

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

---

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ВОПРОСЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ В ЦЕЛЯХ  
ИНТЕНСИФИКАЦИИ НАРОДНОГО  
ХОЗЯЙСТВА

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени М. И. КАЛИНИНА

ЛЕНИНГРАД  
1987

T 18

УДК 551.5+551.46+556

Вопросы эффективности гидрометеорологических исследований в целях интенсификации народного хозяйства. Сборник научных трудов. — Л., изд. ЛПИ 1987, вып. 96, с. 172. (ЛГМИ).

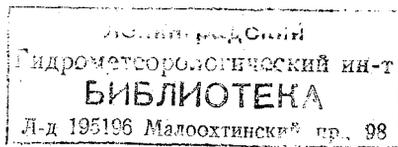
Излагаются результаты основных научных исследований, направленных на гидрометеорологическое обеспечение отраслей народного хозяйства в целях его интенсификации.

Сборник рассчитан на широкий круг гидрометеорологов.

Табл. 16. Илл. 43. Библ. 211.

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

**Н. П. СМЕРНОВ** (отв. редактор), **Ю. В. СУСТАВОВ**, **И. Г. МАКСИМОВА**,  
**И. П. СПИЦЫН**, **Г. Г. ТАРАКАНОВ**.



## ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ ЛЕНИНГРАДСКОГО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА И ЗАДАЧИ РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

В научных исследованиях, проводимых Ленинградским гидрометеорологическим институтом, за последние 10 лет сформировались три основных направления.

1. Исследование атмосферных процессов и явлений в целях совершенствования методов анализа и прогноза погодных условий, оценка возможных изменений климата под влиянием естественных и антропогенных факторов в интересах обеспечения народного хозяйства и охраны окружающей среды.

2. Теоретические и экспериментальные исследования взаимовязи гидрометеорологических процессов в энергоактивных и биопродуктивных районах Мирового океана и их влияние на биологическую продукцию; разработка методов расчета и прогноза элементов гидрологического режима и биопродуктивности.

3. Изучение динамики водных ресурсов и состояния водных объектов в естественных условиях и условиях антропогенного воздействия с целью создания системы наиболее рационального использования и охраны поверхностных вод.

В небольшой статье не представляется возможным осветить все полученные результаты и те задачи, которые поставлены перед членами ЛГМИ, поэтому остановимся лишь на главных, представляющих, на наш взгляд, наибольший теоретический и практический интерес.

По первому направлению наиболее существенные результаты достигнуты в области изучения термодинамики необратимых фазовых переходов и сопровождающих их электрических и электромагнитных процессов. В частности, было обнаружено новое, неизвестное ранее, явление нетеплового радиоизлучения при сходе снежных лавин. Аналогичное явление обнаружено при деформации горных ледников, морских и озерных льдов и других ледяных покровов. Полученные результаты имеют большое народнохозяйственное значение в связи с возможностью обнаружения и предупреждения опасных явлений природы, обеспечения выбора оптимальных путей судов во льдах и т. д.

Обнаружено также неизвестное ранее предгрозовое радиоизлучение, на основе чего разработаны новые методы активно-пассивной радиолокации облачности, а также методы борьбы с грозой.

Эти исследования открывают возможности обнаружения опасности в грозовом отношении областей, что повышает безопасность полетов воздушных судов.

Результаты исследований атмосферного электричества используются при разработке системы молниевой защиты различного рода технических объектов. Разработан и опробован в лабораторных и природных условиях принципиально новый метод защиты.

К работам данного направления примыкают исследования электрических явлений при деформационно-кристаллизационных процессах, на основе которых разработано новое представление о электрокоррозии движущихся конструкций во льдах. Полученные результаты подтверждены экспериментально как в лабораторных условиях, так и в эксперименте на атомном ледоколе «Арктика» и на их основе разрабатываются новые методы защиты от электрокоррозии ледоколов и других судов, предназначенных для плавания в тяжелых ледовых условиях.

В последнее время в авиации и ракетостроении возникла проблема так называемого «электрического барьера». При полете в облаках и осадках современный самолет становится интенсивным электрическим генератором. Помимо того, что самолет становится «провокатором» молниевых разрядов даже в негрозовых облаках, на генерацию статического электричества начинает расходоваться значительная доля энергии двигателей самолета. На базе проведенных в ЛГМИ лабораторных исследований найдены материалы, существенно снижающие электризацию тел при больших скоростях. Разработан макет индикатора электрически опасных зон в облаках, который в настоящее время проходит летные испытания.

В перспективе поставлена задача создания теории термодинамически необратимых атмосферных процессов, направленно в частности, на разработку методов автоматизированных сверхкраткосрочных прогнозов и частичного, экологически целесообразного предотвращения опасных природных явлений.

В области методов активно-пассивной радиолокации природных явлений осуществляется переход с наземных полигонов на самолеты и морские суда. Рассматриваются возможности применения этих методов на искусственных спутниках Земли.

Другим традиционным участком исследований являлась разработка новых методов прогноза погоды различной заблаговременности.

В целях повышения качества метеообеспечения народного хозяйства Северо-Западного региона в институте разрабатывались расчетные методы краткосрочного прогноза основных метеопараметров и явлений, основанные на комплексном использовании синopticических, гидродинамических и статистических способов для получения прогностических зависимостей. Установлены широкие возможности использования результатов численного прогноза геосферных процессов.

тенциала и вертикальных движений, как одного из основных факторов в синоптико-статистических схемах прогноза ветра, температуры, облачности, осадков, гроз. Показана необходимость эта при прогнозе орографических вертикальных токов даже в условиях сравнительно гладкого рельефа Северо-Запада ЕТС. Установлена возможность предварительной оценки синоптиком качества численного прогноза поля давления на следующие сутки, что позволяет определить степень доверия к нему или необходимость разработки прогноза синоптического положения другими лицами. Разработаны новые методики локального прогноза температуры, гроз, облачности, экстремальных температур, осадков, заморозков для ряда районов Ленинградской области. Разработана и внедрена в Ленинградском гидрометеорологическом центре автоматизированная система расчетов обложных и ливневых осадков. Разработаны методики расчета экономического эффекта использования прогнозов температуры для оптимизации работы тепловых электростанций и заморозков в сельскохозяйственном производстве.

Проведены работы по изучению циркуляционного режима атмосферы над рядом океанических акваторий. При этом основное внимание уделялось Атлантическому и Индийскому океанам. Для этих акваторий разработаны методы долгосрочных (от месяца до сезона) прогнозов давления и температуры воздуха. Эффективность прогностических методов оценивалась на практике путем составления и выдачи потребителю (предприятиям Минрыбхоза) оперативных опытных прогнозов аномалий температуры и давления по рыбопромысловым районам.

Признание промысловиков получил и разработанный на основе анализа факсимильной оперативной и прогностической информации метод прогноза элементов погоды на шестидневку, который прошел успешную оперативную проверку в двух рейсах УЭС ГМИ «Профессор Сергей Дорофеев».

В области разработки метеорологических прогнозов перед институтом стоит задача совершенствования методов локальных краткосрочных прогнозов погоды для Северо-Запада СССР и уточнения физических основ долгосрочных и сверхдолгосрочных метеорологических прогнозов для рыбопромысловых районов Мирового океана.

В целях гидрометеорологического обеспечения Продовольственной программы в институте проведены исследования в направлении разработки методики прогноза перезимовки озимых сельскохозяйственных культур на основе учета осенне-зимних метеорологических условий, в том числе для районов Поволжья и Западной Сибири. Методика успешно прошла оперативные испытания в Гидрометцентре СССР.

Для исследования радиофизических характеристик атмосферы созданы комплексы математических моделей, позволяющих рассчитать структуру приводного слоя и основные параметры атмосфер-

ного пограничного слоя над океаном. Произведена поэтапная проверка теоретических моделей на основе имеющихся экспериментальных данных. Разработана и апробирована в экспедиционных условиях практическая методика расчета основных параметров приводного слоя по данным стандартных судовых гидрометеорологических измерений. Методика в настоящее время внедрена в нескольких организациях СССР.

На основе собранного архива климатической информации с помощью разработанных теоретических моделей рассчитаны климатические характеристики основных параметров атмосферного пограничного слоя над океаном и создан Радиоклиматический атлас Мирового океана.

Разработанные комплексы теоретических моделей расчета структуры приводного и пограничного слоев над океаном включены в виде дополнительных программных блоков в применяемую в настоящее время оперативную полусферную модель Гидрометцентра, с помощью которой может быть дан краткосрочный прогноз всех необходимых параметров атмосферного пограничного слоя над акваторией Мирового океана северного полушария. Проведены авторские испытания модели прогноза и намечен цикл исследований по повышению успешности такого рода прогнозов.

В области изучения озоносферы исследования проводились в направлении разработки методов контактных измерений концентрации озона, дистанционных (спектроскопических) методов общего содержания озона и разработки численных моделей озоносферы. В институте сформирован обширный массив данных измерений концентраций тропосферного озона с помощью электрохимического озонзонда.

Созданные в ЛГМИ фотохимические модели атмосферы используются для оценки реакции озоносферы на возможные сценарии ядерного конфликта и вулканические извержения различной мощности. В ближайшее время планируется завершение работы над глобальной моделью связи распределения озона и других оптически активных атмосферных газов с элементами крупномасштабной динамики и термического режима для прогноза оптической обстановки и интерпретации данных космического зондирования.

В институте в 1981—1985 гг. создан уникальный архив спутниковых данных о глобальном поле облачности за 15 лет и сделан анализ этой информации для построения моделей формирования крупно- и мезомасштабных полей облачности, температуры и давления.

Установлены связи и зависимости глобального поля облачности от полей температуры, давления и скорости ветра. Построена модель, позволившая доказать определяющую роль крупномасштабных вертикальных движений в формировании полей не только слоистообразной, но и конвективной облачности. На основе установленных закономерностей объяснены особенности пространствен-

эго распределения и годовых колебаний количества облаков на материках и океанах.

Дальнейшее развитие этих работ предполагает параметризацию полей облачности и влажности в численных схемах прогноза погоды и климата, разработку моделей формирования и прогноза облаков в различных районах Земли, получение структурных характеристик облаков различного размера с помощью космических средств, обеспечивающих высокое разрешение.

Из наиболее значительных результатов в области океанологических исследований следует отметить проведение фундаментальных исследований процессов взаимодействия океана и атмосферы в энергоактивных зонах северного полушария. Разработана физико-статистическая модель крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы для Атлантико-европейского сектора северного полушария. Получены физически обоснованные статистические связи, описывающие влияние теплообмена между океаном и атмосферой, штормового перемешивания, радиационного охлаждения и адвекции на формирование длительных аномалий температуры воды в Ньюфаундлендской и Норвежской энергоактивных зонах. Изучено влияние аномалий температуры поверхности воды в Северной Атлантике на образование аномалий атмосферной циркуляции и неблагоприятных явлений погоды (засухи) для европейской территории СССР.

На этой основе разработан метод прогноза температуры воды Норвежской энергоактивной зоне с заблаговременностью от 2 до 4 месяцев. Атмосферный блок модели позволяет прогнозировать аномалию температуры воздуха над Европейской территорией СССР в сезонах лета и зимы.

Совместно с Арктическим и Антарктическим институтом завершены исследования, подводящие итог широкомасштабного экспериментального изучения водных масс и циркуляции Южного океана. Результаты этих исследований представляют важный вклад в изучение Мирового океана.

В 1985 г. завершен также многолетний труд по созданию Атласа Антарктики, для которого институтом составлено более 100 карт различных гидрологических характеристик.

Учитывая огромное значение Южного океана как источника пищевых ресурсов, поставлены задачи на основе теоретических и экспериментальных исследований создать прогностическую модель экосистемы Южного океана. Из прикладных задач изучения Южного океана следует отметить и создание системы комплексного оперативного гидрометеорологического обеспечения промысловых работ и транспортных операций в Антарктике. Помимо прикладных задач поставлены и задачи изучения его как океана, играющего основную роль в формировании глобальной циркуляции Мирового океана и в энергетическом взаимодействии океана с атмосферой. Среди них следует отметить изучение процессов формирования вод антарктического происхождения и фронталь-

ных зон как источников их образования и теплообмена Южного океана на его границах за счет переносов антарктических вод к северу и атлантических вод, а также вод другого происхождения, к югу.

В области взаимодействия океана с атмосферой поставлена общая задача изучения теплообмена между ними в масштабах всего Мирового океана и оценки роли и значения отдельных энергоактивных районов в изменении погодных и климатических условий в целом для Земли и ее отдельных территорий. Результаты этих исследований должны послужить основой для разработки долгосрочных прогнозов погоды и климата.

В 1981—1986 гг. выполнены фундаментальные исследования закономерности изменчивости вертикальной термохалинной структуры верхнего слоя океана. Сформулирован комплекс математических моделей, описывающих изменчивость структуры на отдельных масштабах. Путем численных экспериментов установлены закономерности формирования вертикальной термохалинной структуры, показана взаимообусловленность ее изменчивости на различных масштабах. На этой основе разработаны способы параметризации изменчивости термохалинной структуры по каскаду масштабов.

Полученные результаты расширяют существующие представления о механизмах перераспределения тепла и солей в верхнем слое океана, а разработанные модели будут использоваться для диагностирования и прогнозирования полей температуры и солености воды в верхнем слое океана на различные сроки.

На основе численного моделирования разработана и реализована методика оценки опасности цунами от удаленных очагов для дальневосточного побережья СССР. В результате изучения механизма наката цунами на берег разработан ряд моделей, в том числе с учетом вертикальной неоднородности потока, что позволило дать рекомендации по проектированию и строительству в прибрежной цунамиопасной зоне.

В дальнейшем планируется исследование волноводных и резонансных свойств Курило-Камчатской зоны с целью оптимизации создаваемой в настоящее время единой автоматизированной системы службы цунами.

Разработана методика прогностического расчета ожидаемых изменений приливного режима при сооружении и работе крупных приливных электростанций (ПЭС). Методика реализована применительно к проектам Мезенской и Пенжинской ПЭС путем создания гидродинамических моделей. На основе численных экспериментов произведена корректировка ожидаемых напоров на плотине, сделаны рекомендации по определению оптимального числа агрегатов, их расположения и режима работы. Расчет ожидаемых изменений приливного режима на базе разработанной методики предложен в качестве обязательного этапа проектирования крупных ПЭС, необходимого для оценки мощностных характеристик

танции и возможных экологических последствий. Дальнейшая работа направлена на применение прогностического моделирования приливных энергетических ресурсов дальневосточного региона в соответствии с долгосрочной программой его развития.

Сформулирована крупномасштабная математическая модель формирования гидрологических процессов пелагической части моря. Модель позволяет изучать изменчивость полей температуры, солёности, течений и ледовых условий в море в результате естественных изменений определяющих факторов, а также антропогенных воздействий. В настоящее время эта модель положена в основу создаваемой оперативной прогностической модели Белого и Балтийского морей.

Разработан полуэмпирический метод расчета газообмена между океаном и атмосферой с учетом фактического состояния поверхности моря при различных скоростях приземного ветра. Впервые построены среднесезонные карты распределения кислорода, рН,  $\text{PCO}_2$  и других параметров газообмена по акватории Мирового океана. В пятиградусном масштабе осреднения исходных данных вычислены современный ежесезонный и годовой бюджеты обмена  $\text{O}_2$  и  $\text{CO}_2$  между океаном и атмосферой. Показано, что по кислороду обмен между океаном и атмосферой находится в состоянии, близком к равновесию. В обмене  $\text{CO}_2$  Мировой океан служит стоком этого газа из атмосферы, ежегодно поглощая около 60% массы  $\text{CO}_2$ , поступающего от сжигания ископаемого топлива, или около 40% от суммы всех антропогенных выбросов. Анализ многолетних рядов гидрохимических наблюдений в Атлантическом океане позволил выявить тенденции в изменчивости обмена  $\text{CO}_2$  под влиянием различных антропогенных факторов, и с учетом сценариев развития мировой энергетики составить прогноз содержания  $\text{O}_2$  и  $\text{CO}_2$  в океане и атмосфере до 23-го столетия. По этим расчетам к началу 23-го столетия масса  $\text{O}_2$  в атмосфере и океане уменьшится на 1%, а содержание  $\text{CO}_2$  увеличится в 3,8 раза.

В дальнейшем перед гидрохимиками института поставлена задача разработки промысловой гидрохимии океана. Необходимо изучить процессы, формирующие химическую основу первичной продуктивности океана: потребление и регенерацию биогенных веществ и микроэлементов, круговорот углерода, баланс растворенных газов. Эти исследования совместно с другими исследованиями в области промысловой океанологии имеют единую цель — построение комплексных математических моделей экосистем в промысловых районах океана.

Разработана в институте и физическая теория формирования гидрологического режима морей с различными характерами водообмена с океаном. На ее основе разработан метод долгосрочного и сверхдолгосрочного прогноза тепловых условий Баренцева моря, получивший признание. Общность закономерностей и сопряженность процессов позволили перенести технологию метода на Нор-

вежское море, по которому в настоящее время имеется возможность давать фоновые прогнозы.

Указанные результаты позволили подвести определенный итог в изучении физических и химических процессов в Мировом океане и разработать научные основы программы комплексного изучения взаимосвязи процессов в энергоактивных и биопродуктивных районах Мирового океана, которая сочетает исследования, направленные на получение фундаментальных теоретических и прикладных результатов для различных отраслей народного хозяйства, и включена как самостоятельное задание в программу ГКНТ «Мировой океан» под названием «Проект Система», являясь основой для кооперации специалистов всех факультетов и определяя направленность исследований института на длительную перспективу.

Среди наиболее значительных результатов третьего направления, развиваемого в основном на гидрологическом факультете, следует отметить следующие.

Разработано новое стохастическое направление в гидравлике, в котором традиционные динамические модели речной гидравлики и модели процессов формирования стока обобщены с использованием наиболее общих статистических закономерностей. Применение функционального анализа и статистической механики позволило предложить набор стохастических дифференциальных уравнений отдельных звеньев процесса формирования речного стока. Разработанное направление оказалось очень эффективным, так как позволило выявить ряд новых закономерностей и решить комплекс практических задач инженерной гидрологии. В частности, установлены условия, при которых в потоках имеют место автоколебания, что в свою очередь открывает широкие возможности для разработки теории русловых процессов. В рамках нового направления выявлен общий подход к стохастическому оцениванию состояния гидрологических систем, при котором комплексно решаются задачи дискретизации и выбора методов измерений.

Выполнены теоретические работы по гидрологическим проблемам водосберегающей технологии и программированию урожая на мелиорируемых полях. Разработки показали, что в совершенствовании и упорядочении нормирования орошения кроется существенный резерв повышения урожайности. Это совершенствование касается производства поливов строго определенными дозами в нужные сроки с учетом наличных влагозапасов почвы, водоисточника, погодных условий и изменения водопотребности культуры в онтогенезе. Полученные результаты позволяют подвести научную основу под методику программирования урожайности.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования изменений гидрогеологической обстановки в зоне двух промышленных комплексов. Результаты работ позволили сформулировать основные направления антропогенного влияния на природные

воды первого водоносного горизонта и рекомендовать внедрение малоотходных технологических процессов.

Почти три десятилетия в институте ведутся исследования по проблеме взаимодействия русловых и пойменных потоков. Создана типизация процессов их взаимодействия, на основе которой разработаны методики расчетов пропускной способности русел с поймами.

Глобальной задачей дальнейших исследований на гидрологическом факультете является интеграция результатов выполненных разработок в рамках системного анализа процессов наземной ветви гидрологического цикла. Гидрологический объект предполагается рассматривать как природно-техническую систему, для которой можно сформулировать три группы задач: оценка текущего состояния системы, прогноз ее развития (естественного или обусловленного антропогенными воздействиями), управление. Решение этих задач потребует разработки информационно-совместимых математических моделей отдельных звеньев гидрологического цикла (поверхностный сток, русловой сток, ненасыщенная зона, насыщенная зона, напорные горизонты). Информационная совместимость моделей предполагает, что они должны быть моделями одного класса. Так как оценка состояния системы производится дискретно (по пространству и по времени) с помощью технических средств, обладающих погрешностью измерения, то она может быть дана только в вероятностном смысле. Поэтому прогностическая и управленческая модели должны быть стохастическими, учитывающими вероятностный характер начального состояния исследуемого водного объекта, которое определяется при решении задачи оценивания.

В то же время используемые в гидрологии математические модели формирования стока являются детерминистическими, хотя методы гидрологических расчетов, основанные на использовании эмпирических рядов расходов воды — статистические. Объединение необходимых и случайных закономерностей формирования стока в рамках стохастических моделей для отдельных звеньев гидрологического цикла в единую систему, разработка на их основе дискретных прогностических и управленческих моделей и решение конкретных задач инженерной гидрологии — основная направленность исследований гидрологического факультета в рамках третьего направления на ближайшие годы.

В институте за последние годы проведены также работы по изучению крупномасштабного водного баланса ЕТС путем совместного анализа атмосферной и наземной ветвей гидрологического цикла. Такой подход представляет собой основу нового перспективного направления в гидрологии — крупномасштабной гидрологии. Он позволяет и в научном, и в практическом отношении существенно расширить представления о закономерностях гидрологического цикла при больших пространственных и временных масштабах осреднения. Так, использование аэрологической ин-

формации позволило получить для площадей больше  $10^6$  км<sup>2</sup> надежные оценки общего увлажнения, суммарного испарения и суммарных изменений запасов поверхностных и подземных вод, которые традиционными методами определяются с большими погрешностями. В результате такого подхода разработана прогностическая схема стока крупных рек, основанная на данных стандартной сети аэрологических станций, а также малопараметрическая модель водного баланса атмосферы, предназначенная для фонового прогноза речного стока на базе приземных метеорологических данных. На примере бассейна Волги получены конкретные прогностические зависимости для годового измеренного и весеннего восстановленного стока с высокой оправдываемостью.

Полученные результаты позволяют разработать автоматизированную систему крупномасштабного водного баланса, которая позволит оперативно информировать потребителей о состоянии водных ресурсов и их изменении под влиянием климатических и антропогенных факторов.

Одной из наиболее важных задач на ближайшую перспективу является создание общей теории глобального гидрологического цикла на основе уравнений баланса атмосферной, наземной, океанической и криосферной ветвей гидрологического цикла.

Таким образом, в институте за последние 5—10 лет создана хорошая база для развития и интенсификации научных исследований, повышения их качества и практической отдачи. При этом приоритетным остается развитие фундаментальных исследований в области физики атмосферы, океана и вод суши, что позволяет институту активно работать в прикладных областях гидрометеорологии. Основные результаты исследований, о которых речь шла выше, представлены в монографиях последних лет, написанных авторами института, опубликованы в докладах академии наук, академических и отраслевых журналах, трудах ЛГМИ и зарегистрированы в виде изобретений.

УДК 551.322

*Л. Г. КАЧУРИН, В. Ф. ПСАЛОМЩИКОВ*

## **НЕТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ — ПРЕДВЕСТНИКИ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ**

Одной из основных проблем наук о Земле является прогнозирование опасных природных явлений. Несмотря на существенный прогресс в этой области исследований, количество жертв во время стихийных бедствий остается недопустимо большим. Редкий тай-

фун обходится без погибших; снежная лавина в 1962 г. в Перу унесла 5 тысяч жизней; при землетрясении 1976 г. в Китае число жертв достигло сотен тысяч; столкновение в тумане двух самолетов на Канарских островах в 1977 г. привело к гибели 811 человек. Астрономических сумм достигает и материальный ущерб.

