820	640
РСФСР	5 760	2060	310
Всего по СССР	17 880	7090	3100

числе территорий населенных пунктов, невозможно, поэтому для них были построены крупномасштабные карты.

Следует иметь в виду, что в результате чернобыльской аварии выпадения радиоактивных продуктов в апреле—мае 1986 г. были зарегистрированы (в момент прохождения загрязненной воздушных масс) за рубежом и радиометрической сетью Госкомгидромета СССР во многих регионах страны.

В 1990 г. продолжались работы по уточнению радиационно обстановки на всей территории Украины, Белоруссии, в ряде областей РСФСР. В июне 1990 г. начата аэрогамма-спектрометрическая съемка Рязанской и Орловской областей, в июле—сентябре такие съемки проводились на территориях Белгородской, Смоленской, Липецкой, Воронежской, Курской, Тамбовской, Винницкой, Ровенской областей, в западных частях Гомельской, Могилевской областей и в южной части Минской области; было проведено детальное радиационное обследование 100 тыс. подворий.

Результаты были представлены в виде ряда детальных карт данных измерений плотности загрязнения местности цезием-137 и стронцием-90 в населенных пунктах России, Украины и Белоруссии.

В 1998 г. при головной роли Росгидромета были изданы два уникальных атласа (под научным руководством Ю. А. Израэля „Атлас загрязнения Европы цезием после Чернобыльской аварии” и „Атлас радиоактивного загрязнения европейской части России, Белоруссии и Украины”. Первый Атлас был подготовлен Россией, Белоруссией и Украиной совместно с Европейской комиссией на основании данных, представленных 32 странам Европы. Второй Атлас включает не только данные по цезию-137, но и данные по десяти долгоживущим радионуклидам, по есте

гвенной радиоактивности и химическому загрязнению европейской части России, Белоруссии и Украины.

Мониторинг загрязнения природной среды

В 1972 г. (Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 29.12.72 № 898 „Об усилении охраны природы и улучшении использования природных ресурсов“) Главному управлению гидрометеорологической службы при Совете Министров СССР было поручено:

— организовать общегосударственную службу наблюдений и контроля за уровнем загрязнения атмосферы, почвы и водных объектов по физическим, химическим и гидробиологическим для водных объектов) показателям и экстренной информации о резких изменениях уровня загрязнения атмосферы, почв и вод (ОГСНК);

— обеспечивать заинтересованные организации и учреждения систематической информацией и прогнозами об уровнях загрязнения атмосферы, почвы, водных объектов и о возможности их изменения под влиянием хозяйственной деятельности и гидрометеорологических условий.

Во исполнение данного постановления в центральном аппарате ГУТМС было образовано Управление по изучению и контролю загрязнения внешней среды (до 1991 г. начальник Н. К. Гасилица), которое обеспечило выполнение необходимых организационно-технических мероприятий по созданию в 1973—1974 гг. совместно с Академией наук СССР, Минздравом СССР, Минводхозом СССР, Минрыбхозом СССР, Минсельхозом СССР и Минэнерго СССР сети пунктов гидрохимических, гидрометеорологических, санитарных и гидробиологических наблюдений для контроля качества и степени загрязнения поверхностных вод, атмосферного воздуха и почвы, а в 1975 г. — единой системы сбора, ранения, поиска и обработки информации о качестве воды, атмосферного воздуха и почвы. Юридическое оформление деятельности 1-й очереди ОГСНК было осуществлено приказом ГУТМС от 28.01.77 № 20 «Об утверждении „Принципов организации, программы работ и перечня пунктов наблюдений и контроля за уровнем загрязнения объектов внешней среды“». В июле 1980 г.

на базе действующих наблюдательных подразделений был сформированы Центры по изучению и контролю загрязнения природной среды (ЦКЗПС), комплексные и сетевые лаборатории по контролю загрязнения атмосферного воздуха, гидрохимические лаборатории, а также экспедиционные партии по изучению загрязнения природной среды. По сути именно в этот период была заложена эффективная организационная структура государственной системы мониторинга загрязнения природной среды основные элементы которой действуют и в настоящее время. Одновременно в структуре аппарата УГМС были введены должности заместителей начальников республиканских (территориальных) управлений Госкомгидромета СССР по вопросам мониторинга загрязнения природной среды. Возглавили это направление деятельности на подведомственных территориях такие высококвалифицированные и ответственные руководители, как Г. Г. Потуридис (Украинское УГМС), Д. И. Березкин (Белорусское УГМС), В. Г. Конюхов (Узбекское УГМС), М. И. Жарканс (Казахское УГМС), А. И. Далакишвили (Грузинское УГМС), С. А. Агаев (Азербайджанское УГМС), Р. К. Люжинас (Литовское УГМС), И. В. Грепачевский (Молдавское УГМС), М. С. Делесов (Латвийское УГМС), С. Т. Токолдошев (Жиргизское УГМС), Л. С. Алиханян (Таджикское УГМС), Л. Г. Назарян (Армянское УГМС), В. А. Глазовский (Туркменское УГМС), Я. П. Саг (Эстонское УГМС), В. Н. Вилков (Верхне-Волжское УГМС), Д. И. Тарабаньков (Дальневосточное УГМС), И. А. Зильберштейн (Забайкальское УГМС), А. Ф. Бойков (Западно-Сибирское УГМС), В. И. Лужнов (Иркутское УГМС), А. В. Кучеренко (Красноярское УГМС), В. И. Артоболевский (Мурманское УГМС), А. Н. Артамонов (Омское УГМС), М. Г. Бодриков (Приволжское УГМС), Ю. П. Ковтанюк (Приморское УГМС), К. И. Непоп (Сخالинское УГМС), З. И. Мокроусова (Северное УГМС), И. М. Марковец (Северо-Западное УГМС), В. Ф. Баев (Северо-Кавказское УГМС), И. Е. Лобов (Уральское УГМС), Г. П. Быканов (УГМС ЦЧО), А. В. Шестаков (Якутское УГМС), Ю. С. Осипов (ЦВГМО).

В 1978 г. в целях совершенствования государственной системы наблюдения и контроля за состоянием окружающей природной среды, уровнем и источниками ее загрязнения ГУГМС был преобразован в Государственный комитет СССР по гидромете

ологии и контролю природной среды с возложением на него, помимо задач по организации деятельности государственной системы наблюдения и контроля за состоянием природной среды, функций по регулированию использования воздушного бассейна городов и промышленных центров и осуществлению государственного контроля за источниками его загрязнения, соблюдением норм предельных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и ряда других природоохранных функций.

В соответствии с возложенными задачами Госкомгидромет СССР в области мониторинга состояния окружающей природной среды, ее загрязнения обеспечивал:

— на базе новейших достижений науки и техники дальнейшее развитие и надежное функционирование государственной системы наблюдений и контроля за состоянием природной среды;

— проведение систематических наблюдений за состоянием атмосферы;

— изучение и оценку уровня загрязнения природной среды с использованием данных министерств и ведомств, осуществляющих наблюдения и контроль за состоянием природной среды.

Следует подчеркнуть, что становление и развитие национальной системы мониторинга состояния и загрязнения природной среды реализовывалось как составная часть глобальной системы наблюдений. В частности, действующие станции комплексного юного мониторинга и сеть озонметрических станций являются элементами специализированных международных наблюдательских сетей, формирование которых было начато ВМО при поддержке ЮНЕП в 1960—1970-е годы.

В июне 1989 г. Исполнительным советом ВМО все подобные специализированные наблюдательские сети за состоянием атмосферного воздуха, его загрязнением были включены в состав единой Глобальной службы атмосферы (ГСА), задачей которой является комплексное изучение изменений, происходящих в атмосфере, для научного обоснования политики и стратегии защиты атмосферы, климатической системы и биосферы в целом. В настоящее время в России действует около 50 станций ГСА. В измательные программы этой глобальной службы входит, помимо стандартных метеорологических наблюдений, определение по установленным единым процедурам следующих характеристик

атмосферы: содержания диоксида углерода, химического состав и кислотности осадков, аэрозольной мутности атмосферы, взвешенных твердых частиц, диоксида серы, окислов азота, солнечной радиации, метана, фреонов, тяжелых металлов, аммиака азотной кислоты, окиси углерода, общего содержания и концентраций приземного озона. Определяющий вклад в реализации Гидрометслужбой задач в рамках ГСА внесли специалисты ГГС ЦАО и Лаборатории мониторинга природной среды и климат Госкомгидромета СССР и АН СССР (директор Ю. А. Израэль), на базе которой, как уже указывалось, в 1990 г. был организован Институт глобального климата и экологии, также двойного подчинения.