Как известно, значительная часть территории СССР находится в сейсмоопасных и в лавиноопасных зонах. Железные дороги Кавказа и Сибири (в том числе и БАМ) оказываются в зоне действия обоих этих факторов, а большая часть морских водных путей проходит в северных районах, где часты сжатия и торошения ледовых покровов акваторий. На Дальнем Востоке, кроме того, наблюдаются извержения вулканов, тайфуны, цунами, оползни.

Существующие методы борьбы с опасными природными явлениями можно разделить на активные и пассивные. Разумеется, пока нет возможности предотвратить землетрясение или извержение вулкана (более реальными являются возможности их провоцирования), но против лавин, града и некоторых других опасных природных явлений предложены и в ряде случаев успешно реализуются активные методы борьбы. Однако подобное воздействие может достичь цели лишь на ранних стадиях развития процессов. Главной проблемой в связи с этим становится краткосрочное (сутки, часы, иногда даже минуты и секунды) прогнозирование опасных природных явлений. Прогноз сам по себе это пассивный метод борьбы, однако он предоставляет возможность подготовиться, устранить эффект внезапности.

Как известно, любой процесс проходит стадии подготовки разной степени длительности, которые, как правило, сопровождаются увеличением его энергетического потенциала. И если удастся получить непрерывную информацию о происходящих в нем изменениях, то появляется возможность обнаружить его наиболее опасную стадию с требуемой заблаговременностью и предсказать его тенденцию.

Рассмотрим, к примеру, землетрясения, сход лавин, грозу, град, катастрофические ливни и снегопады. На первый взгляд между этими явлениями мало общего. Однако изучение физических механизмов, приводящих к нарушению первоначальной устойчивости, показало, что во всех этих случаях мы сталкиваемся с кристаллизационно-деформационными процессами в твердых телах, будь то горная порода, снежный покров или кристаллизующаяся вода в облаке. А как показали экспериментальные наблюдения, при переходе от упругой деформации к пластической, а тем более — к хрупкому разрушению, в твердом теле возникают процессы, сопровождающиеся генерацией акустической эмиссии, электрических и электромагнитных полей. Последние представляют для нас наибольший интерес, так как могут быть обнаружены дистанционно существующими радиофизическими методами

Еще в 50—60-х годах в ЛГМИ были выполнены исследования термодинамически необратимых кристаллизационных процессов и сопровождающих их импульсных электрических полей [1, 2]. Предполагалось, что подобный процесс реализуется в кучево-дождевых облаках. При резком охлаждении свободно подвешенной капли процесс кристаллизации начинался с поверхности капли, и фронт кристаллизации продвигался внутрь капли, сжимая жидкое ядро. Это приводило к интенсивной деформации и последующему быстрому разрушению закристаллизовавшейся оболочки капли. При этом фиксировался интенсивный всплеск электрического поля (рис. 1).

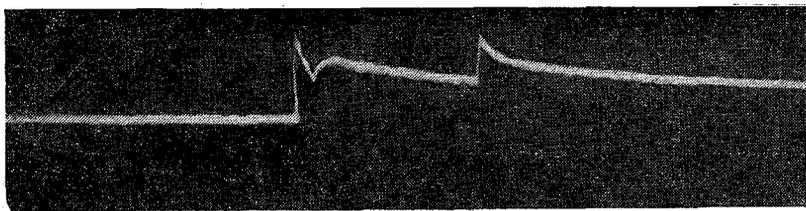


Рис. 1. Оциллограмма импульсного электрического поля, возникающего при взрывообразном раскалывании кристаллизующейся капли воды.

В последующие годы аналогичные лабораторные эксперименты были проведены в разных модификациях в целом ряде стран. Обобщая полученные результаты, можно сделать вывод, что интенсивность электризации является экстремальной функцией массы кристаллизующейся воды и скорости кристаллизационного процесса, зависящей, в свою очередь, от температуры и других факторов.

В ходе дальнейших исследований для широкого класса растворов была получена, кроме того, универсальная зависимость интенсивности кристаллизационно-деформационной электризации от величины рН исходного кристаллизующегося раствора [2]. При изучении энергетических характеристик было показано, что кристаллизационный механизм генерации зарядов является наиболее мощным механизмом электризации. Его удельная производительность достигает  $10^{-2}$ — $10^{-1}$  Кл/кг закристаллизовавшейся воды. В работе [3] была развита теория явления и было показано, что на фронте кристаллизации наблюдается аномально большое значение диэлектрической проницаемости в тонком кристаллизующемся слое, что обуславливает ряд радиофизических эффектов, которые могут наблюдаться при активно-пассивном радиозондировании интенсивно кристаллизующихся объектов (град, ледовые покровы акваторий, ледники и т. п.).

Начиная с 70-х годов в ЛГМИ были проведены натурные эксперименты по регистрации электромагнитных полей, возникающих

при сходе снежных лавин, подвижках ледников, сжатии и торшении морских и озерных льдов [4, 5, 6]: С применением комплексных методов активно-пассивной радиолокации исследовались также конвективные облака на всех стадиях их развития [7, 8].

В этот же период близкие по характеру работы — исследование электромагнитных предвестников землетрясений, извержений вулканов и оползней — проводились в Институте физики Земли АН СССР и Томском политехническом институте [9].

Представляет интерес то обстоятельство, что, несмотря на внешнюю несхожесть, перечисленные явления имеют один и тот же элементарный механизм генерации широкополосного электромагнитного излучения (ЭМИ).

Рассмотрим, к примеру, ход типового эксперимента по регистрации ЭМИ кристаллизующейся воды. В охлаждаемую кювету помещается исследуемый раствор или изолированная капля воды. В растворе (капле) располагается электрический зонд, соединенный со входом динамического электрометра. Здесь же находится фторопластовый стержень, приклеенный к пьезокристаллу, регистрирующему акустическую эмиссию. Над кюветой располагается емкостная электрическая антенна и многовитковая катушка, выполняющая функцию магнитной антенны. Сигналы с антенн поступают на вход селективных микровольтметров с диапазоном измерений от 20 Гц до 30 МГц. Вся установка защищена от внешних помех двойным (медным и пермалловым) экраном.

После начала кристаллизации электрический зонд фиксирует возникновение межфазного кристаллизационного потенциала, который может достигнуть значений  $10^2$  В и более. Одновременно пьезодатчик регистрирует акустические сигналы, вызванные возникновением напряжений в ледяном кристалле, приводящих к его растрескиванию. Синхронно с акустическими импульсами возникают и импульсы электрической и магнитной составляющих ЭМИ.

При возникновении трещин локальные электрические поля в зазоре могут достигать значений  $10^6 \div 10^9$  В/м. Заметим также, что при прочих равных условиях эта разность потенциалов тем больше, чем больше разность диэлектрических проницаемостей диэлектрика и воздуха (вакуума). При дальнейшем расширении трещины в соответствии с законом о сохранении заряда разность потенциалов на ее бортах достигает пробойных значений. Возникающий при этом в трещине газовый или автоэлектронный разряд становится источником широкополосного нетеплового радиоизлучения.

Сказанное выше относится к чисто деформационному процессу. При деформационно-кристаллизационном процессе внутри диэлектрика возникают интенсивные электрические поля резко усиливающие интенсивность микроразрядов, а тем самым, и генерации ЭМИ.

Пример временного хода электрических и электромагнитных сигналов, возникающих при кристаллизации воды, показан на рис. 2, а на рис. 3 приведена характерная осциллограмма единичных импульсов ЭМИ [10].

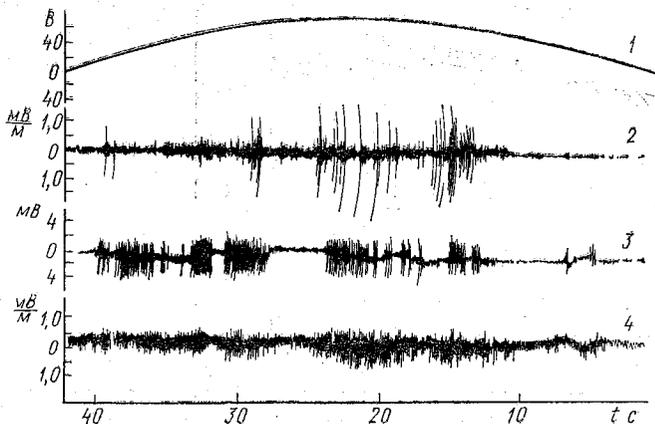


Рис. 2. Пример синхронной регистрации акустических, электрических и электромагнитных сигналов, возникающих при кристаллизации воды:

1 — кристаллизационный потенциал; 2 — электрическая составляющая ЭМИ; 3 — акустический сигнал; 4 — магнитная составляющая ЭМИ.

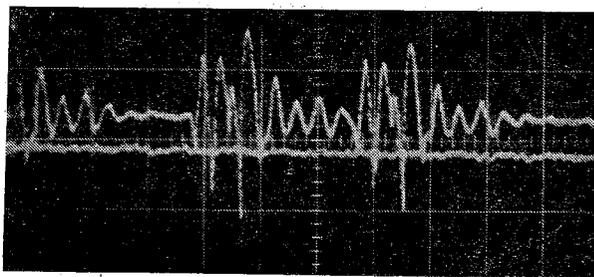


Рис. 3. Осциллограмма импульсов ЭМИ, возникающего при кристаллизации воды. Верхняя линия — электрическая компонента, нижняя — фоновый сигнал при отсутствии кристаллизации (для наглядности сдвинут вниз на 0,5 деления).

Масштаб: по горизонтали 1 деление — 5 мкс, по вертикали 1 деление — 1 мВ/м.

Наблюдения в естественных условиях за радиоизлучением сходящих снежных лавин и деформирующихся льдов были впервые выполнены в 1979 г. в Приэльбрусье на гляциологической станции МГУ в Азау [4, 5]. Измерения производились с помощью ком.

плекса приборов, регистрирующих сейсмические, акустические и электромагнитные сигналы. ЭМИ измерялось в диапазоне частот  $\div 10^9$  Гц с учетом минимального уровня радиозумов в исследуемом районе. Для регистрации радиосигналов использовались магнитные антенны. Пример синхронной записи электромагнитных и сейсмических сигналов, возникающих при сходе лавин, представлен на рис. 4.

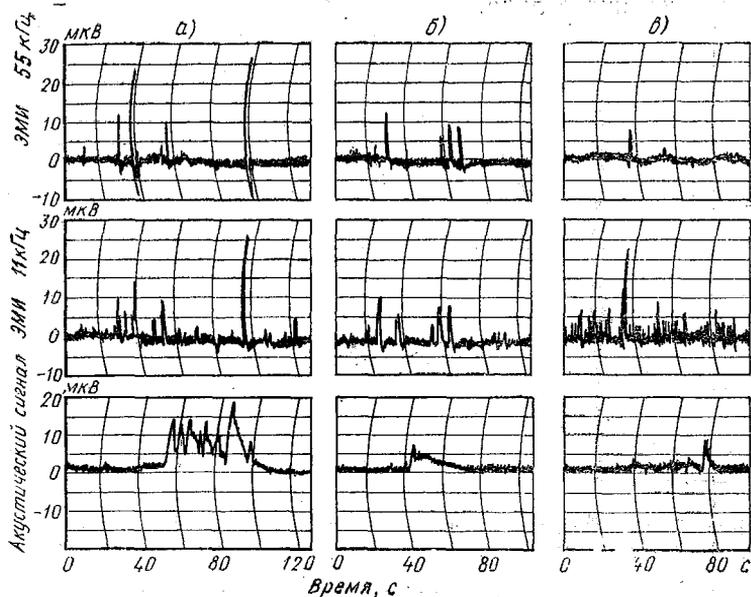


Рис. 4. Пример синхронной регистрации акустических и электромагнитных сигналов, возникающих при сходе трех небольших лавин (а, б, в). Внизу — акустический сигнал, вверху — ЭМИ на частотах 11 и 55 кГц.

В этом же районе производились измерения ЭМИ, возникающего при подвижках горного ледника, аналогичные работы для морских и озерных льдов производились на Ладожском озере и в Баренцевом море [6].

В Баренцевом море исследования велись в районе нахождения буровой установки. С помощью расположенных на окружающем ледяном поле электродов регистрировались вариации электрического поля в направлении изгибной деформации ледового покрова при изменении нагрузки на носовую часть буровой установки при последовательном спуске в скважину серии буровых труб.

Исследования ЭМИ в радиочастотном диапазоне при естественной деформации ледового покрова под действием нагона воды и непосредственных ветровых нагрузок проводились с самолета в районе Печорской губы (эксперименты проводил И. А. Степа-

нюк). Индукционный преобразователь поля располагался в фюзеляжа и подсоединялся экранированным кабелем ко вход селективного измерительного устройства. Осуществлялась непрерывная запись вариаций ЭМИ на высоте полета 100 м по маршрутам, пересекающим Печорскую губу, полностью покрытую припайным льдом двух возрастных стадий. Отдельные маршруты располагались с выходом в зону Баренцева моря и пересечение кромки припайного льда.

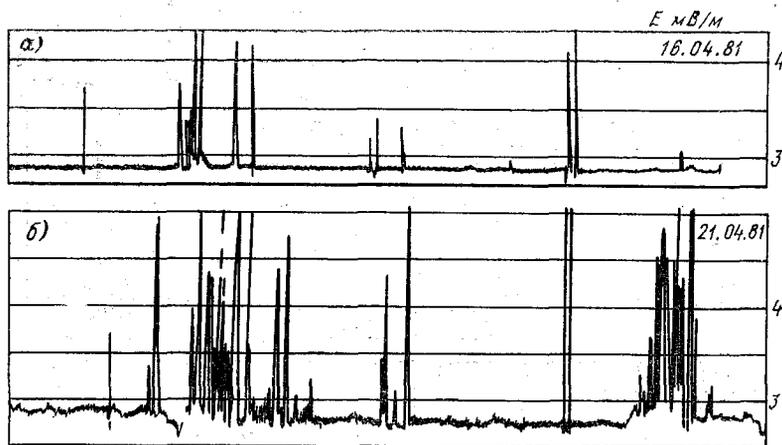


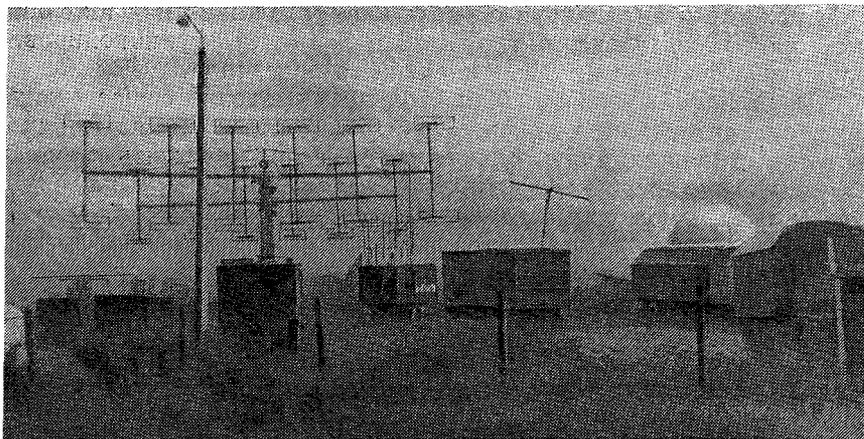
Рис. 5. Результаты непрерывной регистрации ЭМИ, возникающего при естественных динамических процессах в ледовом покрове, с самолета:

*a* — полет 16.04.1981; *б* — полет 21.04.1981.

Пример результатов измерений, выполненных с интервалом 5 суток, на двух близко расположенных маршрутах, приведен на рис. 5. Над зонами интенсивных деформаций регистрировалось возрастание уровня ЭМИ. Средний уровень ЭМИ над районами с малодеформированным льдом (отсутствие торосов и крупные трещины) изменялся весьма незначительно (не более 0,5 мВ/м). На участках маршрута, пересекающих кромку припая, наблюдалось постепенное возрастание уровня ЭМИ, начиная с расстояния 3—5 миль до кромки, при общем сугубо импульсном характере сигнала. В зоне кромки и над дрейфующим льдом (сплоченностью 10 баллов) при сжатии 2—3 балла уровень ЭМИ достигал 10—15 мВ/м (рис. 5, *a*).

При вторичном пролете этого же маршрута через 5 суток (рис. 5, *б*) преобладал сильный северо-восточный ветер, который для Печорской губы являлся нагонным. Он вызвал резкое увеличение деформации ледового покрова в районах отмелей и прибрежной зоне, что привело к существенному возрастанию уровня ЭМИ.

Исследования продолжаются. Так, исследования ЭМИ снежных лавин и горных ледников проводятся в содружестве с МГУ и высокогорным геофизическим институтом, а также институтом юфизики и метеорологии АН НРБ. В НРБ была также построена моделирующая установка для изучения характеристик сигналов лавинного ЭМИ.



ис. 6. Общий вид учебно-научного радиофизического полигона ЛГМИ в Алазанской долине.

На созданном совместно с ВГИ радиофизическом комплексе проводились исследования радиоизлучения конвективных облаков. В содружестве с Институтом геофизики АН ГрССР проводятся исследования ЭМИ, сопровождающего грозовые и градовые процессы. На рис. 6 показан экспериментальный учебно-научный полигон ЛГМИ в Алазанской долине. Примеры длительной активной-пассивной радиолокации грозовых процессов на различных стадиях их развития приведены в работах [7, 8].

В заключение рассмотрим некоторые перспективы использования развиваемого в ЛГМИ метода активно-пассивной радиолокации природных объектов применительно к диагнозу и прогнозу опасных природных явлений.

Град. Нет пока еще надежной методики определения зоны возникновения града в облаках и ее временной и пространственной трансформации, вследствие чего результаты воздействия на градовые процессы не всегда оказываются достаточно успешными. Но из результатов проведенных лабораторных и натурных измерений следует, что зона интенсивного градообразования в облаке должна являться генератором собственного радиоизлучения, источник которого при достаточной интенсивности сигнала может быть локализован в пространстве радиотехническими методами.

Исследования в этом направлении в настоящее время проводятся на учебно-научном полигоне ЛГМИ в Алазанской доли совместно с ИГ АН ГрССР. В случае их успешного завершения представляется возможным создание полностью автоматического комплекса противорадовой защиты, состоящего из ракетных установок, нацеливаемых на объект (градовое облако) с помощью активно-пассивного радиолокационного прицела. Работа в ждшем режиме и анализируя сигналы от проходящих над ним облаков, такой комплекс, в перспективе, сможет функционировать полностью без участия обслуживающего персонала.

**Снежные лавины.** Одно только улучшение существующих методов картирования лавиноопасных районов с помощью радиопеленга сходящих лавин может существенно повысить оправданность краткосрочных лавинных прогнозов. Еще одно применение метода — контроль успешности проведения воздействия на лавиноопасные склоны в тех ситуациях, когда ограничена возможность визуальных наблюдений. Первые эксперименты в этом направлении были проведены совместно с Высокогорным геофизическим институтом и Институтом метеорологии и геофизики АНРБ. Эксперименты в Хибинах, проведенные ЛГМИ совместно с МГУ, показали, что на частоте около 30 кГц наблюдается увеличение напряженности естественного электромагнитного поля примерно за 10—12 ч до схода лавины. Наиболее интенсивно поле возрастает за 10—15 мин до начала схода. В этих экспериментах магнитная антенна располагалась непосредственно возле лавинного лотка. Пока еще нельзя однозначно определить в лавинах каких типов появляются «предлавиные» сигналы ЭМИ и как они связаны с благоприятными таковыми сигналами, однако аналогичные наблюдения на ледниках свидетельствуют, что и для краткосрочного прогноза схода снежных лавин метод пассивной радиолокации может оказаться весьма перспективным.

**Ледники.** В работе [4] показано возрастание уровня сигналов в КНЧ диапазоне за 2 ч до начала подвижки ледника Малы Азау (Приэльбрусье). Учитывая, что горные ледники в последние годы подвергаются не только массовому наплыву туристов, но становятся фундаментом для целого ряда научно-исследовательских и производственных сооружений, представляется целесообразной отработка методики регистрации деформационного ЭМИ льда для повышения безопасности находящихся на леднике людей и сооружений.

**Ледовые покровы акваторий.** Непрерывно возрастает интенсивность перевозок Северным морским путем, обеспечивающих освоение заполярных месторождений полезных ископаемых и материальное обеспечение побережья Северного Ледовитого океана, в связи с чем стал внедряться метод разгрузки судов непосредственно на припай. Соответственно громадное народнохозяйственное значение приобретает разработка методов обеспечения безопасности таких операций.

Сравнительно недавно стали применяться самолетные радиодетекторы, измеряющие толщину льда по маршруту. Но эти методы не дают информации о сжатиях и подвижках ледового покрова. Регистрация собственного ЭМИ деформирующихся ледовых кровов является их логическим развитием. По-видимому, целесообразна активно-пассивная радиолокация ледяных покровов по маршруту с борта самолета или судна с целью выбора оптимального маршрута следования судов и повышения безопасности плавания в арктических районах. Первые эксперименты в этом направлении проведены с борта атомного ледокола «Арктика».

Мы рассмотрели лишь несколько примеров возможного применения пассивной радиолокации для оповещения и предсказания опасных природных явлений. В настоящее время в ЛГМИ проводятся также исследования электромагнитных предвестников циклонов, конвективных облаков, снегопадов и метелей. Обнаружено так называемое «предгрозовое» радиоизлучение, возникающее до начала грозы. Проведены успешные наблюдения собственного ЭМИ летательных аппаратов, предупреждающее о их приближении к электрически опасным зонам в облаках.

Принципиально возможно совмещение развитых методов с методами космических исследований. В этом случае аппаратура, сполуженная на спутнике или космической станции, позволит наблюдать не только статическое состояние природных объектов, но и протекающие в них динамические процессы. При этом, разумеется, вступают в действие ограничения регистрируемых диапазонов частот в связи с расположением приемного устройства выше ионосферных слоев, однако широкополосность генерируемых сигналов и некоторые другие ионосферные эффекты позволяют регистрировать их в соответствующих «окнах радиопрозрачности» ионосферы. В связи с этим в ЛГМИ выполнен ряд работ по спутниковой селективной регистрации сигналов тепловой и нетепловой природы. Аналогичные проблемы рассматриваются применительно к проблеме прогноза землетрясений [9].

Рассматриваемые методы активно-пассивной радиолокации природных объектов, как показывают проведенные исследования, представляются весьма перспективными для краткосрочного анализа и прогноза опасных природных явлений как в условиях Земли, так и в перспективе, в условиях исследования других планет.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Качурин Л. Г., Бекряев В. И. Исследование процесса электризации кристаллизующейся воды. — ДАН СССР, 1960, т. 130, № 1, с. 1141—1144.
2. Качурин Л. Г., Бекряев В. И., Псаломщиков В. Ф. Экспериментальное исследование электрокинетического явления, возникающего при кристаллизации слабых водных растворов. — ДАН СССР, 1967, т. 174, № 5, с. 1122—1125.
3. Качурин Л. Г. Электрический потенциал, возникающий при кристаллизации жидкости. — В кн.: Поверхностные явления в жидкостях. Л., изд-во ГУ, 1975, с. 137—153.

4. Качурин Л. Г. и др. Электромагнитное излучение снега и льда при динамических процессах. — ДАН СССР, 1979, т. 248, № 3, с. 583—585.
5. Берри Б. Л. и др. Электромагнитные колебания при динамических процессах в снежных лавинах и ледниках. — В сб.: Склоновые процессы. М изд-во МГУ, 1980, с. 95—99.
6. Качурин Л. Г., Псаломщиков В. Ф., Степанюк И. А. Н тепловое радиоизлучение интенсивно деформирующихся ледяных покровов естественных водоемов. — Исследование Земли из Космоса, 1984, № 3, с. 60—66.
7. Качурин Л. Г., Кармов М. И., Медалиев Х. Х. Основные характеристики радиоизлучения конвективных облаков. — Изв. АН СССР, ФАО, 1974, т. 10, № 11, с. 1163—1168.
8. Качурин Л. Г., Дивинский Л. И., Иванов Б. Д. Излучение конвективных облаков в метровом диапазоне радиоволн. — Изв. АН СССР ФАО, 1979, т. 15, № 2, с. 187—193.
9. Электромагнитные предвестники землетрясений. / Под ред. академика А. М. Садовского. — М.: изд-во АН СССР, 1982. — 86 с.
10. Качурин Л. Г., Колев С. И., Псаломщиков В. Ф. Генерация импульсного электромагнитного поля при кристаллизации воды и некоторых диэлектриков. — ДАН СССР, 1982, т. 267, № 2, с. 347—350.