Постановлением Совета Министров СССР от 18 мая 1982 г. № 416 „О мерах по обеспечению обязательств советской стороны вытекающих из Конвенции по дальнейшему трансграничному загрязнению воздуха от 13 ноября 1979 г.“, на Госкомгидромете СССР были возложены обязанности, связанные с выполнением вытекающих из Конвенции обязательств советской стороны включая обмен соответствующей документацией и информацией. Во исполнение постановления при Госкомгидромете СССР была создана Межведомственная комиссия по вопросам выполнения Конвенции, председателем которой приказом от 09.06.82 № 113 был назначен заместитель Председателя Госкомгидромета СССР В. Г. Соколовский. Решение задач по международной „Совместной программе наблюдения и оценки переноса на большие расстояния загрязняющих воздух веществ в Европе (ЕМЕП Конвенции в части расчета переноса загрязняющих веществ с помощью математических моделей обеспечивалось специализированным Метеорологическим синтезирующим центром „Восток“ (МСЦ-В, директор А. С. Прессман), организованным в составе ИПГ (аналогичный центр — МСЦ-Запад — действовал в Норвегии). Выполнение измерительной части программы ЕМЕП — научно-методическое обеспечение деятельности 11 станций наблюдений, проведение анализов отобранных на станциях проб, контроль качества измерений и передача полученных результатов Осло — обеспечивалось специальной лабораторией ИПГ (руководитель А. Г. Рябошапка). Официальные документы Исполнительного органа Конвенции свидетельствуют, что в достаточный ответственный период роста промышленного производства об

зательства советской стороны выполнялись. С образованием в 1989 г. Государственного комитета СССР по охране природы основные функции и задачи по Конвенции были переданы этому ведомству. В настоящее время Росгидрометом обеспечивается реализация только измерительной части программы ЕМЕП.

Исключительное внимание в ходе развития ОГСНК уделялось вопросам приборно-технического обеспечения проводимых наблюдений. Этому способствовали эффективная координация этой деятельности центральным аппаратом Госкомгидромета СССР (главный инженер Управления изучения загрязнения природной среды Ю. С. Цатуров, впоследствии заместитель Председателя Госкомгидромета СССР), работа коллективов высококвалифицированных специалистов НИУ Росгидромета.

В приказе Госкомгидромета СССР от 30.01.87 № 25 было констатировано, что „в течение X и XI пятилеток ОГСНК получила значительное развитие. Существенно расширен перечень решаемых ею функциональных задач, повысилась полнота и достоверность информации о загрязнении природной среды. Разработаны и внедрены в оперативно-производственных подразделениях новые методы организации и проведения наблюдений за загрязнением природной среды, методы химического анализа, составления оперативных и долгосрочных прогнозов загрязнения. Лаборатории контроля загрязнения природной среды оснащаются новыми средствами контроля. Завершена разработка и начато внедрение автоматизированных систем обработки информации о загрязнении атмосферного воздуха и вод суши. НУ и УГКС выполнены работы по оптимизации размещения и программ наблюдений для всех сетей контроля загрязнения ОГСНК”. Этим же приказом были утверждены основные направления развития и состав 2-й очереди ОГСНК и организованы такие важные с точки зрения оценки масштабов и уровней загрязнения природной среды по территории страны в целом наблюдения, как снегомерные съемки выпадений загрязняющих веществ. Определяющий вклад в решение этих задач внесли специалисты ИГКЭ И. М. Назаров, Ш. Д. Фридман и др.).

Организованная в СССР в 1972 г. Общегосударственная служба начала выполнять функции и задачи национальной системы комплексного мониторинга загрязнения природной среды.

Задачи Общегосударственной службы были сформулированы следующим образом:

— наблюдение и контроль загрязнения атмосферы, вод суши и морей, почвы по физическим, химическим и гидробиологическим показателям для определения того, как загрязняющие вещества распределяются во времени и пространстве, а также для оценки состояния природной среды и выявления источников загрязнения;

— обеспечение заинтересованных организаций систематической и экстренной информацией об изменении уровней загрязнения природных сред, а также прогнозами и предупреждениями о возможных изменениях этих уровней.

Национальная система мониторинга максимально использовала существующую в Госкомгидромете информационную систему, систему получения, обработки, подготовки и представления информации. Она была построена по иерархическому принципу и состоит из нескольких уровней*:

— первый (низший) уровень — посты и станции наблюдений на которых осуществлялись наблюдения, а также определенная обработка и обобщение данных;

— второй уровень — территориальные и региональные центры, где осуществлялись обобщение, анализ материалов, а также составлялись различные местные прогнозы и оценка состояния окружающей среды по территории этих центров;

— третий (высший) уровень — Гидрометеорологический центр и другие головные институты Общегосударственной службы, которые осуществляли разработку прогнозов и оценку состояния окружающей среды в национальном и глобальном масштабах. Роль головного института по обобщению данных о загрязнении природных сред осуществлял Институт прикладной геофизики (ИПГ), в настоящее время эти функции выполняет Институт глобального климата и экологии (ИГКЭ).

Вся передаваемая и сообщаемая информация о загрязнении по степени срочности делилась на три категории:

*Описание этого раздела относится к 1970-м годам, поэтому изложение ведется в прошедшем времени. Многие элементы описания службы сохранились функционируют в настоящее время.

1) экстренная информация содержала сведения о резких изменениях уровня загрязнения; последние могут быть вызваны либо неблагоприятными гидрометеорологическими условиями, либо технологическими или другими нарушениями, повлекшими за собой повышенный выброс вредных веществ в окружающую среду. Эта информация немедленно сообщалась местным органам для безотлагательного принятия мер, а также немедленно передавалась в научно-исследовательские институты и Госкомгидромет, которые оперативно проводили анализ данной информации и сразу же передавали результаты анализа в центральные партийные, советские и народнохозяйственные органы;

2) оперативная информация охватывала месячный период наблюдений; анализ данных наблюдений и других сведений проводился на местах, результаты передавались в научно-исследовательские институты, где осуществлялись их дополнительное сопоставление и анализ, полученные результаты передавались в Госкомгидромет. В свою очередь, Госкомгидромет извещал центральные органы о текущей обстановке и тенденциях в области загрязнения окружающей среды. Кроме того, местные органы общегосударственной службы выпускали регулярные бюллетени по материалам наблюдений;

3) режимная информация охватывала годовой период наблюдений и отражала общее состояние загрязнения природных сред, тенденции в этой области, содержала анализ причин и последствий загрязнения. Режимная информация служила для планирования мероприятий по охране окружающей среды, для разработки общегосударственной политики в данной области, для составления долгосрочных (20—30 лет) прогнозов развития народного хозяйства и оптимального использования природных ресурсов. Этот вид информации передавался и распространялся аналогично остальным видам информации.

Сеть фоновых станций национальной системы наблюдений одновременно являлась частью Глобальной системы мониторинга окружающей среды (ГСМОС), так как на этих станциях получали информацию о глобальном фоновом состоянии биосферы.

Таким образом, в структурном отношении Общегосударственная служба наблюдений и контроля за уровнем загрязнения окружающей природной среды состояла из следующих подсистем мониторинга: источников загрязнения; загрязнения атмос-

сферного воздуха; загрязнения вод суши; загрязнения морей; загрязнения почв; фонового мониторинга (биосферные заповедники, региональные и базовые станции).

Мониторинг загрязнения атмосферного воздуха

Наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха к 1977 г уже проводились более чем в 350 городах (из них в 210 городах была создана сеть стационарных пунктов наблюдения), и число их постоянно росло. Эти наблюдения были организованы для обеспечения центральных партийных, советских и народного законодательных органов объективной информацией об уровне загрязнения атмосферного воздуха.

Важными задачами службы контроля за уровнем загрязнения воздуха являлись также оценка эффективности мероприятий по защите воздушной среды, контроль за соблюдением нормативов допустимого содержания вредных веществ в атмосфере выявление источников загрязнения воздуха.

Особенно ответственной задачей службы контроля стала экстренная информация о резких изменениях уровня загрязнения которые могли быть вызваны повышенным выбросом из-за технологических нарушений, а также неблагоприятными метеорологическими условиями. Поэтому Госкомгидромет организовал прогноз неблагоприятных метеороусловий (инверсии, штилевые условия), предупреждения о которых передавались непосредственно на промышленные или энергетические объекты. На этих объектах заблаговременно разрабатывались мероприятия позволяющие на короткий период (до нескольких суток) обеспечить снижение выбросов без уменьшения выпуска продукции.

Посты (пункты) наблюдения и контроля за уровнем загрязнения воздуха подразделялись на три категории:

- 1) стационарные посты служат для систематических и длительных наблюдений. Представляют собой специальные павильоны оснащенные необходимыми приборами и аппаратурой для отбора проб воздуха, непрерывной регистрации содержания вредных примесей в атмосфере и определения метеорологических параметров;

2) маршрутные посты служат также для постоянных наблюдений. Отбор проб воздуха и метеорологические измерения на этих постах проводились с помощью передвижной лаборатории на автомашине;

3) передвижные (подфакельные) посты служат для разовых наблюдений под дымовыми и газовыми факелами (выбросами). Они выбираются каждый раз под факелом в зависимости от режима ветра на различных расстояниях от источника загрязнения.

В системе мониторинга загрязнения атмосферного воздуха с самого начала определялись такие распространенные вещества, как пыль и сажа (весовое содержание), сернистый газ, окись углерода и двуокись азота. В тех городах, где имелись источники специфического загрязнения, наблюдения были организованы также и за их содержанием в атмосфере. К таким веществам относились пары серной кислоты, аммиак, сероводород, сероуглерод, фенол, фтористый водород, хлор, метилмеркаптан и др. Важное место отводилось определению концентрации тяжелых металлов в воздухе некоторых городов (ртуть, свинец, железо, марганец, никель, хром, олово, ванадий, цинк и др.). Осуществлялась организация контроля углеводородов и озона. Развитие методов газовой хроматографии в дальнейшем позволило увеличить количество определяемых специфических органических веществ в атмосфере, включая бенз(а)пирен, полихлорбифенилы и диоксин.

Определение уровня загрязнения атмосферы во многих случаях проводилось путем отбора проб в жидкостные поглотители (стадия концентрирования) с последующим неавтоматизированным анализом в лаборатории.

Автоматизация измерений атмосферных загрязнений представляла собой важнейшее направление работ в области мониторинга загрязнения воздуха. В Москве, Ленинграде и Киеве в 1977—1978 гг. уже началась эксплуатация автоматизированных систем контроля качества атмосферного воздуха как части общесоюзной автоматизированной системы контроля качества окружающей среды.

Первой ступенью автоматизированной системы являлась локальная система, обслуживающая отдельный район, крупный город и т. п. В каждом из пунктов наблюдения устанавливался

набор соответствующих автоматических датчиков и телеавтоматическое устройство, считывающее показания датчиков, накапливающее информацию, которая затем преобразовывалась в определенный код и передавалась в локальный центр сбора и обработки информации по телефонным или телеграфным каналам связи.

Центр сбора и обработки информации (ЦСИ) служил местом для сбора и обработки по заданной программе информации 30—50 пунктов наблюдения и передачи ее в следующую (вторую) ступень автоматизированной системы, которой являлся региональный вычислительный центр (РВИЦ). ЦСИ представлял необходимые сведения о загрязнении окружающей среды местным заинтересованным организациям в виде таблиц, сводок и бюллетеней.

Третьей ступенью автоматизированной системы являлся главный центр данных. Здесь собиралась вся информация о загрязнении окружающей среды.

Наряду с созданием инструментальных и автоматизированных средств контроля таких распространенных загрязняющих веществ, как сернистый газ, пыль, тяжелые металлы, органические вещества и др., важное значение имели научные исследования таких показателей качества воздуха, которые тогда еще не стали объектом повсеместных наблюдений, но уже привлекли пристальное внимание.

В этой связи было рассмотрено такое явление, как фотохимический смог и возможность его образования в городах страны, поскольку рост промышленного производства и быстрое развитие автотранспорта приводило к этому специфическому виду загрязнения атмосферного воздуха.

Изучение фотохимических процессов в атмосфере явилось частью общих исследований различных процессов, связанных с поведением загрязняющих веществ в локальном, региональном и глобальном масштабах. Изучение, например, физико-химических трансформаций галогенсодержащих загрязнителей (фреонов) в стратосфере привело к анализу разрушения озонового слоя. На этом примере стало видно, как проблемы локального мониторинга загрязнения атмосферы смыкаются с глобальными проблемами.

Мониторинг загрязнения вод суши

Проблема загрязнения вод суши (реки, озера, водохранилища) тесно связана с проблемой обеспеченности пресной водой. Хорошо известно, что в ряде районов СССР не хватало пресной воды для нормального водоснабжения сельского хозяйства, промышленности, а в отдельных случаях и коммунального хозяйства, и в этих условиях вопросы качества воды приобрели особое значение. В этой связи служба контроля за уровнем загрязнения пресных вод являлась не только частью национальной системы мониторинга загрязнения окружающей среды, но и входила в систему государственного учета вод и ведения водного кадастра.

Таким образом, основная цель службы наблюдений и контроля за уровнем загрязнения вод суши заключалась в получении информации о качестве вод, необходимой для осуществления мероприятий как по охране вод, так и по рациональному использованию водных ресурсов.

Систематические наблюдения и контроль за уровнем загрязнения поверхностных вод как в местах, подверженных влиянию хозяйственной деятельности человека, так и в районах минимального загрязнения (фоновые наблюдения) осуществлялись путем организации:

— стационарной сети пунктов наблюдений за естественным составом и загрязнением поверхностных вод по физическим, химическим и гидробиологическим показателям;

— специализированной сети пунктов на загрязненных водных объектах для решения ряда научно-исследовательских и практических задач;

— временной экспедиционной сети пунктов для наблюдений за объектах, не охваченных вышеуказанными наблюдениями.

Основными объектами при выборе местоположения пунктов наблюдений за уровнем загрязнения поверхностных вод суши являлись следующие:

— места сброса сточных и ливневых вод городов и крупных поселков в водные объекты (реки, озера, водохранилища);

— места сброса сточных вод отдельными крупными промышленными предприятиями (заводы, рудники, шахты, нефтепромыслы и т. д.);

— места сброса подогретых вод от ТЭС, ГРЭС, АЭС;

— места сброса коллекторно-дренажных вод, отводимых с орошаемых или осушаемых земель;

— приплотинные участки рек, являющиеся важными для рыбного хозяйства;

— крупные нерестилища и зимовья ценных пород рыб;

— замыкающие створы больших и средних рек, впадающих в моря и внутренние водоемы, имеющие большое народнохозяйственное значение;

— створы на реках, вытекающих из пределов отдельных бывших союзных республик или укрупненных экономических районов;

— замыкающие гидростворы речных бассейнов, по которым составляются водохозяйственные балансы;

— устьевые зоны загрязненных притоков главной реки внутри крупных речных систем и крупных озер и водохранилищ, имеющих большое народнохозяйственное значение.

В каждом пункте, расположенном на реке, было организовано несколько створов наблюдений: один — выше источника загрязнения на расстоянии примерно 1 км (фонový для данного пункта) и один или несколько — на расстоянии 500 м от места сброса сточных вод или ниже источника загрязнения. На проточных озерах и водохранилищах размещение створов наблюдений проводилось подобным же образом. На водоемах с замедленным водообменом фонový створ располагался в части водоема, не подверженной влиянию загрязнения (на расстоянии 0,5—0,6 км от места выпуска сточных вод), а остальные створы размещались в радиальном направлении от места выпуска сточных вод (за пределами рассчитанной зоны загрязнения, у ее границы).

Отбор проб воды на водотоках и водоемах в фонovém створе производился, как правило, на одной вертикали с поверхностного горизонта, на остальных — на нескольких вертикалях: при глубине воды до 5 м — с поверхностного горизонта, при глубине воды от 5 до 10 м — с поверхностного и придонного горизонтов, а при глубине воды более 10 м — дополнительно с промежуточного горизонта.

К этому времени стационарная сеть наблюдений состояла из 100 пунктов и охватывала более 1200 водных объектов страны.

На пунктах стационарной сети перечень наблюдаемых ингредиентов и показателей качества воды определялся главным образом составом и объемом сточных вод, их токсичностью и требованиями, предъявляемыми потребителями воды. К ним относятся: температура воды, взвешенные вещества, минерализация, цветность, величина рН, растворенный кислород, БПК-5, ХПК, запахи, главные ионы, биогенные компоненты и такие широко распространенные загрязняющие вещества, как нефтепродукты, ПАВ, летучие фенолы, пестициды, соединения тяжелых металлов. Таким образом, полная программа наблюдения на каждом пункте сети состояла из определения перечисленного выше обязательного перечня показателей, а также специфических загрязняющих веществ, характерных для сточных вод, поступающих в наблюдаемый водный объект.

К 1-й категории были отнесены пункты, расположенные на водных объектах (или их участках), имеющих особо важное народнохозяйственное значение, а именно места нерестилищ и зимовий ценных пород рыб.

Ко 2-й категории были отнесены пункты, расположенные на водных объектах, находящихся:

— в районе промышленных городов и рабочих поселков, население которых использует воду для питьевых и хозяйственно-бытовых нужд, и в местах массового отдыха населения;

— в местах сброса коллекторно-дренажных вод, отводимых с сельскохозяйственных угодий;

— на пограничных створах рек, втекающих на территорию СССР из-за рубежа или вытекающих за пределы нашей страны;

— на замыкающих створах больших и средних рек, впадающих в моря и внутренние водоемы, имеющие большое народнохозяйственное значение;

— на замыкающих створах рек, по которым составляются водохозяйственные балансы с характеристикой качества водных ресурсов;

— в приустьевой зоне больших притоков крупных рек, озер и водохранилищ.