УДК 551.509

*К. В. КОНДРАТОВИ*

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ДОЛГОСРОЧНОГО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА ПО ОКЕАНИЧЕСКИМ РАЙОНАМ — АКТУАЛЬНАЯ НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННАЯ ЗАДАЧА**

Атмосферная циркуляция и деятельный слой океана несомненно составляют единую динамическую систему, формирующую физику географические условия промышленной обстановки. Без учета фактических и прогностических тенденций барико-циркуляционной и термического режимов в основных промышленных районах выполнение напряженных производственных планов предприятиям МРХ СССР, по-видимому, невозможно.

Рассмотрим потенциальные возможности современной службы метеорологических прогнозов и применения результатов исследований атмосферных процессов в целях обслуживания промышленности в различных регионах Мирового океана.

Современная служба метеорологических прогнозов собирает и обобщает огромное количество информации о состоянии атмосферы. Одним из промежуточных этапов расчета прогностических карт погоды на основе применения гидродинамических методов прогноза является проведение объективного анализа барической поля в крупных регионах и, в целом, на пространстве северного и южного полушарий.

В ЛГМИ в результате многолетних исследований метеорологов, работавших в содружестве со специалистами по промышленной океанологии, разработана система количественных характеристик атмосферных макропроцессов [3, 14]. Многолетние ряды этих характеристик обеспечивают проведение многоаспектного и физически содержательного анализа метеорологических условий изменчивости среды и объектов промысла. Однако выявленные связи результаты исследований в большей части не могут найти применения без быстрого получения системы метеорологических характеристик в оперативном режиме. Многолетние ряды должны немедленно иметь продолжение по текущим синоптическим материалам. Еще более перспективным является определение количественных региональных характеристик по прогностическим картам. В последнем случае оказывается возможным использовать диагностические связи «атмосфера — среда — промышленные объекты» в прогностическом плане. Понятно, что эффективность такого подхода зависит от надежности результатов исследований связей и уровня оправданности метеорологических прогнозов в соответствующих районах Мирового океана. Заметим, что возможность составления надежных метеорологических прогнозов в различных регионах океана существенно различается [16].

Напомним систему характеристик атмосферных процессов, предложенную специалистами ЛГМИ для диагностических и прогностических исследований в области промышленной океанологии. Многолетние ряды этих характеристик частично опубликованы и достаточно подробно рассмотрены в работах К. В. Кондратовича, И. А. Баумана, А. И. Савичева, Н. А. Лаврова [3, 16]. Примеры их эффективного применения в задачах промышленной океанологии можно найти в публикациях В. Н. Яковлева, В. А. Брянцева, К. А. Седых и других океанологов.

Индекс преобладающей зональной ( $J'_3$ ) и меридиональной ( $J'_M$ ) циркуляции вычисляется по формулам, предложенным А. Л. Кацем [16]:

$$J'_3 = J_{33} - J_{3B} = \frac{b \sum (n_{i3} - n_{iB})}{(\varphi_2 - \varphi_1) i}; \quad (1)$$

$$J'_M = J_{MЮ} - J_{MC} = \frac{b \sum (m_{jЮ} - m_{jC}) k_j}{(\lambda_2 - \lambda_1) j}. \quad (2)$$

Здесь  $J_{33}$  — индекс западного (с запада на восток) переноса;  $J_{3B}$  — индекс восточного переноса;  $b$  — 5 гПа на приземных картах, 4 дкм на картах барической топографии;  $n_{i3}$  — число изолиний (изобар или изогипс), пересекающих отрезок меридиана между широтами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  с запада,  $n_{iB}$  — число пересечений изолиний с востока;  $i$  — число отрезков меридианов в исследуемом районе;  $J_{MЮ}$  — индекс южного переноса;  $J_{MC}$  — индекс северного переноса;  $m_{jЮ}$  — число изолиний, пересекающих отрезок параллели между

долготами  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  с юга;  $m_{jc}$  — число изолиний, пересекающих отрезок параллели с севера;  $j$  — число отрезков параллелей;  $k_j =$

$$= \frac{1}{\cos \varphi}.$$

Как известно, А. Л. Кац использовал индекс  $J'_3$ , вычисленный для большого региона («естественного синоптического района») в целях объективной классификации атмосферных макропроцессов [9]. В задачах промысловой океанологии целесообразно рассчитывать индексы  $J'_3$  на каждом отрезке меридиана ( $\varphi_2 - \varphi_1$  равно  $5^\circ, 10^\circ, 20^\circ \dots$ ;  $i=1$ ), а  $J'_m$  на каждом отрезке параллели ( $\lambda_2 - \lambda_1$  равно  $5^\circ, 10^\circ, 20^\circ \dots$ ;  $j=1$ ). При таком подходе получаем количественную характеристику преобладающих воздушных переносов на уровне моря (по карте  $p_0$ ) или в средней тропосфере (по карте  $H_{500}$ ) в данном, представляющем интерес в промысловом отношении, районе. Индексы  $J'_3$  и  $J'_m$  желательнее привлекать при анализе сгонно-нагонных и апвеллинговых явлений, дрейфовых течений и т. п. Косвенно они в конкретных физико-географических условиях и в определенное время года характеризуют и термическое влияние атмосферных переносов [6].

Попутно упомянем один из наглядных способов сопоставления индексов преобладающего переноса  $J'_3$  и  $J'_m$  с какой-либо характеристикой гидрологической или промысловой обстановки, которая, предположительно, зависит от региональных воздушных переносов. По оси абсцисс откладываем месячные значения индексов  $J'_3$ , по оси ординат — индексов  $J'_m$ . Соответствующие точки-месяцы соединяем отрезками прямой, данная ломаная линия дает наглядную характеристику воздушных переносов — и по направлению, и по интенсивности. У соответствующих точек-месяцев можно написать количественную или качественную характеристику промысловой обстановки.

Сравнение построенных подобным образом графиков за ряд лет позволяет надежно выявить случаи изменчивости или устойчивости промысловых (океанологических) характеристик от воздушных переносов в данном районе.

В современных методах объективного анализа информация о метеорологическом поле, заданная на сети станций преобразуется в систему «грид», т. е. в узлы сетки меридианов и параллелей. В большинстве случаев достаточно использовать «пятиградусный ( $5^\circ \times 5^\circ$ ) грид». Расчет индексов  $J'_3$  и  $J'_m$  будет производиться по тем же формулам (1), (2), но путем непосредственной замены «чисел пересечений»  $n_3$  и  $n_m$  и параметра  $b$  составляющими барического градиента  $\left( \frac{\partial p}{\partial k} \text{ и } \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right)$ .

Несколько иное положение с расчетом индексов зонального ( $J_3$ ) и меридионального ( $J_m$ ) воздухообмена. Вычисляются они по аналогичным формулам, но западные и восточные, северные и южные переносы суммируются ( $J_3 = J_{3з} + J_{3в}$ ;  $J_m = J_{мс} + J_{мю}$ ). Коли-

ественно эти индексы характеризуют модули зональных и меридиональных воздушных переносов, т. е. воздухообмен. В исследованиях А. Л. Каца использовался только индекс  $J_M$ , вычисленный по крупному региону. Высокие значения индекса  $J_M$  свидетельствовали о меридиональном состоянии атмосферной циркуляции [6]. Тами индексы  $J_3$  и  $J_M$  получены впервые для каждого элемента сетки отрезков меридианов и параллелей, покрывающих Северную Атлантику. Используя не карты, а вариант расчета по сетке «грид» (барические градиенты), мы не получим различий между синхронными значениями  $J'_3$  и  $J_3$ ,  $J'_M$  и  $J_M$ . Эти различия обнаруживаются при пространственном или временном осреднении.

В физическом отношении индексы  $J_3$  и  $J_M$  количественно характеризуют воздействие атмосферы на процессы динамического перемешивания, газообмен между водой и воздухом. Осредненные по месяцам и сезонам значения  $J_3$  и  $J_M$  дают представление о штормовой деятельности. Четыре индекса  $J'_3$ ,  $J_3$ ,  $J'_M$ ,  $J_M$  позволяют получить дополнительную информацию: о соотношении зонального и

меридионального воздухообмена  $\left(J = \frac{J_3}{J_M}\right)$ , об устойчивости зо-

нальных  $\left(i_3 = \frac{J'_3}{J_3}\right)$  и меридиональных  $\left(i_M = \frac{J'_M}{J_M}\right)$  переносов. На-

личие многолетних архивов метеорологических полей на технических носителях ( $p_0$ ,  $H_{500}$ ,  $t_a$  и т. п.), заданных значениями в узлах регулярной сетки («грид»), позволяет получать каталоги количественных характеристик атмосферных процессов практически по любому району океана. В свою очередь каталоги обеспечивают различные синхронные и асинхронные сопоставления с морскими или промысловыми явлениями, а также эмпирические оценки параметров статистического распределения. Наряду с количественной оценкой воздушных переносов, определяющих, в основном, динамическое воздействие на поверхностные слои океана, необходимо иметь информацию и о характере тепловых влияний атмосферы.

В ЛГМИ предложен способ приближенной оценки термической адвекции ( $A_T$ ) на основе использования информации о барическом поле на двух уровнях. В частном случае нами использовалось барическое поле на уровне моря ( $p_0$  или  $H_{1000}$ ) и барическая топография 500 гПа, характеризующая воздушные переносы в средней тропосфере. Термическая адвекция в нижней тропосфере является важным параметром, имеющим непосредственное значение для оценки теплового взаимодействия атмосферы и океана, и характера теплового влияния метеорологических процессов на промышленную обстановку [11, 13, 16]. И в этом случае наличие исходных материалов о геопотенциале в форме «грид» на двух уровнях обеспечивает расчет термической адвекции на ЭВМ.

Еще один влияющий фактор — облачность. Влияние облачности на радиационный баланс подстилающей поверхности известно и физически вполне объяснимо. Однако оценки облачности на акватории океанов были эпизодическими и давали лишь представление о климатической картине распределения облачности. Ценность береговых наблюдений ограничена ввиду явной зависимости условий формирования облачности от характера подстилающей поверхности. Лишь спутниковые наблюдения за облачностью (снимки в видимом и в ИК-участках спектра) позволили получить достаточно надежную картину глобального распределения облачности [2, 6, 19, 21]. Однако ряды спутниковых наблюдений невелики и исследование о влиянии облачности на промышленную обстановку возможны лишь за небольшой ряд лет. Косвенно можно судить о процессах формирования облачности на основе диагноза характера барического поля и оценки его интенсивности. Используя ежедневную информацию о барическом поле, представленную в системе «грид», можно определить в каждом «квадрате» форму барического рельефа (циклон, ложбина, антициклон, гребень) и оценку его интенсивности.

Подсчитывая повторяемость циклонических ( $N_z$ ) и антициклонических ( $N_a$ ) форм рельефа и определяя среднюю оценку их интенсивности ( $J_z, J_a$ ), можно достаточно надежно судить о характере влияния атмосферных процессов на радиационный баланс подстилающей поверхности. В последующем использование непосредственных наблюдений со спутников и, особенно, с геостационарных спутников призвано обеспечить потребности промышленной океанологии в информации о распределении и эволюции облачного покрова и барических систем. Однако и в этих условиях данные о циклонической-антициклонической деятельности на акватории океанов будут иметь самостоятельное значение как исходный материал при изучении атмосферных макропроцессов и для оперативной работы службы метеорологических прогнозов.

Перечислив количественные характеристики атмосферных процессов, позволяющие, как уже говорилось, обеспечить многоаспектный и физически содержательный анализ их связей с состоянием деятельного слоя океана и промышленной обстановкой — индексы атмосферной циркуляции  $J'_z, J'_m$ , индексы воздухообмена  $J_z, J_m$ , термической адвекции  $A_T$ , повторяемости и интенсивности циклонических ( $N_z, J_z$ ) и антициклонических ( $N_a, J_a$ ) форм барического рельефа — подчеркнем, что наиболее эффективным решением будет:

1) получение указанных характеристик по многолетним банкам данных;

2) их оперативный расчет по данным объективного анализа ежедневных метеорологических полей в системе «грид»;

3) расчет этих же характеристик по прогностическим полям в системе «грид» (прогнозы барического поля на 24, 48, 72, 96 и 120 часов).

Современные краткосрочные (на 1—2 суток) и среднесрочные (на 3—5 суток) прогнозы барического поля имеют достаточно высокий уровень оправдываемости и их использование для обслуживания морского промысла необходимо.

Пункты 2 и 3 рассматриваемой задачи представляют **мониторинг метеорологической обстановки**. Осуществление мониторинга возможно на базе региональных центров службы прогнозов с помощью ЭВМ и соответствующего программного обеспечения.

Существенно иное положение сложилось в области долгосрочных прогнозов (на месяц, сезон) и сверхдолгосрочных метеорологических прогнозов (на год, годы) и прогнозов современных климатических тенденций (на десятилетия).

Долгосрочные метеорологические прогнозы (ДМП) на регулярной основе составляются в 18 странах, но поисковые исследования по проблеме ДМП ведутся учеными многих стран. К сожалению, уровень оправдываемости ДМП, достигнутый в период возникновения научных школ Б. П. Мультановского — С. Г. Пагавы, Г. Я. Вангенгейма — А. А. Гирса в нашей стране, Ф. Баура в Германии, Д. Немайеса в США, не удалось сколько-нибудь существенно повысить [21—28]. Оправдываемость знака месячных аномалий температуры воздуха составляет лишь 60—70%, методические прогнозы эффективнее климатических и случайных прогнозов лишь на 10—15%. Прогноз атмосферных осадков еще менее успешен: знак аномалии оправдывается примерно на 60%, а эффективность относительно климатических и случайных прогнозов всего 3—5%. Указанные оценки получены при прогнозировании в СССР, США, Японии, Англии по своим национальным территориям. Лишь метод ААНИИ в течение многих лет обеспечивал составление эффективных долгосрочных метеорологических прогнозов по акватории полярных морей Советской Арктики. Выпускались «фоновые» прогнозы барического поля и температуры воздуха, заблаговременность которых от 1 до 10 месяцев (прогнозируется процесс с января по октябрь). Уточнения фоновых прогнозов для отдельных месяцев, по существу, эквиваленты составленным месячным прогнозам. Уровень оправдываемости ДМП, составленных в ААНИИ, примерно такой же, как и у других методов [7, 8, 9, 16, 24].

В ЛГМИ принципиальные положения макроциркуляционного метода использованы для разработки схем прогноза на следующий месяц по акватории Северной Атлантики. Автор этой методики А. И. Савичев в оперативных условиях в течение 5 лет регулярно составлял месячные прогнозы барического поля и температуры воздуха по Северной Атлантике [16, 20].

И. А. Бауманом предложены и в течение 5 лет испытаны в оперативных условиях синоптико-статистические схемы прогноза аномалий месячной температуры воздуха по отдельным промысловым районам Северной Атлантики. Заблаговременность прогнозов 3—5 месяцев. Оценки прогнозов ЛГМИ свидетельствуют о воз-

возможности их регулярного составления в целях метеорологического обслуживания предприятий МРХ СССР [4, 16].

Как известно, сверхдолгосрочные метеорологические прогнозы (на несколько лет) и прогнозы современных изменений климата (десятки лет) на регулярной основе не составляются. Наряду с использованием циклических изменений и эмпирически установленных трендов гидрологического и метеорологического режимов в основу сверхдолгосрочных прогнозов должны быть положены возможности учета воздействия внешних факторов. К числу таких факторов можно отнести: солнечную активность (11-летний и «вековой» циклы), долгопериодные колебания приливообразующих сил и земной оси, рост концентрации углекислого газа и т. д. [5, 8, 10, 18].

Соответствующие физические гипотезы и полученные на их основе схемы и модели климатических изменений приводят к противоречивым и несовпадающим выводам.

Актуальной задачей является установление фактических трендов гидрометеорологического режима (температуры воздуха, центров действия атмосферы, воздушных переносов, ледовитости и т. п.) для каждого океанического региона. Сопоставление фактических трендов с выводами научных гипотез призвано обеспечить научную основу сверхдолгосрочного прогнозирования.

В ЛГМИ предложена научная гипотеза, связывающая современные изменения климата с эволюцией геомагнитного поля и влиянием солнечной активности. Некоторые из выводов гипотезы дают перспективу определения будущих изменений климата в конце XX — первой половины XXI века [15].

Основные моменты рассматриваемой гипотезы сводятся к следующему. На Земле существуют области более высокой напряженности магнитного поля (районы локализации северного и южного магнитных полюсов, Восточно-Сибирская аномалия).

Кислород атмосферы ( $O_2$ ) обладает выраженными парамагнитными свойствами, поэтому между столкновениями молекул в тепловом движении молекулы  $O_2$  должны «дрейфовать» в области наибольшей напряженности магнитного поля.

Парамагнитные свойства молекулярного кислорода, согласно закону Кюри, обратно пропорциональны абсолютной температуре, вследствие чего они усиливаются в холодное время года. «Обогащение» нескольких областей кислородом будет сопровождаться формированием более мощной озоносферы. Расчеты Л. Р. Ракиповой показывают, что влияние «парникового эффекта» слоя озона перекрывается экранированием некоторой части коротковолнового излучения Солнца. В итоге при росте концентрации  $O_3$  в подозонном слое должно происходить понижение температуры воздуха. Структура озоносферы такова, что в течение всего года очаги максимальной концентрации  $O_3$  совпадают с областями наибольшей напряженности магнитного поля в северном и южном полушариях. Весенний максимум и осенний минимум концентрации  $O_3$

находят простое физическое объяснение в положениях рассматриваемой гипотезы.

В хорошем согласии с гипотезой находится и расположение основных тропосферных очагов холода зимой. Корреляция температуры воздуха в январе и напряженности магнитного поля (их значения осреднены по меридианам) составляет —  $0,92 \pm 0,03$  в северном полушарии.

В режиме атмосферной циркуляции практически непрерывно чередуются зональные и меридиональные состояния. Их анализ и закономерности преемственности лежат в основе среднесрочных (СПП) и долгосрочных прогнозов погоды (ДПП). Но и при различных формах циркуляции в холодное время года в Восточной Сибири и над восточным сектором Канады обычно располагается мощная ложбина холода. Это одна из наиболее устойчивых структурных особенностей атмосферной циркуляции.

Возможности геофизического прогноза современных изменений режима атмосферной циркуляции и климата связаны с многолетними изменениями магнитного поля Земли, получившими название «западного дрейфа». Магнитный полюс и Восточно-Сибирская аномалия смещаются к западу со скоростью около  $20^\circ$  долготы в столетие. По оценкам магнитологов полный период «западного дрейфа» составляет около 1800 лет.

Одним из наиболее значительных событий современных изменений климата было резкое похолодание («малая ледниковая эпоха») в XIII—XVII вв., наступившее после «климатического оптимума» IX—XI вв. В период похолодания магнитный полюс находился на севере Гренландии. Наступление ледников в Гренландии, Исландии, Европе прекратилось в середине XVIII столетия, когда магнитный полюс сместился в район Канадского архипелага.

В соответствии с рассматриваемой гипотезой наиболее существенные изменения климата должны происходить в Сибири и на Дальнем Востоке (ДВ). В западной Сибири и на ЕТС должны преобладать циркуляционные условия с похолоданием, на ДВ — с потеплением.

В южном полушарии магнитный полюс сместился на побережье Антарктиды и ожидается его движение на юг Африки. Поэтому наибольшие изменения климата в южном полушарии должны происходить в районе Индийского океана, Африки и Австралии.

В нашей стране действует система региональных гидрометцентров, осуществляющих оперативное обслуживание потребителей среднесрочными и долгосрочными прогнозами погоды. К сожалению, такие центры — за исключением ААНИИ для полярных районов — метеорологического обеспечения в крупных океанических регионах не созданы. «Попутное» составление СПП и ДПП по океаническим районам, как некоторая дополнительная задача,

не позволяет в полной мере, на современном уровне вести специализированное метеорологическое обслуживание мореплавания и рыбного промысла, применять и совершенствовать перспективные и эффективные методы прогноза.

## ЛИТЕРАТУРА

1. АЛЕХИН Ю. М., ГВОЗДЕВА В. Г., КОНДРАТОВИЧ К. В. Динамико-статистический метод прогнозирования гидрометеорологических процессов и его практическое применение. — В сб.: Материалы рыбохозяйственных исследований Северного бассейна, 1968, вып. 12, с. 123—138.
2. АРИСТОВ Н. А., ПЕДЬ Д. А. Современное состояние метода сезонных прогнозов погоды и перспективы его развития. — Метеорология и гидрология, 1979, № 4, с. 18—23.
3. БАУМАН И. А., КОНДРАТОВИЧ К. В. Особенности интенсивности воздушных переносов над Северной Атлантикой в меридиональную эпоху циркуляции. — Межведомственный сб., Л., изд. ЛПИ, 1976, вып. 58, с. 3—10. (ЛГМИ).
4. БАУМАН И. А. К прогнозу аномалий средней месячной температуры воздуха в центральных районах Северной Атлантики. — Тр. ЛГМИ, 1975, вып. 53, с. 97—104.
5. БУДЬКО М. И. Климат в прошлом и будущем. — Л.: Гидрометеоздат, 1980. — 350 с.
6. ВАСЮКОВ К. А., ЗВЕРЕВ Н. И. Прогнозы погоды на месяц и пути улучшения их качества. — В сб.: Пятьдесят лет центру гидрометеорологических прогнозов. Л.: Гидрометеоздат, 1979, с. 178—182.
7. ГИРС А. А. Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов. — Л.: Гидрометеоздат, 1974. — 488 с.
8. ГИРС А. А. Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы. — Л.: Гидрометеоздат, 1971. — 280 с.
9. ГИРС А. А., КОНДРАТОВИЧ К. В. Методы долгосрочных прогнозов погоды. — Л.: Гидрометеоздат, 1978. — 343 с.
10. ДРОЗДОВ О. А. О возможности климатических прогнозов на основании учета цикличности, обусловленной космическими и земными факторами. — Тр. ГГО, 1971, вып. 274, с. 3—26.
11. КОНДРАТОВИЧ К. В., САВЧЕНКО С. И. Количественная оценка интенсивности циклонической-антициклонической деятельности в Северной Атлантике. — Тр. ААНИИ, 1974, т. 325, с. 43—52.
12. КОНДРАТОВИЧ К. В. Применение динамико-статистического метода прогноза в предсказании месячных и сезонных аномалий давления в Северной Атлантике. — Тр. ГМЦ СССР, 1975, вып. 147, с. 70—76.
13. КОНДРАТОВИЧ К. В. Прогноз месячных аномалий давления и типа барического поля в районе Северной Атлантики. — Тр. ЛГМИ, 1975, вып. 53, с. 63—96.
14. КОНДРАТОВИЧ К. В. Классификации макрометеорологических процессов и их использование для учета воздействия атмосферы на гидрологический режим. — Межведомственный сб., Л., изд. ЛПИ, 1976, вып. 58, с. 83—96. (ЛГМИ).
15. КОНДРАТОВИЧ К. В. Сопряженность изменений магнитного поля Земли и климата. — В сб.: Климатология и сверхдолгосрочный прогноз. — Труды ГГО, 1977, с. 123—128.
16. КОНДРАТОВИЧ К. В. Долгосрочные гидрометеорологические прогнозы в Северной Атлантике. — Л.: Гидрометеоздат, 1977. — 186 с.
17. ЛЬКОВА В. В., ЛЬКОВ А. А., РЕПИНСКАЯ Р. П., КОНДРАТОВИЧ К. В. О климатических трендах температуры воды и атмосферной циркуляции в Северной Атлантике. — Межведомственный сб., 1976, вып. 60, с. 20—26.