К 3-й категории были отнесены пункты, расположенные на водных объектах, где воздействие на качество воды носит умеренный и слабый характер, т. е. в районах небольших городов населенных пунктов, промышленных предприятий, местах отдыха трудящихся, местах поступления стоков с сельскохозяйственных угодий.

К 4-й категории относились пункты стационарной сети гидрохимических наблюдений на незагрязненных водных объектах (фоновых участках). На пунктах 4-й категории проводились только гидрохимические наблюдения по общей программе.

Программа работ в зависимости от категории пунктов различалась не только по объему наблюдаемых показателей, но и по срокам наблюдений. Так, на пунктах 1-й категории наблюдения проводились ежедневно по сокращенной программе и еженедельно по полной программе; на пунктах 2-й категории ежедневно проводились только визуальные наблюдения, а наблюдения по полной программе — ежемесячно; на пунктах 3-й категории — ежемесячные наблюдения по сокращенной программе, а по полной программе — в основные гидрологические фазы, как и на пунктах 4-й категории.

Выше указывалось, что наряду с обязательной программой наблюдений для пунктов 1—3-й категорий устанавливается перечень подлежащих наблюдениям веществ, являющихся специфическими для данного водного объекта или его участка.

Автоматизация наблюдений за уровнем загрязнения пресных вод представляла собой важнейшее направление развития системы контроля качества вод суши. Была создана первая опытная локальная автоматизированная система контроля качества вод на р. Москве. В структурном отношении эта система построена по аналогии с локальной автоматизированной системой контроля за уровнем загрязнения воздуха.

На первых автоматизированных станциях надежно измерялись такие показатели, как температура, растворенный кислород, рН, еН, электропроводность, мутность. Обычно мониторы позволяют также проводить и определение уровня воды. Велась работа по созданию детекторов с использованием ион-селективных электродов для определения ионов меди, фтора, хлора, ни

ратов, цианидов, а также сероводорода, аммиака, первичной продукции и деструкции и т. д.

Начиная с 1974 г. Общегосударственная служба наблюдений и контроля за уровнем загрязнения внешней среды осуществляла контроль состояния водных объектов и по гидробиологическим показателям. Подход к организации контроля качества вод по гидробиологическим показателям в целом такой же, как и по физическим и химическим показателям, т. е. он предусматривал проведение контроля в установленных пунктах наблюдений в согласованные сроки и по единой унифицированной методике. Проведение биологических и, в частности, гидробиологических наблюдений и исследований (гидробиологический мониторинг) представляло большую самостоятельную ценность, поскольку в том случае получаемая информация позволяет судить не только об уровне загрязнения природных объектов, но и о реакции биоты на воздействие этих уровней загрязнения, о состоянии организмов, популяций, экосистем в условиях антропогенного влияния.

Наблюдения велись за следующими основными элементами водных экосистем: зообентосом, зоо- и фитопланктоном, макрофитами. В случае необходимости изучался также бактериопланктон. Среди этих составляющих важная роль отводилась бентическим организмам, видовой состав которых иногда являлся единственным гидробиологическим показателем загрязнения грунта и придонного слоя воды. При отборе проб и интерпретации результатов наблюдений учитывалось, что бентосные животные могут обитать в разных биотопах в пределах одной водной экосистемы и находиться в разных условиях загрязнения (в ряде случаев грунт в прибрежной зоне и на глубине может содержать различные концентрации и виды загрязняющих веществ).

При комплексном контроле качества вод использовались и микробиологические данные: общее число бактерий (в млн. л./мл), время удвоения числа бактерий, число сапрофитных бактерий и учет специализированных групп бактерий.

Оценка качества воды и состояния водных экосистем производилась по совокупности гидробиологических показателей, включающих индексы сапробности, разнообразия, токсичности, продукционные и микробиологические показатели.

Описанная система была задействована на сети Госкомгидромета и результаты этой работы использовались и используются для экспертной оценки качества вод и состояния водных экосистем различных водоемов.

Мониторинг загрязнения морей

Система наблюдений основывалась на создании сети локальных пунктов наблюдений (станций), расположение которых позволяло проводить определение полей загрязнения. Кроме того часть сети должна была совпадать с вековыми станциями, уже существующими на рассматриваемых морях. Размещение станций опиралось на знание гидрохимического и гидрометеорологического режимов и рельефа дна в данном районе. Важной особенностью морской станции мониторинга являлось проведение синхронных наблюдений на всех стандартных океанографических горизонтах (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 м и т. д.), включая придонный слой воды, а также слои „скачка свойств” (плотности, солености, кислорода и т. д.).

Пункты или морские станции наблюдений за уровнем загрязнения в зависимости от народнохозяйственной значимости водного объекта и степени его загрязненности подразделялись в три категории.

Морские станции категории I (единичная контрольная станция) предназначены для оперативного выявления высоких уровней загрязнения в наиболее загрязненных зонах вблизи источников сброса и используются для оперативной информации. Станции категории I располагаются на замыкающих створах устьевых областей, в зонах влияния сброса сточных вод с сельскохозяйственных угодий, нефтеналивных баз, в местах действующих морских нефтепромыслов, в районах, имеющих важное рыбохозяйственное или культурно-оздоровительное значение.

Станции категории I обеспечивают контроль за содержанием загрязняющих веществ и визуальный контроль за состоянием загрязненности поверхности моря в районах наблюдений. С этой целью наблюдения проводились по двум программам — сокращенной и полной.

Сокращенная программа. Наблюдения проводились один раз в декаду. Программой предусматривались наблюдения за содержанием растворенного кислорода, нефтепродуктов и одного-двух загрязняющих веществ, специфичных для данного района.

Полная программа. Наблюдения проводились один раз в месяц (в середине месяца) и в этой декаде совмещались с наблюдениями по сокращенной программе. Программой предусматривались наблюдения по следующим показателям:

— загрязняющие вещества: нефтепродукты, хлорорганические пестициды, тяжелые металлы (ртуть, свинец), фенолы, детергенты, а также загрязняющие вещества, специфичные для данного района;

— показатели среды: растворенный кислород, сероводород, концентрация водородных ионов, биохимическое потребление кислорода за пять суток, нитритный азот, нитратный азот, аммонийный азот, общий азот, фосфор фосфатный, общий фосфор, кремний;

— элементы гидрометеорологического режима: соленость (хлорность) воды, температура воды и воздуха, скорость и направление течения и ветра, прозрачность, цветность.

Морские станции категории I (единичные станции или системы станций в виде разрезов) служили для определения уровней загрязнения и тенденции их изменчивости в наиболее загрязненных районах (районы городов и портов, прибрежные воды морей и устьев рек, бухты, заливы, а также районы расположения промышленных комплексов, мест добычи полезных ископаемых, стоков с сельскохозяйственных угодий, интенсивного судоходства и районы, имеющие культурно-оздоровительное и рыбохозяйственное значение). Станции категории I обеспечивали ежемесячный контроль за уровнем загрязнения морских вод.

Наблюдения на станциях категории II проводились по полной программе, изложенной выше. В период ледовой обстановки наблюдения проводились один раз в сезон.

Морские станции категории III (сеть станций в относительно чистых водах) были организованы для прослеживания фоновых уровней загрязнения и их сезонной и годовой изменчивости. Наблюдения на станциях категории III выполнялись с периодичностью один раз в сезон по полной программе.

К этому времени мониторинг загрязнения морей охватывал все внутренние и омывающие моря и сеть состояла из 60—70 станций категории I, 570—600 станций категории II и 1000—1100 станций категории III.

Важной составной частью мониторинга загрязнения морской воды являлось также изучение загрязнения Мирового океана, состояние которого вызывало сильную тревогу. Мониторинг за загрязнения морей и океанов в национальном масштабе тесно связан с международными правовыми соглашениями.

Мониторинг загрязнения почв

Бурный рост применения химических удобрений и средств защиты растений, с одной стороны, и общее увеличение масштаба выбросов, приведшее к глобальному загрязнению окружающей среды, — с другой, заставляют мониторингу загрязнения почв уделять не меньше внимания, чем мониторингу других геофизических сред.

В отличие от других сред, информация о содержании тех или иных веществ антропогенного происхождения в контролируемой почве в редких случаях поддается оценке с помощью таких критериев, как ПДК, по той простой причине, что ПДК для почв разработаны лишь для очень ограниченного количества веществ антропогенного происхождения. Нормативами охвачены практически только пестициды с достаточно продолжительным периодом „жизни”, например, ДДТ, гексахлорциклогексан (ГХЦГ) полихлорпинен, полихлоркамфен, севин. При мониторинге остальных органических веществ оценка пока что сводится к выявлению статистических пространственных и временных закономерностей.

Наиболее сложно обстоит дело, пожалуй, с оценкой данных по содержанию в почвах тяжелых металлов, которые, как известно, входят в естественный состав почв и минералов. Здесь так же пока единственной оценкой является выявление пространственных и временных закономерностей и сравнение результатов наблюдений со средними фоновыми значениями.