18. Мовин А. С., Шишков Ю. А. История климата. — Л.: Гидрометеоздат, 1979. — 407 с.

19. Петросянц М. А. Служба погоды и перспективы ее развития. — В сб.: Проблемы современной гидрометеорологии. Л., Гидрометеоздат, 1977, с. 52—81.

20. Савичев А. И. Прогноз барического поля по району Северной Атлантики в месяцы переходных сезонов на основе особенностей развития макропроцессов над северным полушарием. — Тр. ЛГМИ, 1975, вып. 53, с. 105—110.

21. Lamb H. H. British Isles weather types and a register of the daily sequence of circulation patterns 1861—1971. Geoph. Mem., London, 16, N 116, 85 p.

22. Murray R. Recent developments in longrange forecasting in the Meteorological Office. Quart. J. R. Met. Soc. 1970, 96, p. 232—245.

23. Namias J. Longrange weather forecasting. — History, current status and outlook. Bull. Am. Met. Soc., 1968, vol. 49, N 5, p. 438—470.

24. Smagorinsky J. Problems and promises of deterministic extended range forecasting. Bull. Am. Met. Soc., 1969, vol. 50, N 5, p. 286—311.

25. Spar J., Atlas R. Atmospheric response to variations in sea — surface temperature. J. Appl. Met., 1975, vol. 14, p. 1235—1245.

26. Van Loon H., Madden R. A. The Southern Oscillation. Part I: Global association with pressure and temperature in the northern winter. — Mon. Wea. Rev., 1981, vol. 109, p. 1150—1162.

27. Wright P. B. The Southern Oscillation — Patterns and Mechanisms of teleconnections and persistence. Hawaii Inst. Geophysic. Rep. 1977. — 107 p.

28. Jullian P. R., Chervin R. M. A Study of the Southern Oscillation and Walker Circulation. — Mon. Wea. Rev., 1978, vol. 106, p. 1433—1451.

УДК 551.510.534

*С. Г. ЗВЕНИГОРОДСКИЙ, С. П. СМЫШЛЯЕВ*

## **ОБ УЧЕТЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРИМЕСНЫХ ГАЗОВ В МОДЕЛЯХ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ И ТРАНСГРАНИЧНОГО ПЕРЕНОСА ВЫБРОСОВ**

На современном этапе моделирования загрязнений все отчетливее проявляется тенденция к синтезу традиционных гидродинамических схем описания переноса примеси с фотохимическими моделями, описывающими ее трансформацию. Исследование диффузии примесей от различных типов источников с учетом влияния многочисленных гидродинамических и орографических факторов [1], с одной стороны, и интенсивное развитие методов фотохимического моделирования в последнее десятилетие, с другой, [7, 8], заложили прочную основу для создания таких комбинированных моделей. Однако, несмотря на очевидный прогресс в этом направлении, существует еще целый ряд проблем, касающихся трансформации примесей, которые ограничивают точность современных модельных оценок. Прежде всего к ним относятся эффекты взаимодействия химически активных примесных газов с дождевыми и облачными каплями, частицами атмосферного аэрозоля и земной

поверхностью. Для всех этих механизмов на сегодняшний день характерен острый дефицит экспериментальных лабораторных и натуральных данных, но в то же время даже предварительные модельные оценки свидетельствуют об их значительном влиянии на рассчитываемые поля концентраций примесных газов. Более того при региональной регламентации моделей загрязнений интенсивность гетерогенных процессов может быть того же порядка, что и фотохимических.

В рамках настоящей работы авторы, используя одномерную фотохимическую модель тропосферы и стратосферы со средними климатическими параметрами, попытались получить количественные оценки влияния различных гетерогенных процессов на расчетные поля концентраций ряда примесных газов, рассмотреть также методы параметризации гетерогенных процессов в тропосфере.

Основной особенностью тропосферы как среды протекания различных физико-химических процессов, приводящих к трансформации химически активных примесных газов, является наличие в ней большого количества молекул воды в различном агрегатном состоянии. Согласно современным представлениям, тропосфера рассматривается как некий фильтр, ограничивающий перенос реактивных и растворимых в воде газов-примесей в вышележащие слои атмосферы. Следствием такой фильтрации, в условиях высоких фоновых концентраций окислов серы и азота, оказывается образование кислотных осадков, вызывающих, как известно, целый ряд экологических нарушений. В настоящее время появилось уже несколько моделей, включающих химические реакции внутри капли, позволяющих рассчитывать химический состав осадков, однако отсутствие надежных экспериментальных данных для скоростей ключевых реакций в жидкой фазе существенно обесценивают количественную сторону получаемых результатов.

Взаимодействие газов с облачными и дождевыми каплями не исчерпывает всех типов гетерогенных взаимодействий в тропосфере. В работах [17, 20] были впервые рассмотрены процессы выведения некоторых газов (радикалов) посредством химических реакций на поверхности обводненных аэрозольных частиц. Подчеркнем, что здесь речь идет об обводнении в несколько монослоев или же о частичной гидратации аэрозоля, но не об аэрозольных ядрах конденсации, которые стимулируют зарождение капли, а при дальнейшем ее росте теряют свое самостоятельное значение. Авторы [17, 20] приходят к выводу, что такие процессы весьма эффективны для тропосферы и могут сильно влиять на фоновые концентрации ряда радикалов. В частности, полученная в [20] оценка времени жизни радикала  $\text{HO}_2$  для гетерогенного стока на обводненном аэрозоле 10 с, на высотах нижней тропосферы — на порядок меньше соответствующего времени жизни в фотохимических реакциях. На наш взгляд, это явная переоценка интенсивности рассматриваемого процесса. Дело в том, что авторы

[17, 20] исходят из того, что все частицы тропосферного аэрозоля обводнены, хотя это справедливо только для крупнодисперсного ( $r > 1$  мкм) аэрозоля при влажности близкой к 100% [11]. Однако практически вся удельная поверхность тропосферного аэрозоля сосредоточена в мелкодисперсной моде [11], которая обводняется незначительно даже при высокой влажности. Из этого обстоятельства вытекает еще одно важное следствие: гетерогенные реакции

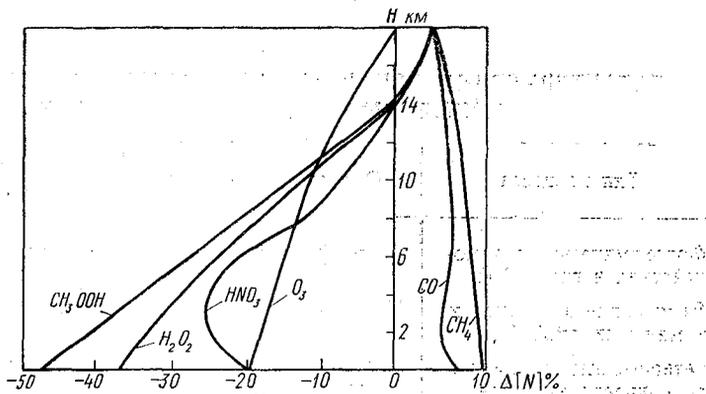


Рис. 1. Относительное изменение содержания некоторых газов в тропосфере при учете аэрозоля по отношению к чисто молекулярному случаю.

на поверхности необводненного аэрозоля могут играть в тропосфере важную самостоятельную роль. Из реакций этого типа наибольший интерес представляет распад озона на поверхности аэрозоля, содержащего окислы металлов:  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ , так как лабораторные эксперименты по измерению скорости распада озона дают высокую, порядка  $10^{-5} \dots 10^{-6}$  константу [18]. В работах [3, 4] этот механизм изучался авторами настоящей статьи в качестве возможного стока озона в стратосфере в случае выноса почвенных частиц под действием естественных и искусственных возмущений. Модельные расчеты показывают, что подобный эффект должен иметь место и в тропосфере (рис. 1).

Отдельного обсуждения заслуживает взаимодействие примесных газов с подстилающей поверхностью при моделировании их переноса и трансформации. Скорость разрушения газов-примесей на земной поверхности задается так называемой скоростью сухого осаждения, которая с хорошей точностью измерена для большого ряда газов в полевых экспериментах. По сути дела это нижнее граничное условие, и модели загрязненности, претендующие на реализм в описании переноса и трансформации примесей, должны принимать во внимание тот факт, что скорость осаждения может сильно варьироваться в зависимости от типа поверхности. Так,

например, скорость осаждения озона над почвой 0,6 см/с, а на поверхностью воды 0,04 см/с.

Для большей наглядности приводится табл. 1, где дана краткая классификация всех этих процессов и уровень их изученности в настоящее время. Количественный уровень предполагает, что имеется надежный массив экспериментальных данных, а точности значений констант микропроцессов позволяет получать хорошие согласие модельных и экспериментальных результатов.

Таблица

### ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССОВ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРИМЕСНЫХ ГАЗОВ В ТРОПОСФЕРЕ

Тип процесса	Область проявления	Современный уровень изученности
Фотохимические взаимодействия в газовой фазе	Тропосфера	Количественный
Вымывание в осадках и химии в жидкой фазе	Нижняя тропосфера	Полуколичественный
Гетерогенные реакции на поверхности аэрозоля	Нижняя тропосфера, области с повышенным содержанием аэрозольных частиц	Качественный
Взаимодействие с подстилающей поверхностью	Пограничный слой	Количественный

В соответствии с [3], считая гетерогенный распад реакции первого порядка, а режим свободномолекулярным, можно записать для скорости стока газа  $X_j$ , реагирующего со сферической поверхностью аэрозольных частиц, следующее соотношение:

$$\frac{\partial [X_j]}{\partial t} = - \frac{1}{4} \left\{ \frac{8RT}{\pi \mu} \right\}^{\frac{1}{2}} \times A \times \left( \sum_{i=1}^k \gamma_i \rho_i \eta_i \right). \quad (1)$$

Здесь  $A = 4\pi \bar{r}^2 n$  — удельная поверхность аэрозоля,  $\bar{r}^2$  — среднее квадратичный радиус и  $n$  — счетная концентрация аэрозольных частиц;  $\eta_i$  — относительная доля аэрозольного вещества данного химического типа в общей массе аэрозоля;  $\rho_i$  — параметр обводнения;  $\gamma_i$  — константа  $i$ -й реакции,  $[X_j]$  — концентрация газа  $X_j$ ,  $T$  — температура;  $\mu$  — молекулярный вес;  $R$  — универсальная газовая постоянная. Знак суммы в правой части (1) учитывает неоднородность химического состава аэрозоля и возможность одновременного протекания нескольких гетерогенных реакций с различными константами  $\gamma$ ;  $k$  — количество возможных реакций. В плотных слоях атмосферы длина свободного пробега молекул  $l$  может быть сравнима с размерами аэрозольных частиц. Строго

оворя, в этом случае нужно использовать более общее выражение для потока частиц газа, реагирующих со сферической поверхностью аэрозоля, полученное в [9]:

$$Q = \frac{D[X_j]}{\bar{r}(1 + \lambda_0(\gamma) \times \lambda/\bar{r})}$$

Здесь  $D = 1/3 \bar{v}l$  — коэффициент молекулярной диффузии,  $\bar{v}$  — средняя тепловая скорость молекул;  $\lambda_0(\gamma) = \lambda_0(1) + \frac{4(1-\gamma)}{3\gamma}$ , прием  $\lambda_0(1)$  монотонно изменяется от 1,3 при  $K_n \rightarrow \infty$  до 0,7 при  $K_n = 0$ , где  $K_n$  — число Кнудсена. Однако можно показать, что для  $\gamma \leq 0,1$  и  $r \leq 1$  мкм (что практически всегда выполняется для рассматриваемых гетерогенных процессов в тропосфере) использование выражения (1) для высот нижней тропосферы приводит к погрешностям, не превышающим 1%.

Численные эксперименты в рамках настоящей работы были выполнены на базе одномерной нестационарной фотохимической модели атмосферы для высотного интервала 0—50 км. Выбор высотной сетки, включающей стратосферу для расчета полей концентраций тропосферных примесных газов не случаен. Дело в том, что из элементов тропосферного баланса малых газов является обмен со стратосферой. В частности, хорошо известно, что занос озона из стратосферы в тропосферу создает источник  $O_3$  в тропосфере, сравнимый с фотохимическим [10]. В случае долгоживущих, инертных газов —  $CH_4$ ,  $N_2O$  и т. д. имеют место потоки из тропосферы в стратосферу, величины которых либо неизвестны, либо оценены очень приблизительно. Таким образом, выбор высотного интервала 0—50 км позволяет избежать задания неопределенного верхнего условия на тропопаузе, рассчитывать обмен между тропосферой и стратосферой в рамках модели и повысить достоверность модельных профилей концентраций примесных газов в тропосфере. При численной реализации модели используется система одномерных уравнений неразрывности

$$\frac{\partial [X_j]}{\partial t} = R(X_j) + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_z[M] \frac{\partial ([X_j])}{\partial z} \right\}, \quad (3)$$

$[X_j]$  — концентрация  $j$ -й компоненты на высоте  $z$ ;  $R(X_j)$  — скорость фотохимического изменения на высоте  $z$ ;  $K_z$  — вертикальная компонента тензора турбулентного перемешивания;  $[M]$  — концентрация молекул воздуха, которая решается с шагом в 1 км по высоте. На основании предварительной оценки с использованием литературных данных, 28 рассматриваемых малых компонент и их композиций («нечетный» азот, «нечетный» кислород, «нечетный» водород) разбиваются на две группы по временам жизни — долгоживущие и маложивущие. Для маложивущих составляющих предполагается фотохимическое равновесие на всех высотах, и их

концентрации определяются итерационным методом из систем уравнений  $[X_j] = P(X_j)/D(X_j)$ , где  $P(X_j)$  — фотохимическая продукция;  $D(X_j)$  — фотохимическая деструкция  $X_j$ .

При решении системы уравнений (3) для долгоживущих компонент, когда необходимо учитывать транспортное слагаемое в правой части (3), авторы столкнулись с рядом трудностей в числительного характера. Для подобных систем характерно наличие малого параметра при старших производных и сильная связь между отдельными уравнениями, обусловленная высокими скоростями химических реакций. Кроме того, экспоненциальная зависимость плотности среды от высоты приводит к изменению времени релаксации для диффузионных фотохимических процессов на несколько порядков внутри рассматриваемой области атмосферы. Вследствие этого использование стандартных вычислительных процедур затруднительно, так как приводит к сильной неустойчивости решений. В настоящей модели использовался метод расщепления по физическим процессам Горинова — Магомедова [2]. При этом само расщепление осуществлялось по схеме стабилизации, предложенной в [15] для решения многомерного уравнения теплопроводности. Используемый алгоритм обеспечивает быструю сходимость процесса и устойчив в отношении вариаций начальных и граничных условий. Опыт работы с различными вычислительными алгоритмами в рамках задач фотохимического моделирования атмосферных процессов позволяет рекомендовать именно такую процедуру как наиболее оптимальную.

Использовалась фотохимическая схема из 58 химических реакций и 16 реакций фотодиссоциации, рекомендованная в [13], учитывающая фотохимические циклы атмосферного кислорода, азота, водорода и углеводородов (см. также [3]). Для составления фотохимической части модельных уравнений применялся предложенный в [16] метод арифметики свободных радикалов в приложении к атмосферным фотохимическим процессам. Более подробно изложение модели можно найти в [3, 4].

Гетерогенные процессы, которые включались помимо традиционной газовой фазы реакции, параметризовались в соответствии с уравнением (1) и с учетом всех тех особенностей, которые рассмотрены выше.

Выведение растворимых газов осадками задавалось в виде скорости вымывания:  $k_2 = 2,31 \cdot 10^{-6} \exp\{1,6 - 0,4z\}$  для 4—12 км и  $2,31 \cdot 10^{-6}$  для слоя 0—4 км в соответствии с рекомендациями [19]. Предполагалось, что вымыванию подвержены следующие газы  $H_2O_2$ ,  $HNO_2$ ,  $HNO_3$ ,  $HO_2NO_2$ ,  $H_2CO$ ,  $CH_3OOH$ . Отметим, что интенсивность выведения растворимых газов с осадками имеет региональную зависимость, поскольку определяется количеством жидкой влаги в столбе тропосферы. Чувствительность рассчитываемых полей концентраций примесей к вариациям скорости вымывания в осадках являлась одним из предметов исследований в рамках настоящей статьи.

## Результаты модельных экспериментов

### 1. Основной вариант.

В качестве основного варианта для расчета полей концентрации примесных газов в тропосфере 0—12 км использовались результаты модельного эксперимента со средними климатическими параметрами, соответствующими среднеширотному лету. В модель были введены стандартные профили температуры и водяного пара и расчете констант фотодиссоциации в радиационном блоке модели принималась равной  $60^\circ$ . Комбинированное нижнее граничное условие задавалось в виде потоков примесных газов с поверхности или приземных концентраций, величины которых получены по данным [8]. На нижней границе учитывалось также разрушение газовых примесей, характеризуемое скоростями осаждения [2]. Все эти параметры приведены в табл. 2 и соответствуют глобально осредненным значениям для северного полушария. Кроме того, в таблице приводятся величины для ряда газов на уровне тропопаузы, обусловленные вертикальным турбулентным обменом. Численные значения потоков получены при реализации основного варианта модели.

Таблица 2

#### Условия на нижней границе и обмен между тропосферой и стратосферой

$O_3$	$NO_x$	$H_2$	$CH_4$	$N_2O$	$CO$	$CH_3OOH$	$HNO_3$	$H_2CO$	$H_2O_2$
Потоки с земной поверхности, мол/(см <sup>2</sup> ·с)									
0,0	1,0(10)	0,0	2,8(10)	1,6(9)	2,0(11)	0,0	0,0	0,0	0,0
Разрушение на земной поверхности (скорости осаждения), см/с									
0,2	0,2	1,8(-3)	0,0	0,0	2,5(-2)	0,1	0,2	0,0	0,1
Потоки из тропосферы в стратосферу, мол/(см <sup>2</sup> ·с)									
3(10)	4,0(7)	8,3(8)	-1,1(10)	-1,6(9)	-2,9(9)	-1,1(8)	1,6(8)	-6,2(6)	-7,5(7)

\* (10) — степень десяти;

\*\* Знак «+» соответствует переносу из стратосферы в тропосферу, «-» переносу из тропосферы в стратосферу.

На рис. 1 и 2 изображены вертикальные профили концентраций (в отношениях смеси) для  $O_3$  и  $NO_x$  ( $NO_x = NO + NO_2$ ). Можно отметить удовлетворительное согласие полученных профилей с осредненным экспериментальным профилем озона для северного полушария (кривая 2 на рис. 2) и с результатами модельных расчетов  $NO_x$ , выполненных Дж. А. Логан с соавторами [19] для летних условий на  $45^\circ$  с.ш. Некоторое несоответствие в нижней части профиля  $NO_x$  обусловлено различием нижних граничных

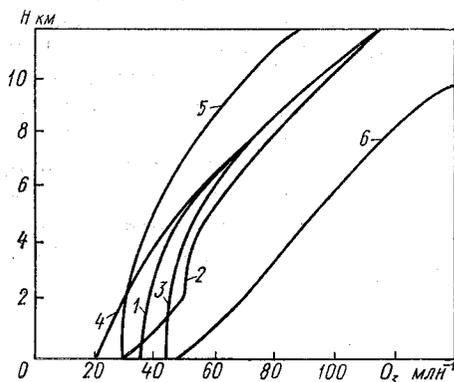


Рис. 2. Вертикальные профили отношения смеси для озона в тропосфере при различных предположениях о величинах констант вымывания  $k_z$  и скорости осаждения озона  $W$ :

1 — основной вариант (см. текст); 2 — экспериментальный профиль из [17]; 3 —  $W=0,04$  см/с; 4 —  $W=0,6$  см/с; 5 —  $k_z=5 \cdot 10^{-6}$ ; 6 —  $k_z=0$ .

условий в сравниваемых моделях. Другие газы, рассчитываемые в рамках модели, также достаточно хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований и модельными экспериментами других авторов. В дальнейшем мы сконцентрируем внимание на газах, входящих в семейство нечетного азота или связанных с ними, поскольку возрастающий выброс окислов азота и антропогенных источников стал сейчас одной из центральных экологических проблем, а также на тропосферном озоне, являющимся как известно, ключевой компонентой в атмосферной фотохимии

— 2. Оценка чувствительности модельных концентраций к вариациям скорости вымывания.

В современных фотохимических моделях атмосферы используются значения предэкспоненциального множителя для скорости

вымывания растворимых и реактивных в воде газов в пределах от  $5 \cdot 10^{-6}$  до  $1,15 \cdot 10^{-6}$  с<sup>-1</sup>. Такой большой разброс в значениях константы вымывания можно квалифицировать как попытку региональной регламентации моделей, с одной стороны, и как отсутствие надежной стандартной методики расчетов скоростей вымывания газов, с другой. Кроме того, для параметризации вымывания в моделях используются различные высотные зависимости показателя экспонент. Все это вместе взятое позволяет рассматривать процессы вымывания в качестве одного из основных источников погрешностей в современных фотохимических моделях тропосферы. Наглядной иллюстрацией этого факта могут быть результаты расчетов, приведенные в табл. 3. При расчетах использовались наименьший и наибольший предэкспоненциальные множители:  $1,15 \cdot 10^{-6}$  и  $5 \cdot 10^{-6}$ , скорость вымывания по основному варианту, а также нулевая скорость вымывания. Изменения концентраций при вариации констант вымывания даны в процентном отношении к основному варианту. Характерно, что значительные изменения расчетных концентраций имеют место не только для газов подверженных влажному вымыванию, но и для озона и нечетного азота, которые непосредственно не взаимодействуют с жидкокапельной влагой. Это подчеркивает связь концентраций  $O_3$  и  $NO_x$  с содержанием так называемых «газов-резервуаров»:  $HNO_3$ ,  $HO_2NO_2$  и т. д.; баланс которых в большой степени контролируется вымыванием ввиду их малой химической активности в тропосфере. Наибольшие отклонения в расчетных концентрациях  $NO_x$  соответствуют случаю с нулевым вымыванием, что свидетельствует о необходимости включения влажного вымывания в моделях загрязнений.

### 3. Влияние подстилающей поверхности.

Взаимодействие примесных газов с подстилающей поверхностью важный элемент для адекватного задания условий на нижней границе. Этому эффекту следует уделять особое внимание при моделировании переноса примесей на большие расстояния, когда тип подстилающей поверхности меняется вдоль траектории переноса. Наличие ряда данных измерений скоростей осаждения для основных примесных газов над различными поверхностями достаточно хорошо согласуются между собой и в известной степени упрощают эту задачу. В табл. 2 приводятся значения скоростей осаждения для различных газов в основном варианте модели. Расчеты профилей  $O_3$  и  $NO_x$  при различных значениях скоростей осаждения приводятся на рис. 2 и 3. Из этих результатов следует, что нижнее граничное условие, учитывающее взаимодействие примесных газов с подстилающими поверхностями различного типа должно включаться в модели, описывающие трансграничный перенос примесей в пограничном слое атмосферы и рассеяние газобразных выбросов из наземных источников.

Относительное изменение модельных концентраций некоторых примесей  
(в процентах к основному варианту)  
при вариациях константы скорости вымывания

Константа вымывания	Изменения модельных концентраций, %					H, км
	O <sub>3</sub>	NO <sub>x</sub>	HNO <sub>3</sub>	HO <sub>2</sub> NO <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>	
$k_z = 0$	51,2	47,0	216,7	73,3	242,0	1
	63,8	128,8	302,6	186,6	423,3	2
	75,2	209,5	404,3	304,0	623,7	3
	83,2	268,9	507,0	387,3	819,2	4
	89,1	307,0	582,5	422,3	942,4	5
	91,3	329,1	627,0	411,0	993,7	6
	90,8	339,7	643,1	369,0	977,9	7
	88,1	344,4	636,6	315,6	915,6	8
	77,9	352,0	574,9	190,2	656,5	9
	83,8	348,3	613,4	255,3	808,3	10
	68,3	344,4	502,5	117,8	446,4	11
	51,3	294,8	358,5	54,7	237,4	12
	75,1	173,3	385,0	297,0	478,5	$\sum_{12}^0$
$k_z = 2,31 \cdot 10^{-6}$	-10,3	-34,3	-33,1	-13,1	-33,1	1
	-12,9	-17,8	-42,6	-28,3	-46,7	2
	-15,5	-31,1	-50,1	-42,1	-57,0	3
	-17,7	-39,8	-56,2	-50,8	-64,0	4
	-19,3	-44,7	-59,8	-54,7	-67,8	5
	-20,3	-46,7	-61,35	-55,5	-69,3	6
	-20,7	-46,6	-61,2	-53,9	-69,1	7
	-20,2	-45,3	-59,8	-51,0	-67,9	8
	-20,2	-43,3	-57,4	-47,3	-65,7	9
	-19,4	-40,8	-54,1	-42,6	-62,6	10
	-17,7	-36,2	-48,1	-35,3	-56,1	11
	-14,0	-26,6	-36,0	-23,6	-40,9	12
	-16,9	-21,4	-45,2	-46,6	-45,7	$\sum_{12}^0$
$k_z = 5 \cdot 10^{-6}$	-16,6	-5,8	-61,8	-24,2	-56,4	1
	-20,7	-28,0	-72,6	-47,9	-73,9	2
	-24,7	-50,4	-80,7	-67,3	-84,5	3
	-28,0	-72,6	-86,3	-78,4	-90,1	4
	-30,5	-71,7	-88,9	-83,0	-92,6	5
	-32,1	-74,2	-89,6	-83,8	-93,4	6
	-32,9	-73,5	-88,8	-82,0	-93,0	7
	-32,9	-70,9	-86,7	-78,5	-91,7	8
	-32,3	-67,3	-83,7	-73,8	-89,8	9
	-31,0	-62,8	-79,3	-67,7	-86,8	10
	-28,4	-55,4	-71,5	-57,3	-80,4	11
	-22,5	-40,7	-55,0	-39,1	-62,8	12
	-27,0	-33,1	-72,7	-72,3	-68,6	$\sum_{12}^0$ *

\* Означает изменение интегрального содержания газа в тропосфере (высотный интервал 0—12 км) в процентах к основному варианту модели.

#### 4. Гетерогенные реакции на обводненном аэрозоле.

В рамках настоящей работы исследовалась реакция модели а введение в нее механизмов стока радикалов  $\text{HO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{CH}_3\text{OON}$  паров азотной кислоты на обводненном аэрозоле (каждый случай в отдельности) в соответствии с методикой параметризации оложенной ранее. Для оценки возможных границ этого эффекта, отсутствие экспериментальных данных по взаимодействию указанных газов с поверхностью обводненных частиц, константы процессов варьировались в пределах от 1 до  $10^{-4}$ . Результаты расчетов представлены на рис. 1.

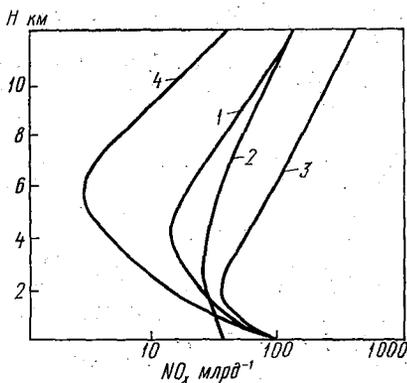


Рис. 3. Вертикальные профили отношения смеси для  $\text{NO}$  при различных значениях констант вымывания.

1 — основной вариант; 2 — расчетный профиль из [17]; 3 —  $k_2 = 0$ ; 4 —  $k_2 = 5 \cdot 10^{-6}$ .

Представленные результаты численных экспериментов убедительно свидетельствуют в пользу необходимости учета трансформации примесей в процессе ее переноса в результате движений динамического характера. В противном случае результаты расчетов полей концентраций антропогенных примесей могут достигать погрешностей в несколько сот процентов. Это особенно важно для районов с высокой концентрацией промышленных предприятий, поскольку основная примесная компонента —  $\text{SO}_2$ , поступающая в атмосферу в результате различных технологических процессов, подвержена вымыванию в той же степени, что и  $\text{NO}_x$ . Эти выводы справедливы и в отношении другой важнейшей народнохозяйственной задачи — моделирования трансграничного переноса примесей с целью выработки стратегий для стабилизации и последующего уменьшения выбросов  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_x$  в атмосферу.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и за-грязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеониздат, 1975. — 448 с.
2. Горинев А. С., Магомедов К. М. Метод расщепления для ре-шения релаксационных уравнений при наличии диффузии. — Журнал вычисли-тельной математики и математической физики, 1973, т. 13, № 5, с. 1264—1272
3. Звенигородский С. Г., Смышляев С. П. О возможном изме-нении содержания озона при интенсивном возмущении аэрозольной компо-ненты. — Известия АН СССР, сер. ФАО, 1985, № 10, с. 1056—1063.
4. Звенигородский С. Г. Параметризация фотохимических процессов в аэрозольной атмосфере. — Межвузовский сборник. Л., изд. ЛПИ, 1984, вып. 84 с. 116—127. (ЛГМИ).
5. Ивлев Л. С. Химический состав и структура атмосферных аэрозо-лей. — Л.: изд-во ЛГУ, 1982. — 364 с.
6. Израэль Ю. А., Кароль И. Л., Петров В. Н., Звенигород-ский С. Г. Моделирование глобального воздействия на озоносферу возможной ядерной войны. — Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума по атмосферному озону. Л., 1985, с. 53.
7. Кароль И. Л., Тимофеев Ю. М., Розанов В. В. Газовые примеси в атмосфере. — Л.: Гидрометеониздат, 1986. — 193 с.
8. Кароль И. Л. и др. Радиационно-фотохимические модели атмо-сферы. — Л.: Гидрометеониздат, 1986. — 193 с.
9. Смирнов В. И. Скорость конденсационного и коагуляционного роста частиц аэрозолей. — Труды ЦАО, 1969, вып. 92, с. 3—316.
10. Смышляев С. П., Аронова Е. Г. Численное моделирование особен-ностей вертикального профиля тропосферного озона. — Межвузовский сбор-ник. Л., изд. ЛПИ, 1984, вып. 84, с. 96—107. (ЛГМИ).
11. Юнге Х. Е. Химический состав и радиоактивность атмосферы. — М.: Мир, 1965. — 420 с.
12. Aldaz C. Flux measurements of atmospheric ozone over land and wa-ter. — J. Geoph. Res., 1969, v. 74, N 28, p. 6943—6346.
13. Chemical and Photochemical Data Sheets for Atmospheric Reaction. ed. Humpson R. E., Report N FAA—EE—80—17, US Department of Transporta-tion, Wash., 1980, p. 114.
14. Crutzen P. J., Gidel L. T. A two-dimensional model of the atmospe-ric photochemistry. — J. Geoph. Res., 1983, v. 88, N C11, p. 8379—8400.
15. Douglass J., Rachford H. On the numerical solution of heat con-duction problem in two and three space variables. — Trans. Amer. Math. Sos., 1956, v. 82, N 2; p. 421.
16. Jonston H. S., Podolske J. Interpretation stratospheric photochem-istry. — Rev. Geoph. and Space Phys., 1978, v. 16, N 4, p. 491.
17. Isaksen I. S. A., Crutzen P. J. Uncertainties in calculated hydroxyl radical densities in the troposphere and stratosphere. — Geophysica Norve-gica, 1977, v. 31., N 4—6, p. 1—11.
18. Klimovsky A. O. et al. Interaction of ozone with  $\gamma$ - $Al_2O_3$  sur- face. — React. Kinet. Catal. Letters, v. 23, N 1—2, 1983, p. 95—98.
19. Logan J. A. et al. Tropospheric Chemistry: Global Perspective J. Geoph. Res., 1981, v. 86, N C8.
20. Warneck P. On the role of OH and  $HO_2$  radicals in the troposphere — Tellus, 1974, v. 26, N 1—2, p. 39—47.
21. US Standart Atmosphere 1976, USA, Washington, NBS, 1977, 183 p.

## ГЛОБАЛЬНОЕ ПОЛЕ ОБЛАЧНОСТИ И СИНОПТИЧЕСКИЕ ВИХРИ (ПО НАБЛЮДЕНИЯМ С МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИСЗ)

С помощью искусственных спутников Земли (ИСЗ), автоматических и пилотируемых орбитальных станций существенно углублены знания не только о космической среде и планетах солнечной системы, но и о состоянии и ресурсах природной среды самой Земли.

К числу тех наук о Земле, использование космических методов в которых оказалось особенно плодотворным, относится метеорология в целом и, прежде всего, такие ее крупные разделы как физика облаков и учение о лучистой энергии (актинометрия).

За короткий (по сравнению с общим периодом метеорологических наблюдений) срок с помощью ИСЗ получен огромный объем информации об облачном покрове Земли, которая выгодно отличается от данных наземных наблюдений пространственной и временной однородностью, достаточно полным и равномерным освещением всех частей Земного шара.

Основу спутниковой информации об облачности составляют фотомонтажи облачного покрова, большая работа по составлению и дешифрованию которых проведена сотрудниками Гидрометеорологического центра СССР и Государственного научно-исследовательского центра по изучению природных ресурсов (ГосНИЦИПР) под руководством В. А. Бугаева, И. П. Ветлова, М. А. Петросянца, А. И. Бурцева и др. В этих же центрах было положено начало по разработке методик оперативного использования [9, 10], а также по упорядочению и обобщению спутниковой информации.

Большая работа по созданию архива спутниковых данных об облачности проведена (по указанию акад. Г. И. Марчука) сотрудниками и студентами Ленинградского гидрометеорологического института (под руководством Л. Т. Матвеева), а также сотрудниками ГГО им. А. И. Воейкова, МГУ им. М. В. Ломоносова и Дальневосточного НИИ. Общее руководство этой работой осуществляли Гидрометцентр СССР (Н. В. Столыпина) и ВНИИГМИ-МЦД (В. И. Титов). К настоящему времени на магнитные ленты записаны данные о количестве облаков ( $n$ ) в узлах регулярной географической сетки размером  $5^\circ$  широты на  $10^\circ$  долготы с 1966 по 1977 гг. и  $5^\circ$  на  $5^\circ$  — за 1978—1985 гг.

Ниже рассматриваются некоторые результаты, полученные на основе анализа этой спутниковой информации. При этом наибольшее внимание уделено установлению связей облачности с полями других метеовеличин.

Остановимся, прежде всего, на годовых колебаниях количества облаков. Анализ их позволяет углубить существующие представления об условиях формирования и эволюции облаков. Согласно данным спутниковых наблюдений за 10-летний период (1971—1980 гг.), обобщенным и проанализированным в статье [6], количество облаков на всех материках, кроме Европы, летом больше, чем зимой.

Так, осредненные по материку месячные значения  $n$  в июле и январе равны соответственно 5,0 и 3,9 балла в Азии; 5,6 и 4,8 балла в Северной Америке; 3,9 и 2,9 балла в северной части Африки. Аналогичное соотношение наблюдается в южном полушарии: месячные значения в январе (лето) и июле (зима) составляют 4,5 и 3,0 балла в Австралии; 6,2 и 4,6 балла в Южной Америке и 6,1 и 3,8 балла в южной части Африки.

Осредненные по всей суше месячные значения  $n$  в северном полушарии равны 4,9—5,0 балла в июне — августе и 4,0—4,1 балла в декабре — феврале, в южном полушарии 4,6—4,9 балла в декабре — феврале (лето) и 3,5—3,7 балла в июне — августе (зима).

Результат этот — вероятность облачной погоды летом больше, чем зимой, — вообще говоря, представляется несколько неожиданным и не очевидным (прежде всего, для жителей Европы, где соотношение этих вероятностей обратное).

Чем объясняются эти особенности годовых колебаний  $n$ ? Конечно, известную роль играет усиление конвекции летом под влиянием местного притока солнечной радиации к земной поверхности (этот фактор можно назвать радиационно-термическим). Однако, по современным представлениям [7], роль этого фактора в формировании конвективных облаков не столь существенна, как это считалось до недавнего времени.

Об отсутствии существенного влияния радиационно-термического фактора на развитие конвекции свидетельствуют данные наземных наблюдений [2], согласно которым повторяемость мощных кучевых и кучево-дождевых (грозовых) облаков летом и днем лишь ненамного больше, чем зимой и ночью.

Сравнение условий в антициклонах (гребнях) и циклонах (ложбинах) также показывает, что влияние годовых и суточных колебаний притока солнечной радиации к земной поверхности (и связанных с ними изменений вертикального градиента температуры) второстепенно: приток солнечной радиации в антициклонах, во всяком случае, не меньше, чем в циклонах, и, тем не менее, конвективные облака (прежде всего,  $Cu\ congesta$  и  $Cb$ ) в них практически не образуются.

Определяющим фактором формирования облачного покрова служат вертикальные движения синоптического масштаба [5, 7], скорость которых имеет порядок  $10^{-3}$ — $10^{-2}$  м/с. Под их непосредственным влиянием образуется слоистообразная (в том числе, фронтальная) облачность в областях пониженного давления (циклонах и ложбинах), где преобладают восходящие вертикальные

движения (порождаемые сходимостью горизонтальных воздушных потоков).

Нисходящие вертикальные движения, преобладающие в областях повышенного давления, препятствуют образованию облаков или размывают принесенные сюда облака.

Однако роль крупномасштабных вертикальных движений не сводится только к формированию слоистообразной облачности или ее размыванию. Сильное влияние (его следует назвать динамико-термическим) эти движения оказывают на термическую стратификацию (вертикальный профиль температуры) и, как следствие, на возникновение мезомасштабных вертикальных движений (порядка  $10^{-1}$  —  $10^1$  м/с) и конвективных облаков.

При этом, однако, совершенно необходимо учитывать изменение крупномасштабной вертикальной скорости с высотой, прежде всего рост модуля при увеличении высоты в нижней тропосфере.

Качественный анализ формулы для изменения температуры воздуха во времени, а также результаты численного решения системы уравнений переноса тепла и влаги [7] показывают, что под влиянием динамико-термического фактора в областях с восходящими вертикальными движениями в нижней (а в ряде случаев, в средней и даже верхней) тропосфере вертикальный градиент температуры ( $\gamma$ ) растет со временем (увеличивается термическая неустойчивость), а в областях с нисходящими движениями  $\gamma$  уменьшается со временем (возрастает термическая устойчивость).

Таким образом, в областях пониженного давления с их восходящими вертикальными движениями создаются благоприятные условия не только для формирования слоистообразной (преимущественно  $Ns$  —  $As$  —  $Cs$ ), но и конвективной ( $Cu$  *cong*,  $Cb$ ) облачности. Хорошо, в частности, известно, что свыше 95% гроз наблюдается в областях пониженного давления (циклонах, ложбинах, седловинах).

В областях повышенного давления (антициклонах и гребнях) облака также наблюдаются, однако они имеют в основном переносно-трансформационную природу — согласно данным наблюдений свыше 80% облаков принесены сюда воздушными течениями из соседних областей низкого давления или сохранились в этих последних областях в процессе их заполнения и преобразования в области повышенного давления (как формирование, так и размывание облачной системы происходит за интервалы времени от нескольких часов до нескольких десятков часов).

Таким образом, проблема объяснения наблюдаемых географических особенностей распределения облаков и изменения во времени сводится к выяснению причин формирования синоптических вихрей.

Анализ глобального поля облачности приводит к однозначному заключению: в зарождении и последующей эволюции таких вих-

рей значителен вклад горизонтальной бароклинности атмосферы которая представлена в уравнении переноса вихря

$$\frac{d}{dt}(\Omega_z + 2\omega_z) = -(\Omega_z + 2\omega_z) \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \left( \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{2\omega_z}{T_v} \left( u_g \frac{\partial T_v}{\partial x} + v_g \frac{\partial T_v}{\partial y} \right)$$

членом<sup>1</sup>:

$$\left( \frac{d\Omega_z}{d} \right)_{\text{барокл}} = \frac{2\omega_z}{T_v} \left( u_g \frac{\partial T_v}{\partial x} + v_g \frac{\partial T_v}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где  $\Omega_z = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$  — вертикальная составляющая вихря скорости ветра;  $T_v = T(1 + 0,61q)$  — виртуальная температура,  $q$  — массовая доля водяного пара;  $u_g, v_g$  — проекции геострофического ветра на горизонтальные оси  $x$  и  $y$ ;  $2\omega_z = 2\omega \sin \varphi$  — кориолисов параметр;  $d/dt$  — знак индивидуальной (полной) производной по времени  $t$ .

Согласно этому уравнению, под влиянием адвекции холода (в общем случае — адвекции более низких  $T_v$ ) возникает новый или усиливается существующий положительный (циклонический) вихрь, при адвекции тепла (более высоких  $T_v$ ) зарождается отрицательный (антициклонический) вихрь.

Адвекция  $T_v$  определяется двумя величинами: горизонтальным градиентом виртуальной температуры и скоростью ветра.

Влияние горизонтальных контрастов температуры на возникновение и эволюцию синоптических вихрей лежит в основе адвективно-динамического анализа, наибольший вклад в развитие которого внесли Х. П. Погосян и Н. Л. Таборовский. Однако при одном и том же контрасте температур (превышающем некоторое значение) возникают как циклонический, так и антициклонический вихрь.

Уравнение (1) позволяет существенно уточнить этот результат. Для возникновения и усиления вихря того или другого знака важен не только горизонтальный контраст температур, но и направление переноса воздуха внутри зоны больших контрастов. При фиксированном горизонтальном градиенте виртуальной температуры вероятность зарождения и последующего усиления вихря растет при увеличении скорости геострофического ветра (горизонтального градиента давления) и угла между изотермами и изобарами.

Таким образом, горизонтальный контраст температур воздуха является хотя и важной, однако не единственной характеристикой зарождения вихрей (даже при учете одного лишь бароклинного

<sup>1</sup> Как ни прост переход от обычного вида этого члена к приведенному здесь, выполнен этот переход впервые в статье автора [4] в 1956 г. Отметим, что при этом переходе не вводится никаких упрощений.

лена, не говоря уже о том, что уравнение переноса вихря включает еще несколько членов).

К настоящему времени получено большое количество синоптических и статистических данных, свидетельствующих о важной роли горизонтальной бароклинности (адвекции температуры и влажности) в зарождении и эволюции синоптических вихрей.

Назовем здесь хорошо известные (добытые синоптической практикой) факты.

1. Возникновение циклонов только на холодных фронтах (где, по самому смыслу такого фронта, наблюдается адвекция холода).

2. Образование и усиление антициклонов (гребней) в областях выноса теплого воздуха (типичный пример — распространение отрога Сибирского антициклона на южную Европу под влиянием выноса тепла с Атлантики).

3. Регенерация циклонов под влиянием затока холодного воздуха в его тыловую область.

4. Отклонение траекторий циклонов по направлению к полюсу, а антициклонов — к экватору.

В движущемся с запада на восток циклоне в той его части, которая обращена к полюсу, преобладает адвекция холода и, как следствие, новообразование вихря (циклогенез); в части, обращенной к экватору, под влиянием адвекции тепла — уменьшение вихря. Сложение переносной скорости вихрей со скоростью, обусловленной изменением вихря под влиянием адвекции холода — тепла, приводит к тому, что траектории циклонов в большинстве случаев имеют вид сходящихся к полюсам спиралеобразных кривых.

5. Аномальные («ныряющие») циклоны: в тех случаях, когда в части циклона, обращенной к полюсу, располагается теплый воздух и наблюдается адвекция тепла, в согласии с рассуждениями предыдущего пункта, циклон приобретает составляющую скорости движения по направлению к экватору.

6. Уменьшение скорости движения вихрей по сравнению со скоростью воздушного потока (согласно опытным данным, первая скорость составляет 50—70% от второй).

При обычном распределении температуры в тыловой части углубляющегося циклона преобладает адвекция холода и вихреобразование, а в передней — адвекция тепла и разрушение вихря. Данные С. С. Ключарева подкрепляют это заключение: вычитая из фактического изменения давления изменение, обусловленное переносом циклона, он нашел, что разность, названная динамическим изменением давления, отрицательна в тыловой части и положительна в передней части циклона. Подчеркнем, что обычно наблюдаемые отрицательные барические тенденции в передней и положительные в тыловой части циклона обусловлены переносом самого вихря воздушным потоком.

Порождаемая вихреобразованием составляющая движения циклона противоположна по направлению скорости воздушного потока (с которой смещался бы циклон при отсутствии влияния термической адвекции).

Особый интерес для объяснения особенностей глобального поля облаков представляют статистические данные об образовании движения синоптических вихрей. Первые исследования из этой области выполнены Х. П. Погосьяном [11] и С. Петерсеном, а затем продолжены А. П. Барабашкиной, О. К. Ильинским, А. П. Крыжановской, Х. Х. Хайруллиным, К. И. Чуканиным [12], Н. Г. Давыдовой [3], П. Д. Астапенко, Г. П. Милашенко [8] и др.

Один из важных выводов, который следует из этих работ сводится к тому, что циклоны образуются над сушей (материками) летом чаще, а зимой реже, чем над водной поверхностью (Мировым океаном); вероятность возникновения антициклонов наоборот над сушей летом меньше, а зимой больше, чем над водой.

Так, по данным Х. Х. Хайруллина [1], подсчитавшего повторяемость образования и разрушения синоптических вихрей за 10-летний период (1963—1972 гг.) в зоне  $20-90^\circ$  с. ш., отношение числа вновь образовавшихся циклонов к числу антициклонов составляет на суше 2,8—3,0 в апреле—сентябре и только 0,8—1, в октябре—феврале, над водной поверхностью это отношение наоборот, мало (1,2—2,0) в теплую и велико (2,8—3,2) в холодную половину года.

Объяснить эти опытные данные возможно лишь на основе предположения о важной роли горизонтальной бароклинности в формировании вихрей.

Уже ранней весной тонкий деятельный слой материков быстро прогревается солнечной радиацией и затем в течение большей части теплого полугодия сохраняет более высокую (по сравнению с поверхностью океана) температуру. Под влиянием турбулентного обмена разность температур между сушей и водой распространяется и на атмосферу. Перенос воздушных масс с океана на материк в этих условиях представляет в большинстве случаев адвекцию холода на материке и, как следствие, создает благоприятные условия для циклогенеза и образования облаков.

В холодную половину года в условиях отрицательного радиационного баланса деятельный слой материков (с его малым запасом тепла) быстро охлаждается и становится по сравнению с океаном более холодным. Совершенно естественно, что на материках при этом преобладает адвекция тепла, способствующая антициклогенезу и рассеиванию облаков.