Критериями при составлении перечня подлежащих контролю веществ в почве являются их токсичность, распространен

ность, а для химических средств защиты растений — еще и устойчивость (персистентность).

Из 70—80 применяемых в сельском хозяйстве пестицидов в этот перечень попали ДДТ и его метаболиты, ГХЦГ, гранозан, полихлорпиринен, метафос, полихлоркамфен, цирам, севин, карбатион, гептахлор, фосфид цинка и некоторые другие. Причем первоочередным объектом мониторинга являются ДДТ с его метаболитами в ГХЦГ, поскольку накопление их в почвах представляет реальную опасность. За остальными пестицидами наблюдения осуществлялись в соответствии с районами и сроками их применения.

Из тяжелых металлов наиболее токсичны ртуть, свинец, кадмий, и поэтому наблюдения за их содержанием являлись повсеместными. Вместе с тем целый ряд других токсичных металлов, таких как мышьяк, ванадий, никель, кобальт, хром, медь, цинк, марганец, молибден, бериллий, селен, сурьма, может поступать на поверхность почв за счет локальных промышленных выбросов.

Из органических веществ промышленного происхождения контролировались прежде всего вещества, обладающие способностью поступать и накапливаться в сельскохозяйственной продукции, а также способные к миграции вместе с поверхностным и подземным водным стоком. Контроль таких сильных канцерогенов, как полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и бенз(а)пирен — их представитель и индикатор присутствия ПАУ, а также таких токсичных веществ, как полихлорбифенилы (ПХБ), представлялся совершенно необходимым.

И наконец, в общую программу мониторинга входят наблюдения за такими показателями качества почв, как кислотность, засоленность и другие свойства, изменение которых вследствие процессов загрязнения является нежелательным.

Кроме почвы как таковой, объектами наблюдений являлись также атмосферные выпадения (осадки, сухие выпадения, снежный покров), позволявшие судить о величине потока загрязняющих веществ на земную поверхность. Эти наблюдения относятся к изучению миграционного цикла в системе атмосфера—Земля.

В соответствии с различными источниками загрязнения наблюдения за уровнем загрязнения почв подразделялись на две категории.

К первой категории относятся почвы сельскохозяйственных районов. Отбор проб осуществлялся два раза в год: весной, после таяния снега (до применения пестицидов), и в конце вегетационного сезона (в течение 10 дней после сбора урожая). Пробы постоянно отбирались на одних и тех же полях, являющихся характерными для данного района, с учетом их хозяйственного использования и типа почв. Уровень загрязнения определялся для наиболее токсичных и персистентных пестицидов и тяжелых металлов.

Вторую категорию составляли почвы вокруг промышленно-энергетических объектов. Основной отбор проб производился один раз в год весной, после таяния снега, в 64 точках, расположенных равномерно по восьми румбам в радиусе до нескольких десятков километров от объекта. Кроме того, производился дополнительный отбор проб один раз в год осенью, после уборки урожая, в 16 точках по четырем румбам. Наблюдениям подвергались следующие вещества:

— металлы в зависимости от характера местных выбросов; к ним относятся ртуть, свинец, кадмий, ванадий, никель, кобальт, хром, медь, цинк, марганец, молибден, бериллий, а также селен, мышьяк и сурьма;

- бенз(а)пирен;
- полихлорбифенилы.

На территориях, охваченных наблюдениями за уровнем загрязнения почв обеих категорий, в те же сроки проводится определение некоторых показателей качества почв, например, кислотности, сульфат- и хлорид-ионов, общего и подвижного азота и фосфора, микробиологических показателей. Эти наблюдения осуществляют на целинных участках луговых и лесных почв.

В качестве дополнительного и более оперативного мониторинга загрязнения почв определялся поток указанных выше веществ на поверхность земли. Для этой цели один раз в сезон (конец зимы) производился отбор проб снега, а также отбор пробы выпадений месячной экспозиции. Точки отбора проб выпадений обычно были приурочены к местам с максимальным уровнем загрязнения почв.

Использование снежного покрова как метода контроля за загрязнением территории страны атмосферными выпадениями было предложено сотрудниками Института прикладной геофизики им. академика Е. К. Федорова, В. Н. Василенко, И. М. Назаровым

г Ш. Д. Фридманом в 1972 г. В течение последующих восьми лет ЦПГ в сотрудничестве с другими организациями проводил научно-исследовательские и опытно-методические работы по этой тематике, их результаты были обобщены в ряде публикаций. Затем наступила очередь внедрения метода в системе Госкомгидромета СССР. Большая работа в этой области была проделана управлением контроля загрязнения Госкомгидромета, в том числе его начальником Н. К. Гасилиной, В. В. Челюкановым и другими сотрудниками.

Система (сеть) мониторинга загрязнения снежного покрова на территории СССР, созданная на базе снегомерной сети Госкомгидромета, начала действовать с 1980 г. Основной ее задачей являлось определение атмосферных нагрузок загрязняющих веществ по территории страны в целом и по отдельным регионам. По данным сети также определялись характеристики дальнего и трансграничного переноса загрязняющих веществ в атмосфере. В соответствии с этими задачами наиболее плотная сеть наблюдений была создана в густонаселенных промышленных районах, а также вдоль западной границы СССР. Около 40 % метеостанций, действовавших в работе сети, освещали загрязнение крупных промышленных городов и агломераций, еще 40 % станций контролировали загрязнение площади распространения загрязняющих веществ по основным траекториям их переноса от промышленных центров и регионов. Остальные 20 % станций контролировали фоновое загрязнение в отдаленных районах страны, включая Арктический бассейн.

Первичная обработка проб снега производилась на метеостанциях (постах). Аналитические определения водорастворимых ингредиентов, измерение pH и окончательная обработка проб выполнялись в лабораториях территориальных управлений и центров контроля загрязнения природной среды. Аналитические определения загрязняющих веществ по сложным методикам проводились централизованно.

Первоначально, в сезон в 1980—1981 гг., в работе участвовало 17 станций 17 территориальных управлений Госкомгидромета. К концу 80-х годов число управлений достигло 35, а станций — 39. Плотность сети на европейской части СССР — одна станция на 8 тыс. км², а на азиатской — одна станция на 30 тыс. км². Мо-

мониторинг загрязнения снежного покрова осуществлялся на площади 19 млн. км² (около 85 % всей территории СССР).

На всех станциях производился анализ загрязнения сульфатами и измерение значений рН. Примерно 30 % станций выдавали информацию о загрязнении территории металлами и углеводородными соединениями.

Для методического обеспечения работы сети в ИПГ были вначале разработаны „Временные методические указания по работам на сети контроля загрязнения природной среды на основе снежной съемки”, а затем соответствующий раздел для „Руководства по контролю загрязнения атмосферы”. Обобщение поступающих с сети материалов, расчет нагрузок атмосферных выпадений загрязняющих веществ на территории страны, регионов и особенно Арктического бассейна, расчет характеристик дальнего трансграничного переноса, построение карт осуществлялись ИПГ.

Следует подчеркнуть, что мониторинг снежного покрова обеспечивал (и обеспечивает) получение значительных объемов важной экологической информации при очень небольших затратах труда. Анализ, проведенный в 1980-е годы, показал, что средние годовые трудозатраты на отбор проб, их обработку и составление сопроводительной документации не превышал 0,05 % общих трудозатрат на метеостанциях. Затраты на аналитическое определение составляли в среднем 0,6 % трудозатрат лабораторий.

После 1991 г. в связи с объективными трудностями и сокращением наблюдательной сети Росгидромета масштабы систем мониторинга снежного покрова на территории России сократились. В настоящее время из 24 территориальных управлений Росгидромета отбор проб снега осуществляют 22. Пробы отбираются на 440 станциях и постах. Особенно остро ощущается недостаток данных по Северо-Западному и Центральному регионам, также по арктическим регионам.

Анализ поступающих с сети данных, построение карт и разработку ежегодных аналитических материалов осуществляет Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН. По данным, получаемым с сети, осуществляется оценка нагрузок атмосферных выпадений соединений серы и азота на территории

оссии в целом и ее регионов, анализ пространственных и временных тенденций изменения нагрузок.

Фоновый мониторинг (биосферные заповедники, региональные и базовые станции)

Для фонового мониторинга состояния окружающей природной среды предназначена главным образом глобальная система мониторинга, принципы которой приняты на Стокгольмской конференции ООН по окружающей среде (1972 г.) и развиты на Межправительственном совещании по мониторингу в Найроби (Кения, 1974 г.) при активном участии советских ученых.