В хорошем согласии с этим выводом находятся данные о повторяемости ясного неба и облачности различных градаций, приведенные в таблице. Поскольку на материках летом преобладает

иклогенез, а зимой антициклогенез, то, с одной стороны, летом  
 ольше, чем зимой повторяемость облачности 8—10 и 5—7 баллов,  
 с другой стороны, меньше повторяемость безоблачной (ясной)  
 малооблачной (1—4 балла) погоды.

Осредненная по материкам и океанам  
 вероятность (%) ясного неба (О) и облачности 1—4, 5—7 и 8—10 баллов  
 по наблюдениям со спутников в 1971—1980 гг.

Материки и океаны	Январь				Июль			
	0	1—4	5—7	8—10	0	1—4	5—7	8—10
Европа	10,0	19,1	27,2	43,7	12,5	22,7	33,6	31,2
Азия	32,2	25,1	20,4	22,3	17,0	23,5	31,0	28,5
Южная Америка	28,5	24,1	21,5	25,9	16,3	23,4	31,4	28,9
Северная Америка	25,4	22,1	26,3	26,2	9,0	23,3	37,1	30,6
Северная часть Африки	41,6	28,4	19,3	10,7	34,6	22,1	26,2	17,1
Южная Америка	4,2	18,4	39,6	37,8	12,7	33,5	33,5	20,3
Южная часть Африки	5,0	21,5	35,1	38,4	20,1	36,1	31,4	12,4
Австралия	16,8	31,8	29,8	21,6	30,5	36,9	22,2	10,5
Антарктида	64,0	18,1	10,1	7,8	66,1	14,8	10,7	8,4
Полушария:								
северное полушарие	29,4	24,2	22,5	23,9	16,7	23,2	32,2	27,8
южное полушарие (без Антарктиды)	7,2	22,1	36,3	34,3	18,5	34,8	30,5	16,2
Океаны:								
северное полушарие	18,4	20,9	29,1	31,6	9,8	22,6	32,0	35,6
южное полушарие	2,5	13,6	37,1	46,8	3,1	12,3	36,7	47,9
Северное полушарие	22,7	22,1	26,6	28,6	12,4	22,8	32,1	32,7
Южное полушарие (без Антарктиды)	3,1	14,5	37,0	45,4	4,8	14,9	36,0	44,3

Наиболее значительно различаются летом и зимой повторяе-  
 мости ясного неба. Над Азией безоблачная погода в июле и ян-  
 варе наблюдается соответственно в 17 и 32% случаев, над Север-  
 ной Америкой — в 9 и 26%, над северной частью Африки в 35 и  
 2%. Над сушей северного полушария в целом повторяемость  
 ясного неба составляет 17% в июле и 30% в январе. Над сушей  
 южного полушария (без Антарктиды) эта повторяемость равна  
 18% в январе (лето) и 18% в июле (зима).

Облачность 8—10 баллов, наоборот, летом наблюдается чаще, чем зимой: повторяемость ее в июле больше, чем в январе над Азией и Северной Америкой на 5%, северной частью Африки — на 6%, над сушей северного полушария в целом — на 4%. Повторяемость облачности 8—10 баллов над сушей южного полушария в целом составляет 35% в январе (лето) и только 16% в июле (зима).

Значительная облачность (5—7 баллов) подчиняется той же закономерности, что и сплошная: повторяемость ее над сушей северного полушария в июле на 10% больше, чем в январе.

Исключительно важны (для обоснования развиваемых взглядов) закономерности сезонных колебаний незначительной (преимущественно кучевой) облачности 1—4 балла. Широко распространено представление об определяющей роли притока солнечной радиации к земной поверхности в формировании этой облачности. В таком случае повторяемость облачности 1—4 балла летом должна была бы быть существенно больше, чем зимой. Однако, согласно данным таблицы, вероятность образования облачности 1—4 балла летом не только не больше, но и несколько, а в южном полушарии и значительно, меньше, чем зимой практически на всех материках (исключение составляет Северная Америка, где эта вероятность в июле на 1% выше, чем в январе). Повторяемость облачности 1—4 балла в январе (лето) меньше, чем в июле (зима) над Южной Америкой на 15%, над южной частью Африки — на 14% и над Австралией на 5%. Над сушей в целом повторяемость облачности 1—4 балла составляет: в южном полушарии 35% в июле (зима) и только 22% в январе (лето); в северном полушарии 24% в январе и 23% в июле.

Противоположный (по сравнению с другими материками) годовой ход количества облаков в Европе связан, как показывает таблица, в основном с особенностями сплошной облачности 8—10 баллов: повторяемость ее здесь в январе на 12,5% больше, чем в июле (в то время как на всех других материках, не исключая и Евразии, эта повторяемость зимой меньше, чем летом).

Как уже указывалось выше, обусловлено это влиянием океанических циклонов над Атлантикой формируется и соответственно выходит на Европу зимой больше, чем летом. По этой же причине повторяемость ясного неба на 2,5% меньше и малооблачной погоды (1—4 балла) на 3,6% в январе меньше, чем в июле.

Ряд других сведений о глобальном поле облаков приведен в монографии [5].

Многолетний опыт анализа синоптических материалов, статистические исследования зарождения и движения синоптических вихрей, особенности пространственного распределения и временных колебаний глобального поля облаков позволяют заключить 1) в формировании и эволюции полей давления и движения атмосферы (и прежде всего, вихрей синоптического масштаба — цикло-

ов и антициклонов) важную роль играет горизонтальная баролинность, однозначно связанная с геострофической адвекцией виртуальной температуры воздуха; 2) вертикальные движения синоптического масштаба служат непосредственной основной причиной образования и развития систем слоистообразных облаков; 3) изменение крупномасштабной вертикальной скорости с высотой в первую очередь, рост модуля ее в нижней и средней тропосфере) приводит к перестройке термической стратификации (вертикального градиента температуры), сопровождающейся возникновением мезомасштабных вертикальных движений и формированием конвективных облаков.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ и прогноз циклонических процессов в системе общей циркуляции атмосферы. Под ред. Н. В. Колобова. — Казань, изд. Казанского университета, 1979. — 131 с.
2. Антипова Л. П., Астапенко П. Д., Александрова Л. Д., Мошников А. Н. Основные характеристики кучево-дождевой облачности в районе аэропорта. — В сб.: Авиационная метеорология. Л., изд. ОЛАГА, 1979, с. 10—15, 16—30, 34—37.
3. Давыдова Н. Г. К вопросу о распределении и основных путях движения циклонов и антициклонов в южном полушарии. — Тр. Гос. океанографич. ин-та ГУГМС, 1964, вып. 72, с. 46—56.
4. Матвеев Л. Т. Качественные правила условий вихреобразования в атмосфере и результаты проверки их. — Метеорология и гидрология, 1956, № 4, с. 28—31.
5. Матвеев Л. Т. Динамика облаков. — Л.: Гидрометеоздат, 1981. — 311 с. (Дополн. изд.: Cloud dynamics. Dordrecht, Reidel Publ., 1984, 440 p.).
6. Матвеев Л. Т., Матвеев Ю. Л. Физико-статистический анализ глобального поля облачности. — Известия АН СССР, ФАО, 1984, т. 20, № 11, с. 1042—1054.
7. Матвеев Ю. Л. О роли крупномасштабных вертикальных движений в возникновении конвективных явлений в атмосфере. — Метеорология и гидрология, 1986, № 4, с. 4—11.
8. Милашенко Г. П. Карты повторяемости циклонов и антициклонов и распределения общей облачности по данным ИСЗ. Ред. Воскресенский А. И. — Л.: Гидрометеоздат, 1978. — 63 с.
9. Минина Л. С. Практика нефанализа. — Л.: Гидрометеоздат, 1970. — 326 с.
10. Мусаелян Ш. А. Климатические данные об облачном покрове Земли и перспективы их использования при решении задач спутниковой метеорологии. — Тр. Гидрометцентра СССР, 1968, вып. 30, с. 68—92.
11. Погосян Х. П. Сезонные колебания общей циркуляции атмосферы. — Тр. ЦИП, 1947, вып. 1 (28), 88 с.
12. Чуканин К. И. Влияние теплового состояния полярных районов на вихревую деятельность в атмосфере. — Проблемы Арктики и Антарктики, 1969, вып. 30, с. 66—72.

## АДВЕКТИВНО-КОНВЕКТИВНАЯ ТЕНДЕНЦИЯ ПОЛЯ ОБЛАЧНОСТИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

### 1. Введение

До настоящего времени в большинстве случаев обработки анализ и оценка спутниковых изображений проходили раздельно, т. е. отсутствовала взаимная связь обрабатываемых данных с предыдущими или последующими изображениями. Но такой подход к спутниковой цифровой информации не позволял использовать ее полное информационное содержание. Регулярный прием спутниковых данных, прежде всего с геостационарных спутников, дает возможность учитывать динамику развития метеорологических явлений, представленных на серии последовательных спутниковых снимков. Цель настоящей статьи — подготовить объективный метод определения поля движения облачности в трехмерном пространстве и с его помощью оценить метеотренд, т. е. дать сверхкраткосрочный прогноз положения облачности на следующие 2 часа.

При решении этой задачи целесообразно воспользоваться методами анализа сцен, обработки и распознавания образов. В последнее время был разработан целый ряд алгоритмов для определения поля движения на основе последовательности образов [2, 4]. Однако анализ этих алгоритмов показал, что для решения проблемы определения движения облачности в горизонтальном и вертикальном направлениях на основании последовательности изображений с геостационарного спутника ни один из известных алгоритмов не подходит. Облачность на спутниковых изображениях обладает «неприятным» качеством: ее очень тяжело охарактеризовать каким-нибудь свойством, инвариантным во времени. Типичные алгоритмы поиска совпадения, используемые для определения поля движения, основаны на том, что на изображении могут быть выделены какие-то локальные шаблоны, которые не изменяются во времени и, одновременно, достаточно характерны для данного изображения (например, вершины многоугольника). В изображениях облачности такие шаблоны отсутствуют. Методы, основанные на использовании градиентов, предполагают, что функция яркости, формирующая изображение, подвергается между двумя изображениями сдвигу, а не изменению, или же это изменение ничтожно малое. Понятно, что такая предпосылка является с точки зрения спутниковых изображений облачности проблематичной. Если рассматривать, например, изображения, снятые в области теплового инфракрасного спектра, где функцию яркости определяет температура на уровне верхней границы облаков, то

ри вертикальном развитии облачности изменяется и эта функция. Кроме того, известно, что и сама форма облачности может измениться даже в течение 30 минут (это наименьший интервал времени, в котором работает «Метеосат II»). Значит, надо было искать новый алгоритм для определения поля движения; алгоритм, привлекающий во внимание специфику снимков облачности в инфракрасном диапазоне длин волн с геостационарного спутника.

Изучив предварительные эксперименты, мы пришли к выводу, что самой устойчивой характеристикой в спутниковых изображениях в ИК диапазоне является их описание с помощью изотерм (изоплотностей). Исходя из этого был разработан алгоритм для определения поля движения на основании соответствия изотерм (изоплотностей). И хотя данный алгоритм использует также специфические свойства спутниковых тепловых изображений, отдельные его блоки могут найти и более широкое применение для определения поля движения из последовательности изображений любой функцией яркости.

Представление поля движения как последовательности матриц факторов скорости позволяет определить адвективную и конвективную тенденции, с помощью которых затем возможна интерполяция положения полей облаков в последующих сроках. Последнее позволяет дать и прогноз положения облачности в трехмерном пространстве. Разумеется, прогноз, вычисленный приведенным способом, можно использовать только для временного метеотренда. Величение заблаговременности сверхкраткосрочного прогноза требует дополнительного учета влияния топографии на основании цифровой модели рельефа, течения на высотах и его прогноза в мезомасштабе на отдельных уровнях абсолютной топографии. В будущем нами планируется такого рода модернизация предлагаемого алгоритма.

## 2. Постановка математического алгоритма

### 2.1. Формализация проблемы

Формализуем проблему расчета поля движения на основе использования последовательности изображений. Пусть  $u(i, j, t)$  идет интенсивность в точке  $(i, j)$  как функция пространства и времени  $t$ . Поскольку изображения записаны в цифровом виде съемка реализуется только в определенные сроки, надо рассмотреть дискретный случай

$$\{U^t\}_{t=t_0}^{t=t_1}, \quad (1)$$

где  $U^t = \|u_{ij}^t\|$ ;  $u_{ij}^t = u(i, j, t)$ ;  $i=1, 2, \dots, n$ ;  $j=1, 2, \dots, m$ . Индексы  $n$  и  $m$  определяют размеры изображения, а  $t_0 < \dots < t_1$  — это обсуждаемая последовательность сроков. Исходя

из приведенной последовательности изображений  $\{U^t\}$ , мы должны дать оценку (прогноз) для срока  $t_1$  ( $t_0 < t_1$ )

$$\hat{U}^{t_1} \cong \|\hat{u}_{ij}^{t_1}\| \approx \|u(i, j, t_1)\|; i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

При получении такой оценки можно выделить два основных этапа

На первом этапе осуществляется расчет поля движения, т. е. определяется последовательность

$$\left\{ (X^t, Y^t, Z^t) \right\}_{t=t_0}^{t_1-\tau+1}, \quad (3)$$

где  $X^t = \|x_{ij}^t\|$ ;  $Y^t = \|y_{ij}^t\|$ ;  $Z^t = \|z_{ij}^t\|$ ;  $i=1, 2, \dots, n$ ;  $j=1, 2, \dots, m$ . Вектор  $(x_{ij}^t, y_{ij}^t, z_{ij}^t)$  дает оценку скорости движения точки  $(i, j)$  в срок  $t$ ;  $x$  — это компонента скорости в направлении оси  $\vec{i}$ ;  $y$  — в направлении оси  $\vec{j}$ ;  $z$  — в направлении оси  $\vec{k}$ , которая перпендикулярна к плоскости изображения  $\vec{i}, \vec{j}$ .

На втором этапе полученное поле движения  $(X^t, Y^t, Z^t)$  используется для определения прогноза  $\hat{U}^{t_1}$ .

## 2.2. Определение поля движения

Процесс определения поля движения состоит из расчета элементов отдельных матриц скоростей  $X^t, Y^t, Z^t$ .

Первый этап состоит в определении скорости движения в горизонтальной плоскости  $\vec{i}, \vec{j}$ , т. е. сводится к оценке матриц  $X$  и  $Y^t$ . Алгоритм определения движения в горизонтальной плоскости основан на поиске соответствия изоплотностей. Как известно, каждое изображение можно достаточно точно представить набором из  $\kappa$  изоплотностей в том случае, когда  $\kappa$  достаточно большое число, а отдельные изоплотности  $c_L$  ( $L=1, \dots, \kappa$ ) выбраны адекватно. Адекватную  $\kappa$ -ую изоплотность можно найти с помощью известного алгоритма — так называемой коррекции гистограмм. Для решения этой задачи можно воспользоваться и любым другим алгоритмом, применение которого позволило бы найти такое представление набора изоплотностей  $c_1, \dots, c_\kappa$ , которое обеспечило бы получение гистограммы их распределения заданной формы. Здесь нужно лишь подчеркнуть, что с точки зрения описываемого алгоритма важно не то, каким способом были изоплотности  $c_1, \dots, c_\kappa$  выбраны, а то, чтобы они хорошо охарактеризовали ту часть изображения, движение которой исследуется.

Предположим, что изоплотности  $c_1, \dots, c_\kappa$  (будем их называть вектором управляющих изоплотностей, или же изотермом) редуцируют неосновную и сохраняют основную информацию об объекте

облачности) на образе. Тогда изображение  $U = \{u_{ij}\}$  можно разбить на  $k$  бинарных изображений:

$$B^{(L)} = \{b_{ij}^{(L)}\}, \quad b_{ij}^{(L)} = \begin{cases} 1, & \text{если } u_{ij} < c_L, \quad i=1, 2, \dots, n; \\ 0, & \text{если } u_{ij} \geq c_L, \quad j=1, 2, \dots, m, \end{cases} \quad (4)$$

для  $L=1, \dots, k$  ( $B^{(L)}$  — это сечение изображения  $U$  на уровне плотности  $c_L$ ).

Объект в изображении  $B^{(L)}$  выступает в качестве связанного множества точек  $(i, j)$ , для которых  $b_{ij}=1$ . Алгоритм распознавания поля движения на основании изоплотностей предполагает, что ги объекты (релятивно) инвариантные по времени, т. е. в двух оследующих изображениях они не будут отличаться формой, только положением. Поскольку объект вполне охарактеризован воими контурами и эти контуры определены изоплотностью, можно оворить о методе соответствия изоплотностей.

Рассмотрим теперь бинарные изображения  ${}^{(L)}B^{t_k}$  и  ${}^{(L)}B^{t_{k-1}}$  моменты времени  $t_{k-1}$  и  $t_k$ , созданные с помощью изоплотности  $c_L$ , в которых находятся объекты  $Q_{k-1}$  или же  $Q_k$ . Соответствие объектов  $Q_{k-1}$  и  $Q_k$  будем искать по отдельным точкам, причем, тобы не изучать атипичные точки, сначала сглаживаем границы объектов известными алгоритмами эрозии и дилатации бинарных объектов [1]. Рассмотрим точку  $(i_0, j_0)$ , которая находится не далее чем  $h_{\max}$  (выбранная константа) от границы объекта  $Q_k$  в направлении оси  $\vec{i}$ . Определим расстояние  $l_k$  этой точки от ближайшей границы объекта  $Q_k$  вдоль оси  $\vec{i}$ . Затем определяем расстояние  $l_{k-1}$  точки  $(i_0, j_0)$  от границы объекта  $Q_{k-1}$  вдоль оси  $\vec{i}$ . Поиск ограничен расстоянием  $l_k + p_{\max}$  ( $p_{\max}$  — выбранная константа) в обоих направлениях: от точки  $(i_0, j_0)$  в направлениях  $\vec{i}$  и  $-\vec{i}$ . Действующей границей объекта  $Q_{k-1}$  считается только соответствующая (одинакового типа) граница объекта  $Q_k$ : «передней» границе  $Q_k$  соответствует «передняя» граница  $Q_{k-1}$ ; аналогично для «задних» границ. После обнаружения такой границы реализуется вычисление оценки скорости вдоль оси  $\vec{i}$  для точки  $(i_0, j_0)$  как

$$(l_{k-1} - l_k) / (t_k - t_{k-1}). \quad (5)$$

Аналогично определим оценку скорости в точке  $(i_0, j_0)$  вдоль оси  $\vec{j}$ . Применяв этот алгоритм для всех точек изображения, получим в объекте  $Q$  четыре вида точек: точки с оценкой обеих компонент скорости, лишь с компонентой  $\vec{i}$ , лишь с компонентой  $\vec{j}$  и точки без оценки компонент скорости. Если предположить, что объект  $Q$  является «прочным», т. е. что он сдвигается целым, и все его точки должны иметь одинаковые векторы скорости, то

вполне логичным является распространение оцененных векторов скорости также на те точки объекта  $Q$ , векторы скорости которых невозможно было определить ранее. И действительно, когда объект  $Q$  имеет форму прямоугольника, то во всех точках (там, где возможно) определяется один и тот же вектор скорости, который действительно описывает сдвиг данного объекта. Однако в случае кругового объекта  $Q$  ситуация уже не так проста. Более подробный анализ показывает, что в этом случае только осреднением компонент векторов скорости всех точек в объекте  $Q$  можно получить правильный вектор скорости объекта. Поскольку в реальных случаях (например, облачность на спутниковых изображениях) объекты в общем не прочные, более удобным является применение обеих требуемых операций (независимо от формы объекта) — распространение векторов скорости на точки объекта в которых они не были первично определены, и их сглаживание с помощью осреднения. Обе эти операции можно объединить, если воспользоваться процедурой локального осреднения, вычисляя скорость в точке  $(i_0, j_0)$  вдоль оси  $i$  (аналогично вдоль оси  $j$ ) по формуле

$$\bar{x}_{i_0, j_0} = \frac{1}{\gamma_{i_0, j_0}} \sum_{i=i_0-q}^{i_0+q} \sum_{j=i_0-q}^{j_0+q} x_{i, j}. \quad (6)$$

Суммирование в формуле (6) производится по тем точкам, в которых скорость была определена либо первичным способом, либо в них уже была рассчитана средняя скорость с помощью описываемого алгоритма ( $\gamma_{i_0, j_0}$  — количество учитываемых точек в соответствующей локальной точке  $(i_0, j_0)$ ). Процедура локального осреднения предполагает, что если в некоторой точке  $(i, j)$  в соответствии с формулой (6) уже получено значение  $x_{i, j}$ , то во всех остальных расчетах по формуле (6) для точек объекта используется именно это среднее значение, а не оригинальная величина  $x_{i, j}$ . Применение этой локальной операции дважды для всех точек объекта (первый раз сглаживание начинается с левого верхнего угла и «распространяется» вправо и сверху вниз:  $j=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n$ ; и другой раз наоборот:  $j=m, m-1, \dots, 1; i=n, n-1, \dots, 1$ ) осуществляется сглаживание скоростей в каждой точке. Затем полученные таким образом значения скорости «распространяются» и на остальные точки объекта.

Объясним теперь смысл параметра  $\rho_{\max}$ , введенного ранее. Если в изображениях  $B^t$  и  $B^{t-k-1}$  находится более чем один объект, то применение вышеописанного алгоритма может привести к тому, что к точкам объекта  $Q_k \subset B^t$  будут приписаны и точки ближайшего объекта  $Q_{k-1} \subset B^{t-k-1}$ . Ограничение поиска параметром  $\rho_{\max}$  гарантирует исключение такой возможности при условии, что ве-

ичина параметра  $\rho_{\max}$  выбрана с учетом скорости возможного перемещения объекта  $Q_k$ : объект не должен сместиться в направлении осей  $i$  и  $j$  на расстоянии больше, чем  $\rho_{\max}$ , за интервал времени  $t_k - t_{k-1}$ . Значит, если в изображениях находятся объекты  $Q_k$  и  $Q_{k-1}$  на расстоянии больше, чем  $\rho_{\max}$ , то их нельзя считать соответствующими.

Здесь необходимо отметить еще один важный факт. Чтобы найти соответствие между объектами  $Q_k$  и  $Q_{k-1}$  (чтобы существовала хотя бы одна точка в объекте  $Q_k$ , для которой можно однозначно определить обе компоненты скорости его перемещения) их проекции на оси  $i$  и  $j$  не должны быть пустым пересечением. Следовательно, надо предполагать, что объект  $Q$  передвинется в течение отрезка времени  $t_k - t_{k-1}$  на расстояние меньше, чем размер его проекций на осях.

После оценки движения в горизонтальной плоскости  $\vec{i}, \vec{j}$ , т. е. оценив значения матриц  $X^t$  и  $Y^t$ , можно оценивать матрицу  $Z^t$ , характеризующую движение в вертикальном направлении (вдоль оси  $k$ ). Для этой оценки воспользуемся тем специфичным свойством изображений облачности в тепловом (инфракрасном) диапазоне спектра, согласно которому изменение величины  $u_{ij}$  (т. е. радиационной температуры верхней границы облаков) представляет собой по существу искомое перемещение в вертикальном направлении. Вычислим для каждой точки  $(i, j)$  объекта  $Q_k$  в срок  $t_k$  предполагаемую позицию этой точки в предыдущем сроке  $t_{k-1}$ :

$$\begin{aligned} I &= i - X_{ij}^{t_k} (t_k - t_{k-1}); \\ J &= j - Y_{ij}^{t_k} (t_k - t_{k-1}). \end{aligned} \quad (7)$$

Знание этой позиции позволяет оценить разность температур в этих двух точках

$$Z_{ij}^{t_k} = u_{ij}^{t_k} - u_{ij}^{t_{k-1}}, \quad (8)$$

которая может рассматриваться как оценка компоненты вектора скорости в направлении оси  $k$ . Учитывая стохастический характер алгоритма для расчета  $Z_{ij}$  используются только те точки  $(I, J)$ , для которых  $u_{IJ} \leq c_L$  (это требование должно выполняться для точек объектов  $L$ -го уровня).