Оптимальная программа фоновых наблюдений, удовлетворяющая национальным интересам и ГСМОС, предусматривает измерение следующих загрязняющих веществ и параметров:

— атмосферный воздух: сернистый газ, взвешенные частицы (аэрозоли), двуокись углерода, окислы азота (окись и двуокись), озон, окись углерода, реакционноспособные углеводороды, туть, содержание в аэрозолях свинца, мышьяка, кадмия, ДДТ, бенз(а)пирена, а также сульфат-ионов, натрия и хлора;

— атмосферные выпадения (осадки, снежный покров, сухие выпадения): ДДТ и другие хлорорганические соединения (ПХБ), кадмий, свинец, мышьяк, бенз(а)пирен, все анионы и катионы, рекомендуемые для определения на наблюдательных станциях ГМО (сульфаты, нитраты, хлориды, ионы аммония, кальция и др.), электропроводность, рН);

— вода водоемов (морей и рек): ртуть (включая метилртуть), мышьяк, кадмий, свинец, ДДТ и другие хлорированные углеводороды (ПХБ), бенз(а)пирен, нефтепродукты (в морях и океанах), биогенные элементы;

— почва: ртуть, свинец, кадмий, мышьяк, ДДТ и другие хлорорганические соединения (ПХБ), бенз(а)пирен, биогенные элементы;

— пищевые продукты (сельскохозяйственные культуры, трава и пр.): ДДТ и другие хлорорганические соединения (ПХБ), бенз(а)пирен, кадмий, ртуть, свинец, мышьяк.

Программа национального фонового мониторинга является более широкой, чем предусмотрено по линии ГСМОС.

По данным фонового мониторинга ИГКЭ регулярно (ежегодно) выпускается обзор фонового состояния загрязнения природных сред в стране.

Мониторинг источников загрязнения

Наряду с контролем за уровнем загрязнения природных сред весьма важным с практической точки зрения представляется мониторинг как стационарных (заводские трубы), так и подвижных (транспортные средства) источников загрязнения.

В Госкомгидромете была организована инспекция по контролю выбросов загрязняющих веществ промышленными и транспортными источниками (руководитель Ю. С. Цатуров — впоследствии первый заместитель Руководителя Службы). Были разработаны значения предельно допустимых выбросов (ПДВ) для сотен предприятий больших городов страны, а для предприятий которые смогли бы достигнуть этих норм только в течение ряда лет — временные ПДВ (ВДВ), которые действовали несколько лет, но по специально рассмотренному и утвержденному плану достигали ПДВ в срок не более трех лет. Органами Госкомгидромета регулярно осуществлялся контроль за соблюдением введенных норм. Эта работа, инициированная и развитая Гидрометслужбой страны, была передана в 1988 г. во вновь организованный Государственный комитет СССР по охране окружающей среды.

Развитие комплексного мониторинга. Состояние системы в конце 1990-х годов

Общегосударственная служба наблюдения и контроля загрязнения природной среды существовала до 1992 г. Далее она организационно видоизменилась, однако Гидрометслужба (Росгидромет) продолжала оставаться головной организацией в осуществлении национального комплексного мониторинга окружающей природной среды.

С 1992 г. подразделения Росгидромета продолжали проводить наблюдения за параметрами, характеризующими главные

образом состояние абиотической составляющей окружающей природной среды, и за гелиогеофизической обстановкой, велись работы по оперативному выявлению и анализу опасных экологическо-токсикологических ситуаций, связанных как с аварийным загрязнением природной среды, так и с выявлением возможных причин ее неблагоприятного изменения, а также включали в себя гидробиологические службы наблюдений на водных объектах суши и морях.

По состоянию на 01.01.99 г. велись следующие наблюдения*.

Наблюдения за загрязнением атмосферы проводятся регулярно в 226 городах и населенных пунктах Российской Федерации и 649 стационарных постах Росгидромета. В большинстве городов измеряются концентрации от 5 до 25 веществ.

Наблюдения за загрязнением поверхностных вод суши по гидробиологическим показателям проводятся в пяти гидрографических районах на 81 водном объекте по 170 створам. Программа наблюдений включает от 2 до 6 показателей.

Наблюдения за загрязнением морской среды по гидрохимическим показателям проводятся на 160 станциях в прибрежных районах 8 морей, омывающих территорию Российской Федерации. В отобранных пробах определяются до 24 ингредиентов.

Сеть станций наблюдения трансграничного переноса веществ организована на западную границу Российской Федерации. В настоящее время работают 3 станции: Янискоски, Пукикинские озера, Пинега. На станциях наблюдений производится отбор и анализ атмосферных аэрозолей, газов (диоксидов азота и серы) и атмосферных осадков.

Пунктами сети наблюдений за загрязнением почв являются сельскохозяйственные угодья (поля), отдельные лесные массивы и зоны отдыха (парки, пионерлагеря, санатории, дома отдыха) и прибрежных зон, расположенные на территории 9 управлений Росгидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (РГМС) и Московского Центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЦГМС). Отбор почв производится в 145 объектах, расположенных на территориях 32 субъектов РФ. В отобранных пробах определяются 22 наименования пестицидов.

*С 1992 г. приводимые данные относятся к территории собственно Российской Федерации.

Наблюдения за загрязнением почв ингредиентами промышленного происхождения на территории России проводят 8 УГМ и Московский ЦГМС. Отбор проб проводится в районе 26 населенных пунктов и заповедников. В отобранных пробах определяются до 24 ингредиентов промышленного происхождения.

Наблюдениями за загрязнением поверхностных вод суши гидрохимическим показателем охвачено 1166 водных объектов. Отбор проб проводится на 1699 пунктах (2342 створа) по физическим и химическим показателям с одновременным определением гидрологических показателей.

Сеть комплексного мониторинга загрязнения природной среды и состояния растительности (СМЗР) насчитывает 30 постов, которые располагаются на территории 11 УГМС.

Посты наблюдения организованы: вокруг крупных промышленных предприятий, где отмечаются серьезные повреждения лесов на достаточно больших площадях; в ценных лесах, отнесенных к памятникам природы; в районах ввода в действие новых крупных промышленных предприятий, выбросы которых ближайшее время могут привести к ослаблению и повреждению лесонасаждений. Наблюдения проводятся на постоянных пробных площадях.

Сеть станций, осуществляющих наблюдения за химическим составом и кислотностью осадков, состоит из 124 станций федерального уровня, отбирающих на химический анализ суммарные пробы, и 100 пунктов, на которых в оперативном порядке измеряется только величина рН. Пробы осадков на содержание от 20 до 20 компонентов анализируются в 5 кустовых лабораториях.

Система контроля загрязнения снежного покрова на территории России осуществляется на 484 пунктах. В пробах определяются ионы сульфата, нитрата аммония, значения рН, а также бенз(а)пирен, тяжелые металлы.

Система фоновый мониторинга ориентирована на получение информации о состоянии природной среды на территории Российской Федерации, на основании которой проводятся оценки прогноза изменения этого состояния под влиянием антропогенных факторов.

На территории России находятся 7 станций комплексного фоновый мониторинга (СКФМ), которые расположены в биосферных заповедниках: Баргузинском, Центральном-Лесном, Вор

ежском, Приокско-Тerrasном, Астраханском, Кавказском и лтайском.

Наблюдения за радиационной обстановкой окружающей природной среды на стационарной сети осуществляется путем:

— измерения мощности экспозиционной дозы гамма-излучения на местности (1304 пункта);

— измерения выпадений радиоактивных аэрозолей из атмосферы (402 пункта);

— измерения концентрации радиоактивных аэрозолей в приземном слое атмосферы (54 пункта);

— определения содержания трития, стронция-90 в пробах атмосферных осадков (32 пункта), морских вод (15) и пресных вод (6 пунктов).

Гамма-спектрометрический и радиохимический анализы проб объектов окружающей природной среды проводятся в специализированных радиометрических лабораториях и группах радиационный мониторинг описан в следующем разделе).

Кроме того, в системе Росгидромета на протяжении более 10 лет (с 1980-х годов) ведется работа по оперативному выявлению и расследованию опасных эколого-токсикологических ситуаций, связанных как с аварийным загрязнением природной среды, так и с выявлением возможных причин ее неблагоприятного изменения неизвестного происхождения.

За последнее десятилетие системы мониторинга состояния и загрязнения окружающей природной среды последовательно сокращались, за исключением системы фоновый мониторинг (где место 6 станций в 1994 г. в 1998 г. наблюдения велись на 7 станциях, включая Алтайскую), сети наблюдений за химическим составом и кислотностью осадков, сети системы глобального атмосферного мониторинга (БАПМОН).

Незначительно (10—15 %) сократилась сеть наблюдений за загрязнением атмосферы, загрязнением почв токсическими веществами промышленного происхождения (металлы, нефтепродукты), загрязнением снежного покрова, за радиационной обстановкой.

Значительно сократились сети наблюдений за загрязнением почв пестицидами (в 2 раза), загрязнением поверхностных вод по гидрохимическим показателям (в 2,5 раза), загрязнением морской среды (в 3—3,5 раза).

Гидробиологические наблюдения на морях ведутся в рамках других программ и освещают или отдельные моря, или районы морей, предусмотренные этими программами.