Таким способом могут быть получены оценки для всех образов  $B^{(L)}$  ( $L=1, \dots, n$ ). Поскольку при реализации указанного выше алгоритма рассматривались лишь точки до расстояния  $h_{\max}$  от границы объекта  $Q_k$  в направлении внутрь, то поясами оцененных векторов скорости покрывается та часть изображения, которая была соответствующим способом охарактеризована выбранными изоплотностями.

Следующий шаг состоит в соединении оценок  $X^{(L)}$ ,  $Y^{(L)}$ ,  $Z^{(L)}$  сделанных по отдельным изоплотностям  $c_L$ , в совместную оценку поля движения  $(X, Y, Z)$ . Такая совместная оценка строится следующим образом: в точку  $(i, j)$  помещается та оценка  $x_{ij}^{(L)}$  (или же  $y_{ij}^{(L)}$ , или  $z_{ij}^{(L)}$ ), которая из всех вычисленных оценок в этой точке была определена при наименьшей изоплотности. С окончательного поля векторов рассчитаны средние значения для соответствующих квадратов размером  $32 \times 32$  км<sup>2</sup>. Полученные таким образом вектора  $(x_{ij}^{t_k}, y_{ij}^{t_k})$  характеризуют адвективную тенденцию (скорость адвективного движения), а  $z_{ij}^{t_k}$  — конвективную тенденцию облачности.

### 2.3. Составление прогноза

Изображение адвективно-конвективной тенденции облачности в подходящей графической форме имеет для метеоролога важное значение, и может найти свое самостоятельное применение. Все-таки, однако, главное назначение полученной оценки поля движения  $R^{t_k} \equiv (X^{t_k}, Y^{t_k}, Z^{t_k})$  состоит в другом — его можно применить для автоматизированного составления прогноза погоды с последующим его представлением в визуальной форме.

Первый шаг состоит в экстраполяции значения  $R^{t_k}$  для прогностического срока  $t_1$  ( $t_1 > t_0$ ). Для экстраполяции можно воспользоваться некоторым полиномом  $P^{(s)}(t)$  степени  $s$ . Процедура определения коэффициентов этого полинома состоит в следующем. Для каждой точки  $(i, j)$  с помощью компонентов вектора скорости  $X$  (или же  $Y$ , или  $Z$ ) определяется траектория движения соответствующей точки  $x_{ij}^{t_0}$ :  $x_{I-s, J-s}^{t-1}, \dots, x_{I-s, J-s}^{t-s}$ , где значения  $I$  и  $J$  вычисляются рекуррентно на основе соотношения (7). С помощью этой последовательности точек  $(t_0, x_{ij}^{t_0})$ ,  $(t-1, x_{I-1, J-1}^{t-1}), \dots, (t-s, x_{I-s, J-s}^{t-s})$  вычисляются коэффициенты экстраполяционного полинома  $P^{(s)}(t)$ . Тогда экстраполированное значение может быть вычислено на основе следующего соотношения  $x_{ij}^{t_1} = P^{(s)}(t_1)$ . Отсюда следует, что для построения полинома  $s$ -й степени необходимо иметь в своем распоряжении матрицы скорости для сроков  $t_0, t-1, \dots, t-s$ .

На втором шаге вычисляется предполагаемая позиция точки  $(i, j)$  в момент времени  $t_1$  и соответствующие значения плотности:

$$\begin{aligned} I &= i + x_{ij}^{t_1} (t_1 - t_0), \\ J &= j + y_{ij}^{t_1} (t_1 - t_0), \\ \hat{u}_{IJ}^{t_1} &= u_{IJ}^{t_0} + z_{IJ}^{t_1} (t_1 - t_0). \end{aligned} \quad (9)$$

Поскольку в общем случае соседние точки не должны обладать одинаковой скоростью движения, надо интерполировать между новыми позициями. Поэтому прогностические позиции всегда вычислены парами. Первая пара  $(i, j) \equiv (i_c, j_c)$  и  $(i, j+1) \equiv (i_A, j_A)$ , вторая пара  $(i, j) \equiv (i_c, j_c)$  и  $(i+1, j) \equiv (i_A, j_A)$ . Для каждой такой пары точек  $(i_c, j_c)$  и  $(i_A, j_A)$  применяется следующее интерполяционное соотношение:

$$u_{ij}^{t_i} = u_{i_c j_c}^{t_i} + \frac{(i - i_c)^2 + (j - j_c)^2}{(i_A - i_c)^2 + (j_A - j_c)^2} (u_{i_A j_A}^{t_i} - u_{i_c j_c}^{t_i}). \quad (10)$$

Соотношение (10) используется для всех точек  $(i, j)$ :

$$i = i_c, \dots, i_A; \quad j = j_c, \dots, j_A.$$

Чтобы обеспечить естественную связь полей облачности, на третьем шаге для целого изображения  $U^{t_i}$  применяется медиальный локальный оператор. Данный оператор позволяет для каждой точки  $(i, j)$  получить значение  $u_{ij}^{t_i}$ , используя девять значений  $u_{ij}$  в точках  $(i \pm \gamma, j \pm \gamma)$ ,  $(i \pm \gamma, j)$ ,  $(i, j \pm \gamma)$  и  $(i, j)$ , где  $\gamma$  — выбранное положительное число (радиус оператора). После этой обработки получим образ, прогнозирующий поле облачности, полученный с метеорологического спутника.

#### 2.4. Реализация на ЭВМ

Вышеупомянутый алгоритм описан с помощью языка ФОРТРАН 77 и реализован на ЭВМ ПДП 11/34, которая является составной частью системы для приема цифровых данных с метеорологических спутников WIRPS (СГМИ, Малы Яворник). Программа работает с данными так называемого инфра-канала спутника «Метеосат», которые после своего преобразования в подходящую картографическую проекцию записаны в виде матриц, состоящих из  $256 \times 256$  точек (что представляет  $1024 \times 1024$  км<sup>2</sup>). Для визуализации программы использовалась система COMTAL VISION ONE (также составная часть WIRPS). Время для расчета зависит от конкретных значений параметров алгоритма ( $n$ ,  $r_{\max}$ ,  $h_{\max}$ ,  $\gamma$ ), а также и от характера изображений: так, например, в приведенном случае время расчета составило 3÷12 минут для вычисления тенденции и 43 секунды для вычисления прогноза.

### 3. Анализ метеорологической ситуации 05.08.1985 г.

Метеорологическое обеспечение сельскохозяйственных кооперативов и их диспетчерских служб при уборке урожая в Малой Средне-Дунайской низменности предполагает комплексную обработку отдельных источников метеорологической информации. Подобного рода обработка требует создания специальной базы данных. Целый ряд специальным образом выбранных и детально про-

анализированных «уборочных» метеорологических ситуаций и служат основой такой базы данных, которая используется для оценок метеотренда [5, 6].

Структура и эволюция отдельных типов конвективной облачности зависят от неустойчивости стратификации, содержания водяного пара, вертикального профиля направления и скорости ветра. Особое влияние на развитие облачности оказывают расчлененность рельефа и географическая широта. В настоящее время различают четыре основных типа конвективных систем:

- а) одноячейковый;
- б) мультячейковый;
- в) суперячейковый;
- г) мезомасштабные конвективные системы.

В базе данных радиолокационных и спутниковых наблюдений Словацкого гидрометеорологического института в Малом Яворнике находится достаточное количество материалов для изучения первых трех типов, но совсем недостаточным является количество случаев с мезомасштабными конвективными системами (МКС). Причем, даже среди имеющихся не все случаи типа МКС удовлетворяют четырем основным критериям Маддокса [7]. На наш взгляд, критерии Маддокса вытекают из физико-географических циркуляционных условий над центральными областями США в течение летнего периода. Для области Центральной Европы они слишком строги: это относится прежде всего к пространственным и временным критериям МКС. Например, согласно этим критериям Маддокса, центральная холодная область МКС должна содержать изотермы с температурой  $-52^{\circ}\text{C}$  и ниже на площади, превышающей  $50\,000\text{ км}^2$ , а время продолжения МКС, т. е. период максимальной интенсивности, должен быть не менее 6 часов. По этой причине нами были разработаны более удобные критерии для МКС, учитывающие условия Центральной Европы [6].

В послеполуденный и вечерний периоды 5 августа 1985 г. территория Моравии и Словакии находилась на передней стороне большой ложбины пониженного давления, простирающейся из Скандинавии через Западную Европу вплоть до западной области Средиземного моря. Холодный фронт с волнами, сопровождаемый многочисленными грозами и обильными ливнями, перемещался через Баварию и южную область Чехии. Скорость его перемещения после 18 ч составляла  $55\text{ км/ч}$ , а само перемещение осуществлялось в северо-восточном направлении. На уровне  $850\text{ гПа}$  был в указанное время расположен теплый гребень ( $+16^{\circ}\text{C}$ ), проходящий в южном направлении через Словакию в северную часть Польши. Самые высокие дневные температуры воздуха в этот день в Центральной Европе были зафиксированы в Чехии, в области Теплице, Ланы, Чешско-Будейовице, и составляли  $30-33^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 1 изображены четыре образа с геостационарного спутника «Метеосат» (05.08.1985 г., моменты времени 18 ч 42 мин, 19 ч 10 мин, 19 ч 42 мин и 20 ч 10 мин), на которых видно дви-

жение мезомасштабной циклональной системы от области Нормберг—Мюнхен (18 ч 42 мин) до области Вроцлав—Вена (20 ч 10 мин). На этом рисунке проекции МКС преобразованы в равновеликую единую картографическую сеть геоинформационной системы МЕТЕОСИС/ДБ.

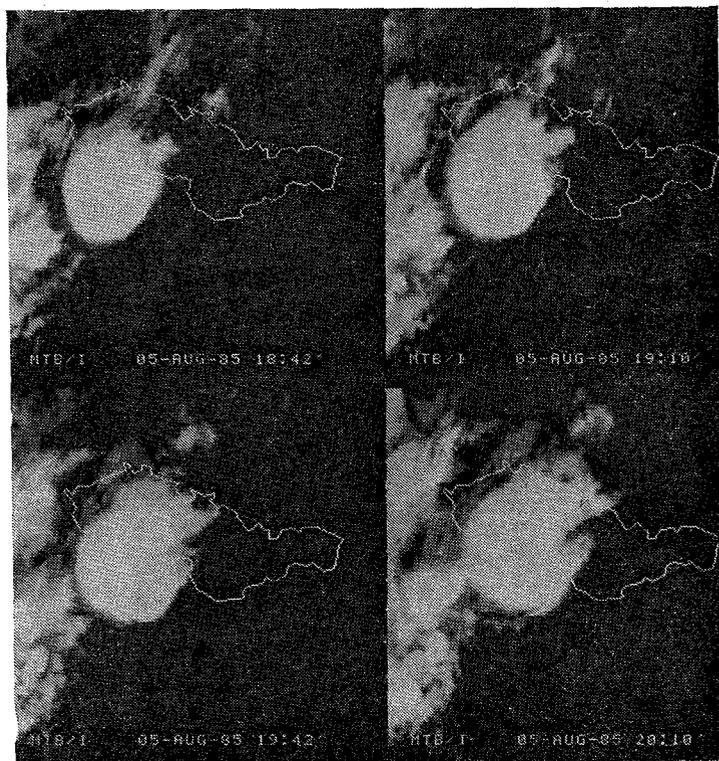


Рис. 1. Изображение мезомасштабной конвективной системы 05.08.1985 г. между Баварией и Чехией, полученное с использованием данных инфракрасного канала спутника «Метеосат» в моменты времени 18 ч 42 мин, 19 ч 10 мин, 19 ч 42 мин и 20 ч 10 мин.

На рисунке видна почти круговая структура МКС (по критерию Маддокса эксцентриситет области МКС 0,7). Центральная холодная область с температурой верхней границы облачности ниже или равной  $-52^{\circ}\text{C}$  находилась в центральной части системы. Максимальная сумма осадков была отмечена в центре МКС, между Чешско-Будейовице и Хуранов, — от 12 до 18 мм.

На рис. 2 изображены в квадратах единой картографической сетки ( $32 \times 32 \text{ км}^2$ ) вычисленные векторы скорости и направления движения по алгоритму, описанному выше. Исходная точка вектора движения находится в центре квадрата и показывает направление движения соответствующей части облачности, а скорости

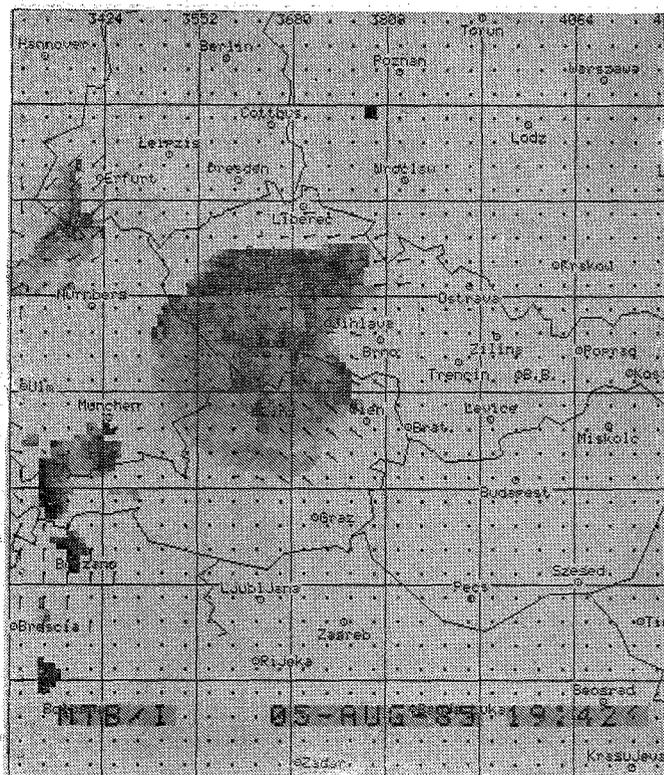


Рис. 2. Адвективно-конвективная тенденция МКС изображена в единой картографической сетке с квадратами  $32 \times 32 \text{ км}^2$ . Векторы (исходная точка в центре квадрата) выражают направление и скорость адвекции; тональность шкалы серого цвета — конвективную тенденцию (темно-серый цвет — развитие; светлосерый — распад).

движения определяется длиной вектора (в десятках км/ч). Более точное определение скорости обеспечивает интерактивная графическая система CONTAL VISTON ONE. В области Йиглавы можно наблюдать «расщепление» горизонтального поля вектора движения в интервале 19 ч 10 мин и 19 ч 42 мин на два направления.

Между городами Либерец и Йиглава изучаемая конвективная система состоит из северо-восточной и восточной компонент, а в области треугольника Йиглава, Линц и Вена — из юго-восточной компоненты адвективной тенденции. Причиной такого «расщепления» является влияние орографии Чешско-Моравской возвышенности.

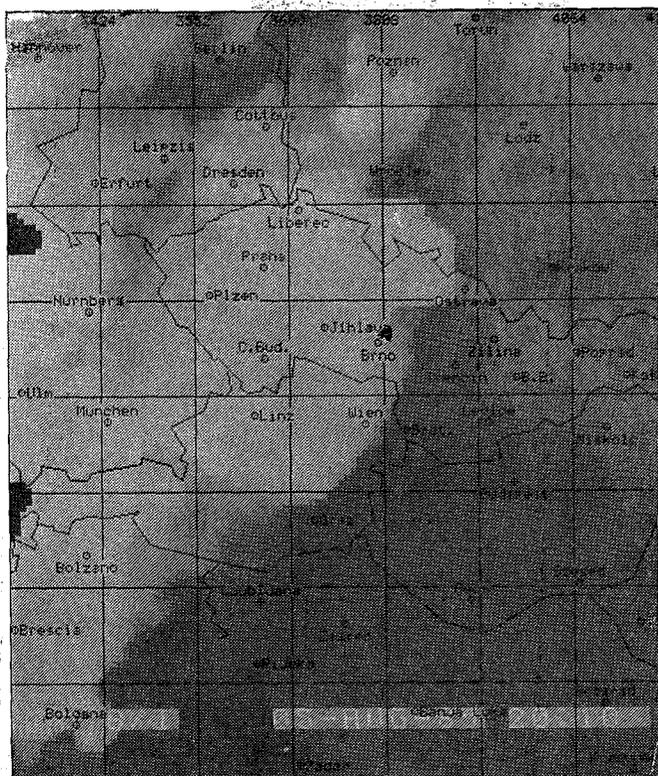


Рис. 3. Метеотренд поля облачности в соответствии с адвективно-конвективной тенденцией для срока 20 ч 10 мин 05.08.1985 г.

Тональность шкалы серого цвета отдельных элементов изображения размером  $8 \times 8 \text{ км}^2$  характеризует конвективную тенденцию облачности. Темносерый цвет изоплотностей определяет области вертикального развития, а светлосерые клеточки — области рассеяния верхних границ конвективной системы. С помощью метки на экране дисплея интерактивной системы COMTAL возможно определить изменение температуры (в градусах Цельсия), характеризующее вертикальное развитие облачности. Диагноз этой конвективной тенденции показывает, что, кроме южной и юго-западной частей, вертикальное развитие МКС очевидно.

Метеотренд как сверхкраткосрочный прогноз до 2 часов на площади  $1024 \times 1024$  км<sup>2</sup> для 20 ч 10 мин поля облачности, связанного с мезомасштабной конвективной системой, представлен

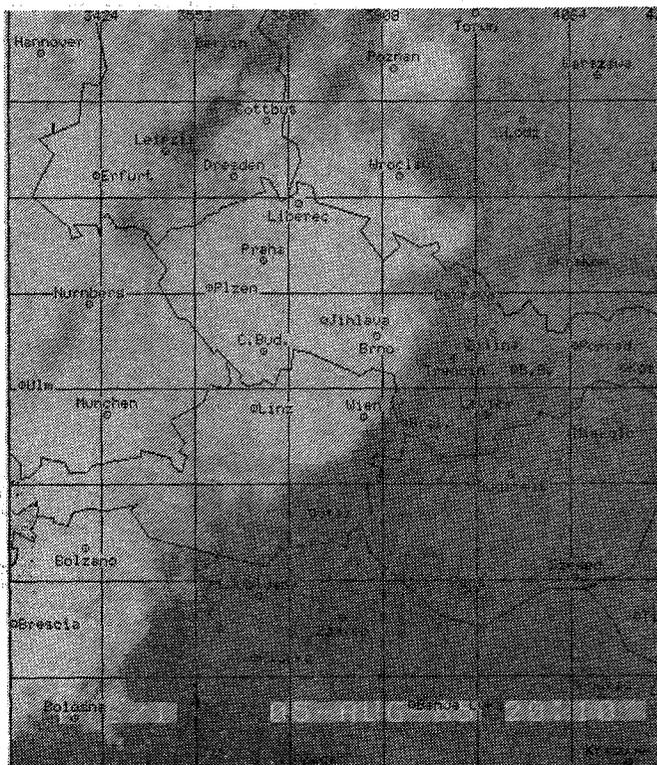


Рис. 4. Действительное положение поля облачности, полученное по инфракрасному каналу спутника «Метеосат» 05.08.1985 г. в 20 ч 10 мин.

на рис. 3. Действительное положение поля облачности МКС показывает реальное изображение, полученное с геостационарного спутника «Метеосат» за 20 ч 10 мин (см. рис. 4).

#### 4. Выводы

Методы распознавания образов, основанные на анализе движения объектов, находятся в метеорологии только в стадии начального использования. Их физическая интерпретация и успешность применения при оценке метеотренда увеличивается с повышением точности и частоты измеренных данных дистанционной

темки. Особенно четко эта тенденция проявляется в ситуациях «разрыва», т. е. когда эволюционный процесс развития фронтальной или же конвективной облачности достигает своего минимума или максимума.

Алгоритмы оценки адвективно-конвективной тенденции можно использовать и для двухволновых автоматизированных радиолокационных метеорологических систем типа АРМС (СГМИ, Малы Творник) и в случае объединения радиолокационных и спутниковых данных. Все это создает предпосылку для своевременной регистрации состояния разрыва и успешного прогноза процесса развития поля облачности основных типов конвективных систем.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность заведующему кафедрой ЭФА ЛГМИ проф. Л. Г. Качурину за постоянное внимание к данной работе, за полезные обсуждения и дискуссии, которые проводились в ходе ее выполнения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bruha I. Paralelni procesor CUP. Automatizacc, 1979, vol. 10.
2. Kaufman W. The handbook artificial intelligence III. Los Altos, California, 1982.
3. Potter J. Scene segmentation using motion information. Comp. Graph. and Image processing, 1977, p. 558—581.
4. V í s a k Z. Dve nove tendencie v rozpoznávání obrazov a ich aplikacia v meteorologii. Praca ku kandidatskemu minimu. CVUT Praha, 1985.
5. Podhorský D. Sversh-kratkosrochnyj prognoz oblachnosti i opasnyh javlenij s nej svjazannyh i nowcasting. INTERKOZMOS, Seminar «Metody objektivnogo analiza i prognoza». CSAV Praha, 1983, str. 92—100.
6. Podhorský D. Combined processing of meteorological information for very short-range weather forecasting in central Europe. Workshop on hydrologic applications of space technology. Cocoa Beach, Florida, 1985.
7. Maddox R. A. Mesoscale convective complexes. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1980, p. 1374—1387.

УДК 551.509.3

В. И. ВОРОБЬЕВ, И. Н. РУСИН

### ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОГОДЫ ЗА СЧЕТ АВТОМАТИЗАЦИИ

В нашей стране создана система сбора и обработки метеорологической информации для обеспечения объективного анализа и численного прогноза погоды [1]. Непрерывно совершенствуется технология выработки фоновых численных прогнозов как краткосрочных, так и на средние сроки [1, 2]. Доведение этих результатов до синоптиков, обеспечивающих локальное прогнозирование

ние, производится с помощью фототелеграфной передачи карт, передачи по каналам связи цифровых дубликатов этой информации в коде GRID. В Гидрометеорологическом центре СССР создана система информационно-логического обслуживания [3], которая позволяет по заявке потребителя осуществить подбор цифровой информации в виде проконтролированных телеграмм освещающих состояние атмосферы над отдельным пунктом, а также в виде метеорологических полей на нужном уровне, в нужной территории, построенных по результатам объективного анализа или по результатам прогноза. Эта информация может быть передана по каналам связи в Территориальные гидрометеорологические центры (ТГМЦ) страны. Таким образом, принципиально решена задача создания унифицированного обслуживания синоптиков на их рабочих местах не только визуальной, но и цифровой информацией о фактическом и прогнозируемом состоянии атмосферы.

В соответствии с этим встает проблема повышения эффективности локального краткосрочного прогнозирования погоды на базе усвоения синоптиками всего передаваемого по каналам связи материала как в виде карт, так и в цифровой форме. Однако опыт создания автоматизированных рабочих мест синоптика зарубежом показывает, что формальная автоматизация операций производимых синоптиком при составлении прогноза, может привести к нежелательным последствиям [10]. Внедрение автоматизированного места прогнозиста в США привело к самоустранению многих синоптиков на местах от составления прогнозов и не дало ожидавшегося существенного улучшения качества прогнозов. На наш взгляд, это произошло из-за неправильного определения цели при создании автоматизированного рабочего места синоптика (АРМС). Как следует из описания АРМС, приведенного в [9] оно предоставляет синоптику очень широкие возможности графического диалога с ЭВМ, резко облегчающего его труд, но не предусматривает существенного расширения объема выпускаемой им продукции. Качество прогнозов, составляемых синоптиком с помощью АРМС, остается на том же уровне, что и до внедрения АРМС. Практика прогнозирования показывает, что точность субъективных синоптических прогнозов по конкретным пунктам, как правило, выше, чем у прогнозов, которые составляются автоматически. По-видимому, важнейшей причиной этого является универсальность синоптика как «устройства для анализа и комплексации разнородной информации», хотя имеются и другие преимущества синоптического прогноза перед автоматическим. Отсюда следует, что для ликвидации недостатков существующих систем АРМС при переносе в условия нашей страны необходимо произвести предпроектные разработки, направленные на анализ процесса составления локального прогноза синоптическим методом в целях выявления резервов повышения его эффективности. Такой анализ был предпринят путем изучения производственного

цикла составления прогнозов погоды заблаговременностью 2—36 ч в Ленинградском гидрометеорологическом центре (ЛГМЦ) [4].