В перспективе Росгидрометом планируется также сокращение программ мониторинга загрязнения (число параметров, частота отбора проб) окружающей природной среды, которые выполняются за счет федерального бюджета. Одновременно предусматривается расширение объемов работ специального назначения, выполняемых в интересах конкретных территорий и по заказам конкретных предприятий и организаций.

По данным государственной наблюдательной сети, 1986—1998 гг. произошло снижение фоновых уровней загрязняющих веществ в атмосфере на большей части территории России, что согласуется с уменьшением выбросов в атмосферу промышленных загрязняющих веществ.

В 1998 г. на европейской части России среднегодовые концентрации свинца составили 2,7—4,0 нг/м³, кадмия — 0,15—0,36 нг/м³, двуокиси серы — 0,4—0,6 мкг/м³, двуокиси азота — 0,3—3,0 мкг/м³, бенз(а)пирена — 0,028—0,18 нг/м³ взвешенных частиц — 15—20 мкг/м³. На азиатской части, по данным фоновой станции в Баргузинском биосферном заповеднике (регион оз. Байкал), сохраняются наиболее низкие в атмосфере умеренных широт России уровни техногенных загрязняющих веществ.

Содержание загрязняющих веществ (тяжелые металлы и пестициды) в почве, растительности и поверхностных водах в фоновых районах сохранилось на уровне 1997 г.

Проблему загрязнения атмосферы в крупнейших городах определяют главным образом высокие концентрации взвешенных веществ, диоксида азота, бенз(а)пирена, формальдегида фенола.

За последние 10 лет выбросы диоксида азота снизились на 10 %, средние концентрации диоксида азота возросли на 10 %, оксида азота — на 3 %.

Выбросы оксида углерода от промышленных предприятий автомобилей снизились в этот же период на 28 %. За это же время средние концентрации СО возросли на 11 %. Рост средних концентраций СО заметен в крупнейших городах в связи с усилением автомобильного движения на автомагистралях (Воронеж

Екатеринбург, Казань, Киров, Красноярск, Москва, Новокузнецк, Новосибирск, Оренбург, Пермь, Саратов, Тюмень).

Медленно снижаются концентрации специфических веществ, что обусловлено нестабильностью работы предприятий. С 1988 г. число городов, где средние концентрации формальдегида выше ПДК, увеличилось с 22 до 30.

Среднемесячные концентрации бенз(а)пирена превышают ПДК и рекомендованные ВОЗ значения в 32 городах.

В целом за последние годы увеличился уровень загрязнения воздуха в Астрахани, Владивостоке, Волгограде, Екатеринбурге, Ижевске, Казани, Кемерово, Москве, Новосибирске, Пензе, Росове-на-Дону, Самаре, Санкт-Петербурге, Ульяновске и Хабаровке.

В настоящее время число жителей, которые эпизодически испытывают воздействие вредного вещества в количестве 10 ПДК и более, составляет 27,8 млн. человек. В некоторых городах, например в Омске, воздействие высоких концентраций является бытовым явлением. Оно связано с залповыми и аварийными выбросами нередко одних и тех же производств.

В списке с наибольшим уровнем загрязнения воздуха в 1997 г. насчитывалось 14 крупнейших городов с общей численностью населения 22,5 млн. человек: Кемерово, Красноярск, Краснодар, Липецк, Москва, Новокузнецк, Омск, Росов-на-Дону, Самара, Санкт-Петербург, Саратов, Тольятти, Ульяновск, Хабаровск.

Таким образом, несмотря на сокращение производства и проведение некоторых воздухоохраных мероприятий, проблема загрязнения атмосферы городов не только не решена, но даже обострилась. Предпринимаемые единичные меры по снижению загрязнения не дают должного эффекта. Более того, при неполной мощности работы из-за неритмичности производства сохраняются залповые и аварийные выбросы, возникают пиковые концентрации, достигающие ежегодно в одних и тех же городах 10 и более ПДК вредных веществ.

Продолжается загрязнение почв вокруг городов за счет выбросов предприятий. В 1998 г. к чрезвычайно опасной категории загрязнения тяжелыми металлами были отнесены почвы Кирогграда, к опасной категории — почвы Режа, к умеренно опасной — почвы Владивостока и Нижнего Новгорода. Почвы осталь-

ных населенных пунктов (67,5 % от числа обследованных на содержание тяжелых металлов, включая участки многолетнего накопления) относятся к допустимой категории загрязнения.

В 1998 г. обнаружено загрязнение почв на сельскохозяйственных угодьях по следующим пестицидам: суммарному ДДТ, суммарному ГХЦГ, метафосу и 2-4 Д. К наиболее загрязненным отнесены почвы на территориях Курской, Тамбовской областей на территории Приморского края. К регионам со средним загрязнением отнесены Самарская и Иркутская области, к наименее загрязненным — Курганская и Новосибирская области.

Под значительным техногенным воздействием находится 33 тыс. га лесов на европейской части страны (ЕЧС) и в Уральском регионе. Кроме того, выбросы загрязняющих веществ могут вызвать сильное ослабление или усыхание древостоев на площади от 65 до 98 тыс. га. В то же время, по сведениям ФСЛХ, 1997 г. лесные пожары уничтожили 46,4 тыс. га лесов на ЕЧР в Уральском регионе, причем основной причиной возгорания явился антропогенный фактор. Таким образом, антропогенное воздействие является основной причиной гибели лесов на европейской части страны и на Урале, причем площадь лесов, погибших от промышленного загрязнения, представляется соизмеримой с размерами повреждений, вызванных другими антропогенными факторами.

Антропогенное увеличение концентрации озона в приземном слое атмосферы в XX в. привело к уменьшению биомассы лиственных пород деревьев на европейской части России на 6,5 %.

Максимальный ущерб урожаю зерновых, наносимый озоном находится в пределах 10—12 %. Прямой эффект диоксида серы существенно ниже 1 %.

Поверхностный смыв и сбросы сточных вод в водные объекты, водный транспорт приводят к ухудшению качества поверхностных вод, нарушению водных экосистем. К формированию высоких уровней загрязнения водных объектов приводят также многочисленные аварийные ситуации на предприятиях и трубопроводах. В 1998 г. было отмечено 1535 случаев высоких уровней загрязнения на 276 водных объектах по 30 ингредиентам. На 125 водных объектах наблюдалось 507 случаев экстремально высокого загрязнения по 23 химическим веществам.

Наиболее загрязненные водные объекты расположены на территориях Центрального, Северо-Кавказского, Уральского районов, Мурманской области и Сахалина. Наиболее чистыми на протяжении многих лет остаются реки Камчатки. Наиболее высокий уровень загрязненности водных объектов в 1998 г., как и в предыдущие годы, отмечен по соединениям меди, железа, марганца, цинка, нефтепродуктам, фенолам и нитритному азоту.

Нефтепродукты являются наиболее распространенным загрязняющим веществом в водных объектах. Кроме сточных вод, они поступают в них с поверхностным стоком с городских территорий, с загрязненных водосборов с местным стоком в районах разведки и добычи нефти и газа, с водных транспортных путей, с территорий нефтепроводов в местах утечек и прорывов, в связи с чем загрязнение нефтепродуктами трудно анализировать, опираться только на статистические данные по сбросам сточных вод. Так, по данным государственной статистики, за последние 10 лет сброс нефтепродуктов в водные объекты со сточными водами снизился по крайней мере в три раза. В нижнем течении рек Волга и Лена в последние два года произошла стабилизация загрязнения нефтепродуктами в условиях повышенной и близкой к среднемноголетней водности, а для реки Обь наметилась тенденция роста загрязнения.

На нефтяных месторождениях России действуют более 248 тыс. трубопроводов различного назначения. В 1996 г. произошло более 35 тыс. аварий, связанных с нарушением герметичности трубопроводных систем. Аварийность связана также с эксплуатацией устаревшего бурового и нефтегазопромыслового оборудования, применением устаревших технологий бурения и добычи. В результате уровень загрязненности поверхностных вод России нефтепродуктами продолжает оставаться высоким. В поверхностных водах всех гидрографических районов концентрации нефтепродуктов превышают не только предельно допустимые значения, но в отдельных пробах и 10 ПДК. Наиболее высокие концентрации, порядка 30, 50 и 100 ПДК, наблюдались в последние годы в поверхностных водах Баренцева, Карского и Восточно-Сибирского гидрографических районов.

На большей части водных объектов страны за последние четыре года наметилась тенденция к стабилизации уровня загрязненности, за исключением рек юга ЕЧР, где в годы пониженной

водности наблюдается рост загрязненности по отдельным химическим веществам.

К 1998 г. в водных объектах России произошло уменьшение загрязненности воды практически всеми пестицидами, за исключением ДДТ и ПХБ. Наметилась четкая тенденция к уменьшению содержания ХОП, что обусловлено резким сокращением их применения в сельскохозяйственном производстве.

Тем не менее качество вод основных рек — Волги, Дона, Кубани, Оби, Енисея, Амура, Лены и Печоры — в последние годы по данным государственной наблюдательной сети, характеризовалось как „слабо загрязненные” — „грязные”, а их крупные притоки — Оки, Камы, Томи, Иртыша, Тобола, Миасса, Исети Туры — как „чрезвычайно грязные”.

Преобладающая часть стока химических веществ, так же как и речного стока, приходится на моря Северного Ледовитого океана и прежде всего на бассейны Баренцева и Карского морей. Наибольший объем выноса химических веществ природно-антропогенного происхождения приходится на минеральные или органические вещества, кремний и биогенные вещества. Среди веществ антропогенного происхождения наибольший объем выноса характерен для нефтепродуктов. Более 80 % общей массы выносимых с речным стоком веществ приходится на минеральные соли. По-прежнему наиболее чистыми морями в России являются моря Северного Ледовитого океана.

В 1998 г. отмечено улучшение качества морей Тихого океана и Азовского моря. Незначительно улучшается качество прибрежных вод Черного моря.

За последние 3 года наметилось ухудшение качества вод Каспийского моря на Дагестанском взморье и в открытой части Среднего Каспия.

В 1998 г. подразделениями Росгидромета продолжалось исследование состояния окружающей природной среды Российского сектора Арктики. Средний уровень нагрузок атмосферных выпадений, характеризующий региональный фон, в точках за пределами ближайшего следа промышленных объектов городов Печенга-Никель, Мончегорск и Норильск был значительно ниже уровней нагрузок на площадях европейской и азиатской части России. Критические нагрузки кислотообразующих соединений серы и нитратного азота были превышены только по сере

50-километровой зоне от источников выброса на Кольском полуострове и в г. Норильске. В этих районах наблюдается эффект нейтрализации кислот ($pH = 6,0-6,8$). В целом в арктических районах России отсутствуют ярко выраженные тенденции к закислению зимних осадков на больших территориях. Фрагментарно, в виде отдельных пятен, закисление фиксируется в восточной части Кольского полуострова и на Ямале.

Исследование прибрежных вод арктических морей, побережий полуостровов Ямал и Югорский и устьевых участков рек Печора, Хатанга, Анабар показало, что содержание загрязняющих веществ в морских водах, почвах, растительности, тканях и органах птиц и животных довольно низкое. В природных средах содержание загрязняющих веществ не выходило за пределы регионального фона. В устьевых участках рек отмечалось повышенное содержание фенолов и железа, в несколько раз превышающее ПДК. Этот факт можно отнести скорее к повышенному природному фону для этих веществ, что требует, однако, дополнительных исследований. Превышение ПДК по нефтепродуктам было зафиксировано у населенных пунктов на реках Печора, Хатанга и Анабар. Учитывая уязвимость арктической природной среды и усиление в перспективе антропогенной нагрузки в связи с дальнейшим расширением разведки и добычи полезных ископаемых в шельфовой зоне, необходимо продолжить мониторинговые наблюдения и экспедиционные обследования в этом регионе страны.

В заключение следует отметить, что спад производства во всех отраслях хозяйства РФ не привел к существенному улучшению качества окружающей природной среды в целом по стране.

Анализ мониторинговых данных за десятилетний период показал отсутствие прямой корреляции между снижением объемов промышленного и сельскохозяйственного производства и загрязнением окружающей природной среды.

За последнее десятилетие в Российской Федерации изменилась структура хозяйственной деятельности. В промышленности основная доля продукции приходится на добывающие отрасли, наиболее экологически грязные, оказывающие негативное воздействие практически на все природные среды.

В городах, где проживает большая часть населения, основным источником загрязнения атмосферного воздуха при сниже-

нии выбросов от стационарных источников становится автотранспорт (значительное увеличение транспортного парка и его старение).

В сельскохозяйственном производстве ликвидация крупных хозяйств (колхозов и совхозов) привела к снижению масштабов мелиоративных мероприятий (главным образом „сухих” мелиораций), что в значительной мере способствовало росту поверхностного смыва с сельскохозяйственных угодий. Тенденция снижения содержания пестицидов (ДДТ, ПХБ, ХОП) в водных объектах и почвах, зафиксированная мониторинговыми данными, связана с сокращением их поставок и применения.

По данным государственной статистики, в последние годы объемы сточных вод и сбросы загрязняющих веществ существенно снизились, на большей части водных объектов страны (за исключением юга России) наметилась тенденция к стабилизации уровней загрязнения. Однако они остаются по-прежнему довольно высокими. Формирование высоких уровней загрязнения водных объектов в значительной мере связано с неэффективной работой очистных сооружений, растущим числом аварий на производств, трубопроводах, транспорте, а также с нерегламентированным поверхностным смывом с урбанизированных и сельскохозяйственных территорий и транспортных магистралей. Мониторинговые данные показывают, что роль этих источников значительно повысилась.

Ежегодно Росгидромет (головная организация — ИГКЭ) подготавливает и выпускает „Обзор загрязнения природной среды Российской Федерации”.

Завершая очерк, следует отметить участие Гидрометслужбы в обосновании и реализации крупных проектов.

Гидрометслужба обеспечила активное участие подведомственных НИУ (ИПГ, ГТО, ГТИ, ГХИ, ИЭМ, ЛАМ-ИГКЭ и др.) республиканских и территориальных управлений в обосновании и реализации крупных проектов в плане охраны окружающей природной среды.

Среди указанных проектов, выполнявшихся в течение ряда лет по партийно-правительственным постановлениям, к наиболее важным относятся работы в районах музея-усадьбы Л. Н. Толстого „Ясная Поляна”, Канско-Ачинского топливно-энергетического комплекса (КАТЭК), озера Байкал, Байка

ло-Амурской магистрали (БАМ), а также на магистральных газопроводах Западной Сибири и Крайнего Севера и др.

Авторы выражают благодарность Нине Константиновне Гасиловой за помощь в работе по подготовке очерка.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие (А. И. Бедрицкий, Е. П. Борисенков)	1
Организационные преобразования Гидрометеорологической службы в послевоенный период (Е. П. Борисенков).	11
Методы и технические средства метеорологических наблюдений и исследований (Д. П. Беспалов)	27
Гидрологические наблюдения и исследования (А. А. Соколов, В. С. Вуглинский)	61
Совершенствование методов и практики гидрометеорологических прогнозов (Л. В. Беркович, Р. М. Вильфанд, А. В. Муравьев, Ю. Д. Реснянский, В. П. Садоков, И. Г. Ситников, Д. М. Сонеч- кин, А. В. Фролов, Н. П. Шакина)	101
Исследования в Мировом океане, морях и устьях рек (А. С. Василь- ев, Ф. С. Терзиев, В. Н. Михайлов, А. Д. Нелезин, Е. И. Ласто- вецкий, В. П. Тунеголовец)	171
Развитие наблюдений и исследований в области сельскохозяйствен- ной метеорологии (А. Д. Клещенко, И. Г. Грингоф)	211
Работы по активным воздействиям на гидрометеорологические про- цессы (И. И. Бурцев)	241
О развитии отечественной метеорологической радиолокации (Г. Б. Брылев, В. Д. Степаненко, Г. Г. Шукин)	261
Спутниковые методы гидрометеорологических наблюдений и иссле- дований (А. Б. Успенский, Л. А. Анисеева, М. В. Бухаров, И. Р. Егорова, В. А. Кровотынцев, Н. В. Хохлова).	271
Солнечно-атмосферные исследования и развитие гелиогеофизи- ческой службы (С. И. Авдюшин, Г. Ф. Тулинов, П. М. Свид- ский, В. В. Михневич)	311
Становление и развитие работ по мониторингу окружающей среды (Ю. А. Израэль, А. И. Бедрицкий, Ю. С. Цатуров, В. В. Челю- канов).	331

ГИДРОМЕТЕО



ИЗДАТ

Санкт-Петербург

Уважаемые читатели!

Вы можете приобрести книги, выпускаемые
ФГУП «Гидрометеоиздат», в интернет-магазине
научно-информационного портала

GIMIZ.RU

Контактная информация:

тел/факс: (812) 352-08-15, 352-08-25

e-mail: gimiz@peterlink.ru

pr@gimiz.ru

Монография

**ОЧЕРКИ ПО ИСТОРИИ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ РОССИИ**

Том 3

Книга 1

Редакторы *Л. К. Сурыгина, О. М. Федотова*. Художник *Л. А. Унрод*.
Технический редактор *Н. Ф. Грачева*. Корректор *Г. Н. Римапт*.

ЛР № 020228 от 10.11.96 г.

Подписано в печать 24.11.05. Формат 60 × 84^{1/16}. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 25,5 с вкл. Усл. печ. л. 23,72. Уч.-изд. л. 23,15. Тираж 1000 экз.

Индекс 387/05.

Гидрометеоиздат. 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38.

Официальный научно-информационный портал **GIMIZ.RU**

Типография Издательства СПбГУ.
199061, С.-Петербург, Средний пр., 41