В соответствии с методикой анализа подготовленности процесса к внедрению автоматизации [5] прежде всего следует рассмотреть поэлементно состав выпускаемого изделия — краткосрочного прогноза погоды. Виды метеорологических характеристик, которые входят в состав прогнозов, разрабатываемых ЛГМЦ, приведены в табл. 1. Анализ этих данных позволяет сделать вывод, что для подавляющего большинства прогнозируемых величин имеются расчетные методы, то есть база для создания автоматической системы синоптических расчетов. Также видно, что прогноз погоды в пределах города дается по двум пунктам, а кроме того, по восьми разнообразным комбинациям территорий в пределах зоны ответственности ЛГМЦ. При прогнозировании синоптики производят полный комплекс расчетов метеорологических величин и явлений погоды только один раз (для Ленинграда). Детализация по пунктам в пределах города производится на основе статистических методов. Однако однократный расчет по Ленинграду не дает возможности создать прогнозы по территориям с точностью, близкой к той, которая достигается для Ленинграда. Важность применения расчетных методов для разработки прогнозов по характерным для территорий пунктам признается всеми синоптиками, но сами расчеты из-за дефицита времени не производятся. Все суточные прогнозы, приведенные в табл. 1, должны быть подготовлены для передачи их к 12 ч 30 мин московского времени. Сбор основной информации заканчивается в 9 ч 30 мин. На построение траекторий для одного пункта по трем заблаговременностям (12, 24, 36 ч) синоптик затрачивает около 6 мин (с учетом анализа и корректировки). Для разработки всех прогнозов с помощью расчетных методов синоптик для каждой заблаговременности должен снять путем интерполяции или дать экспертную оценку тридцати трех параметров, список которых приведен в табл. 2. На сбор этой информации по трем заблаговременностям затрачивается около 20 мин.

На проведении всего комплекса расчетов вручную по имеющимся методикам прогнозирования метеорологических величин и явлений (включая построение аэрологических диаграмм на три заблаговременности прогноза, снятие промежуточных данных, арифметические и логические операции) затрачивается в простых случаях 0,5 ч, в сложных случаях до 1 ч. Таким образом, полный цикл расчетов при составлении прогнозов с тремя заблаговременностями для одного пункта занимает у синоптика от 1 до 1,5 ч. Это означает, что использовать расчетные методы для прогноза хотя бы по нескольким пунктам территорий, для которых дается прогноз, дежурная смена синоптиков не успевает. Прогнозы по территории даются качественно и естественно, что их точность ниже, чем точность прогнозов по отдельному пункту на 5—10%.

## Метеорологические характеристики, прогнозируемые в ЛГМЦ

Прогнозируемые характеристики	Прогноз на сутки	Уточнение на полусутки
	А. Б. В. Г	А. Б. В. Г
Облачность	2.1.1.0	2.1.1.0
Осадки	2.1.8.1	2.1.3.1
Направление ветра	2.1.8.1	2.1.3.1
Скорость ветра	2.1.8.1	2.1.3.1
Температура экстремальная	2.1.8.1	2.1.3.1
Температура средняя	0.10.0.1	—
ОЯ по температуре (заморозки)	0.1.3.1	0.1.3.1
Шквал	2.1.8.1	2.1.8.1
Метель	2.1.8.1	2.1.8.1
Видимость	2.1.8.1	2.1.8.1
Дымка	2.1.8.1	2.1.8.1
Туман	2.1.8.1	2.1.8.1
Гололед — изморозь	2.1.3.1	2.1.3.1
Гроза	2.1.8.1	2.1.8.1
Град	2.1.8.1	2.1.8.1
Волнение	0.0.5.1	0.0.5.1
Уровень воды	—	4.0.0.1
Горимость	0.0.1.1	—
Медицинский тип погоды	0.0.1.0	—
Характер хода давления	0.0.1.0	—
Суммарная радиация за сутки	0.1.0.1	—
Ход суммарной радиации по часам	0.1.0.1	—

Примечание: А — число пунктов в пределах Ленинграда, Б — число городов, В — число детализаций по территориям, Г — 0 — нет расчетных методов, I — есть расчетный метод.

Таблица 2

анные, подготавливаемые дежурным синоптиком ЛГМЦ, для расчета на ЭВМ прогноза погоды в одном пункте для одной заблаговременности

г	Данные	№ п/п	Данные
	<b>ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ</b>		<b>АДВЕКТИВНЫЕ</b>
	Значение приземного давления	17	Температура у земли
2	Значение градиента приземного давления	18	Температура на 850 гПа
3	Скорость ветра у земли	19	То же 700 гПа
4	Скорость ветра на 850 гПа	20	То же 500 гПа
5	То же 700 гПа	21	То же 300 гПа
6	То же 500 гПа	22	То же 200 гПа
7	Экстремальная температура у земли	23	Точка росы у земли
8	Высота прогрева (охлаждения)	24	Дефицит точки росы на 850 гПа
9	Коэффициент типа синоптической ситуации	25	То же 700 гПа
0	Количество нижней облачности	2	То же 500 гПа
1	Вертикальная скорость по типу синоптической ситуации	1	То же 300 гПа
2	Вертикальная скорость на 850 гПа	28	То же 200 гПа
3	То же 700 гПа	2	Скорость ветра у земли
4	То же 500 гПа	30	Скорость ветра на 850 гПа
	<b>ИСХОДНЫЕ</b>	31	То же 700 гПа
15	Температура у земли	32	То же 500 гПа
16	Температура на 850 гПа	33	То же 300 гПа

Учитывая вышесказанные соображения, можно следующим образом сформулировать требования к АРМС. Прежде всего АРМС должно резко увеличить число прогнозов по отдельным пунктам, расположенным на территории, обслуживаемой бригадой дежурных синоптиков. Практически необходимо, чтобы АРМС было в состоянии выработать прогноз для любого пункта подведомственной территории. Вследствие того, что в синоптической практике необходимо проследить эволюцию свойств барического и термического полей, координаты пунктов, по которым АРМС обеспечит прогноз, не должны быть жестко фиксированными. Ориентировочное число пунктов, которые должны обеспечиваться прогнозом, может быть установлено по количеству метеостанций, включаемых ТГМЦ в систему пунктов, используемых для оценивания прогнозов. Например, в ЛГМЦ число таких обя-

зательных пунктов составляет двадцать четыре. Разумным представляется рекомендовать число пунктов, обслуживаемых АРМС от тридцати до пятидесяти.

Весь объем работы по прогнозированию должен быть направлен на создание прогнозов, отстоящих по времени друг от друга на 6 ч с заблаговременностью до 42—54 ч. В первом случае прогноз охватывает дневные часы следующих суток, а во втором — еще и ночные часы вторых суток. Последнее бывает важно, например, для прогноза заморозков с двухсуточной заблаговременностью. Отметим, что АРМС должно позволять прогнозировать не только с заранее заданными заблаговременностями. Оно должно обеспечивать и выдачу по заявке синоптика информации об экстремальных значениях метеорологических величин и их градиентов по траектории, а также быть в состоянии создать прогноз на любой заранее заданный момент.

В числе важнейших ограничений, накладываемых на работу АРМС, первым стоит ограничение по времени. Вся работа АРМС должна производиться не более чем за 0,5 ч. Такой жесткий временной регламент вытекает из сжатого срока от момента поступления информации до времени выдачи прогноза. Например, поступление окончательного варианта прогнозов синоптического положения в ЛГМЦ заканчивается только к 10 ч летнего московского времени, а в 11 ч уже должно начаться обсуждение прогноза. Только соблюдение временного ограничения позволит дежурному синоптику, работающему на АРМС, уточнить перед обсуждением свое решение с учетом последней поступившей информации. (Полезно указать, что использование АРМС в целом позволит начать разработку прогнозов раньше, чем в настоящее время, так как в цифровом коде прогностические поля поступают в большем объеме и на 1 ч раньше, чем по фототелеграфу).

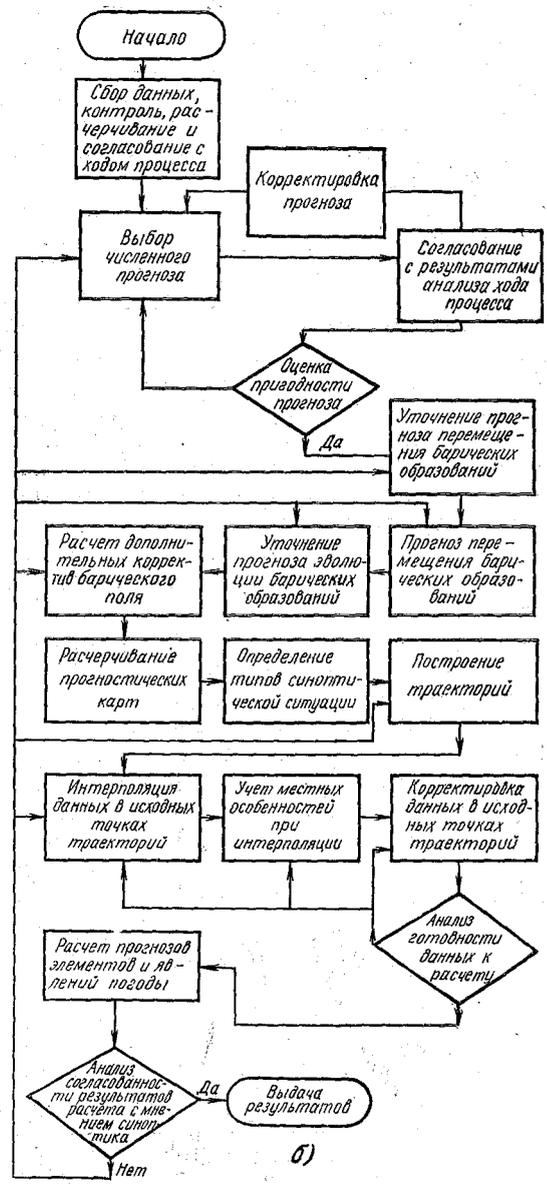
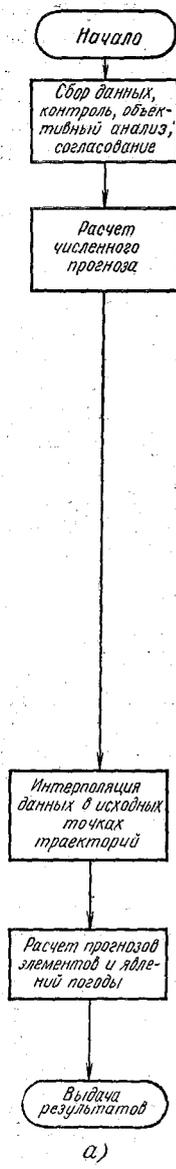
Вторым важнейшим ограничением является ограничение на качество подготовленных с помощью АРМС прогнозов. Понятно, что АРМС только в том случае будет принято синоптиками, если с его помощью удастся улучшить результат работы. Но превзойти качество локального синоптического прогноза в настоящее время не удастся. Поэтому, наиболее целесообразно ставить задачу таким образом, чтобы с помощью АРМС достигалось снижение брака при проведении расчетов. Внедрение в ЛГМЦ автоматизации программного обеспечения расчетных методов конвективных явлений (ливни, грозы, град, шквал), разработанного на кафедре метеорологических прогнозов Ленинградского гидрометеорологического института, показало, что даже в режиме испытания программ, когда вручную производились расчеты без составления прогнозов, ошибки человека имели место в 10% случаев. После первого года эксплуатации выяснилось, что в оперативном режиме расчеты, проведенные вручную, ошибочны в 20% случаев. Большую роль при этом играет психологический фактор. Например, за теплый период 1985 г. расчет прогноза количества осадков по

методу Е. М. Орловой [2] вручную и на ЭВМ по качеству значимо не различались, тогда как при прогнозировании на 24 и 36 ч оправдываемость прогноза количества осадков вручную составила всего 53%, а в автоматическом режиме оправдываемость сохранилась на уровне двенадцатичасового прогноза и составила 77%. Это легко объяснить, поскольку в формулировку прогноза на 24 и 36 ч включается только факт осадков, и в дальнейшем этот прогноз уточняется, так, что отношение к расчетам количества осадков с заблаговременностью более 12 ч у синоптика значительно менее ответственное. Таким образом, резервом повышения точности за счет применения АРМС является снижение брака при проведении расчетов по прогностическим методикам.

Подводя итоги сказанному, сформулируем основные факторы, позволяющие считать рациональным создание АРМС: необходимо резко расширить количество локальных прогнозов по пунктам и по заблаговременности при жестком временном регламенте работы; следует обеспечивать высокое качество прогностических расчетов, исключая ошибки при их выполнении. Принципиально подобным требованиям отвечают автоматические системы прогнозирования, одна из которых была создана в нашей стране [6]. Однако опыт эксплуатации этих систем показал, что увеличение объема выпускаемой продукции сопровождается снижением качества по основному пункту, для которого дает прогноз дежурная бригада синоптиков.

Сравнение отдельных прогнозов, сделанных вручную и автоматически по методу [6] для Ленинграда, позволило определить причины снижения качества прогнозов при автоматизации. Перечислим эти причины, основываясь на разбиении технологии краткосрочного прогноза погоды на этапы, приведенные на рисунке. Прежде всего отметим, что, в отличие от автоматического, прогноз вручную является гораздо более сильно регулируемым процессом. Синоптики не только разрабатывают прогноз, но и постоянно контролируют себя и вносят коррективы. Синоптический краткосрочный прогноз сочетает в себе не только технологический процесс преобразования исходной информации в прогностическую, но и систему управления этим процессом.

В частности, на этапе автоматического анализа контролируется только точность и полнота информации, а синоптик выявляет ее структуру, находит мелкомасштабные особенности и оценивает тенденции их развития. На этапе прогноза барического поля синоптик отбирает варианты прогнозов, поступивших из разных источников, следит за согласованием отобранного прогноза с выявленными особенностями поля, корректирует отобранный прогноз с учетом найденных ранее особенностей. В процессе построения траекторий он опирается уже на детализированный им прогноз барического поля, учитывает перемещение особых точек и фронтов и определяет ожидаемый тип синоптической ситуации. Этот последний фактор служит ему ориентиром для корректировки



Основные этапы технологии краткосрочного прогноза в автоматическом (а) и ручном (б) режимах.

раекторий, учитывается при интерполяции (отметим, что интерполирует синоптик не линейно, а с учетом наличия фронтов и других причин неоднородностей метеорологических полей). Таким образом, числовые значения метеорологических величин, подготовленные человеком для проведения расчетов при прогнозировании, гораздо лучше согласованы, чем при чисто автоматической подготовке. После проведения расчетов синоптик вносит в них поправки, согласуя влияние на развитие погоды местных особенностей при ожидаемом типе синоптической ситуации. Наконец, подготовленный прогноз проходит стадию обсуждения, во время которой уточняются все выводы, и только после доказательства обоснованности прогноз считается окончательно законченным, иначе в него вносят поправки, причем как показано на рисунке, они вносятся на разных стадиях разработки прогноза. Таким образом, становится ясно, насколько важной является система управления процессом краткосрочного прогнозирования, разработанная на практике. Отсюда следует, что создавая АРМС, необходимо предусмотреть не только автоматическое выполнение операции, но и систему управления всем ходом технологического процесса краткосрочного прогнозирования. Только в этом случае мы добьемся сохранения качества прогнозов по всем пунктам на уровне прогноза, разработанного по основному пункту. Поэтому АРМС должен обеспечивать как сам технологический процесс краткосрочного прогнозирования погоды, так и автоматизированную систему управления этим технологическим процессом (АСУТП) [5]. Главной целью АСУТП в данном случае будет обеспечение поддержания качества прогноза. Методически синоптическая метеорология еще не готова ответить на вопрос, как организовать контроль за ходом автоматического прогнозирования и как воздействовать на этот процесс. Получить ответ на этот вопрос — актуальнейшая практическая задача.

Однако, если предположить, что методические трудности преодолены, то встает вопрос о том, будет ли создание АРМС экономически эффективно. Ответить на него помогает предпринятый анализ экономической эффективности АРМС, удовлетворяющего выше перечисленным требованиям. Этот анализ произвести легко, если определить объем работы такого АРМС и ограничиться разбором изученной деятельности ЛГМЦ. Как показано в работе [7], суточные затраты на сбор и обработку информации вручную и на ЭВМ составляют около 7000 рублей. При этом ЛГМЦ выдает потребителям 193 прогноза погоды общего пользования, а также специальные прогнозы и штормовые предупреждения. Согласно этой же работе, себестоимость одного прогноза общего пользования составляет 7 рублей. Если учесть, что вычислительный центр, оснащенный СМ ЭВМ, в ЛГМЦ уже существует и что информация, необходимая для АРМС, уже передается, то для проведения в течение суток двух прогностических расчетов продолжительностью по 0,5 ч потребуется увеличить себестоимость

суточных затрат на сбор и обработку информации на 35 рублей (стоимость одного часа времени СМ ЭВМ). За этот счет можно будет произвести дважды в сутки расчеты прогнозов заблаговременностью 12, 24 и 36 ч по тридцати — пятидесяти пунктам территории, обслуживаемой ЛГМЦ, вместо проводимого в настоящее время расчета для одного пункта. Количество прогнозов общего пользования за сутки возрастает соответственно на сто восемьдесят — триста единиц. При этом стоимость работ по расчету прогнозов возрастает на 35 рублей и составит 1386 рублей в сутки. Таким образом, себестоимость продукции составит 2,8—3,7 рубля. Используя методические документы [8], можно вычислить экономический эффект внедрения АРМС в технологию краткосрочного прогноза. За счет гарантированного расширения объема выпускаемой продукции на действующих производственных мощностях в результате рационализации производственной программы и более рационального использования поступающей информации за одни сутки годовой экономический эффект составит при обслуживании 30 пунктов 503 740 рублей, а при обслуживании 50 пунктов — 755 770 рублей.

Приведенные цифры не учитывают повышение надежности расчетов за счет снижения брака. Они также резко возрастут, если учесть дополнительное повышение точности прогнозов по территории, которые с использованием АРМС могут достигнуть точности прогноза по пункту.

Подводя итоги, отметим, что разработка АРМС, удовлетворяющего требованиям, определенным в данной работе, во-первых, технически реальна, во-вторых, экономически выгодна даже в масштабах отдельных управлений. Научное и методическое обеспечение этих систем — насущная задача современной метеорологии, решение которой требуется для повышения эффективности метеорологического обеспечения народного хозяйства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по автоматизированной оперативной обработке гидрометеорологической информации и составлению численных прогнозов. — Л.: Гидрометеоздат, 1984. — 64 с.
2. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 1. — Л.: Гидрометеоздат, 1986. — 702 с.
3. Шмелькин Ю. Л. Методическое пособие. База данных оперативных гидрометеорологических наблюдений комплекса информационно-логической обработки для ЭВМ ЕС. — Л.: Гидрометеоздат, 1984. — 39 с.
4. Русин И. Н., Тутушкина Е. А. Об использовании численных прогнозов в синоптической практике. — Межвузовский сборник: Метеорологические прогнозы. Л., изд. ЛПИ, 1985, вып. 88, с. 15—25. (ЛГМИ).
5. Лебедевский М. С., Федотов А. И. Автоматизация в промышленности. — Л.: Лениздат, 1976. — 254 с.
6. Пержыкин И. Н. Численная схема элементов погоды Белорусского территориального Гидрометцентра. — Информационный сборник Гидрометцентра СССР, 1975, № 4, с. 23—29.

7. Хандожко Л. А., Ситняковская Н. Г., Смирнова А. В. К вопросу о стоимости прогностической информации. — Сборник работ Ленинградского гидрометеорологического центра, 1985, вып. 2(15), с. 73—86.

8. Методика определения экономической эффективности автоматизированных систем управления предприятиями и производственными объединениями. — М.: Статистика, 1979. — 62 с.

9. Klein W. H. The AFOS program and future forecast application. — Monthly Weather Review, 1976, vol. 104, N 12, pp. 1494—1504.

10. Snellman L. W. Operational forecasting using automated guidance. — Bulletin American Meteorological Society, 1977, vol. 58, N 10, pp. 1036—1044.

УДК 551.510.42

*А. П. БОБРОВСКИЙ, С. И. КРАСКО, А. Л. СКОБЛИКОВА,  
В. Г. СИРОТА, С. Н. ХВОРОСТОВСКИЙ, П. П. ХЛЯБИЧ*

## **СИСТЕМА МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ И ОХРАНЫ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В УСЛОВИЯХ ХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Контроль за содержанием примесей в атмосфере производственных помещений в условиях химического производства имеет ряд специфических особенностей. Во-первых, основные атмосферные загрязнители обусловлены характерными для данного производства технологическими процессами и поэтому, как правило, заранее известны. Набор их может быть относительно невелик, однако зачастую они обладают высокой химической активностью, затрудняющей их раздельное обнаружение. Во-вторых, их концентрации могут меняться в очень широких пределах — от допустимых до значительно превосходящих уровень ПДК.

Отсюда вытекают требования, предъявляемые к средствам контроля. Они должны быть избирательными, работать в широком диапазоне концентраций загрязнителей, обладая при этом значительным ресурсом и достаточным быстродействием. В идеале средства контроля должны влиять на технологический процесс путем выбора оптимальных режимов работы с допустимым выбросом вредных веществ в атмосферу и в то же время сокращать неоправданно избыточное время простоя оборудования между технологическими циклами (так называемое «запретное время» — время, необходимое для снижения концентрации примесей до уровня ПДК после прекращения работы источника загрязнений).

Имея это в виду, нами был создан комплекс макетов приборов для использования в условиях химического производства. Основными активными загрязнителями атмосферы в данном случае являются озон и галогенсодержащие соединения. Этим и обусловлен перечень созданных анализаторов.

Одновременно нами было обращено внимание на то, что традиционный метод очистки — вентиляция — лишь частично решает проблему, поскольку приводит к загрязнению атмосферы районов, прилегающих к промышленным предприятиям. В связи с этим нами разработан фотохимический метод уменьшения концентрации озона без выброса его в атмосферу.

Известно, что выбросы химических производств способствуют образованию фотохимического смога в промышленных районах. Возникает проблема прогноза его появления. С этой целью нами предложено устройство для оперативного контроля предсмоговой ситуации.

**Контроль содержания озона.** Существующие методы и приборы определения озона в воздухе помещений не удовлетворяют основным требованиям контроля — быстродействие и простота процедуры измерения. Например, принятые в настоящее время методы — иодометрический и электрохимический — обладают большой постоянной времени (более 5 мин), требуют высокой чистоты реактивов и специально подготовленного оператора, обслуживающего прибор [1].

Этих недостатков лишены приборы, работающие на оптико-абсорбционном принципе. Однако такие приборы в настоящее время серийно не выпускаются. Это заставило нас обратиться к разработке газоанализатора, блок-схема которого представлена на рис. 1. Газоанализатор собран на базе прибора АДС-4М. С целью увеличения чувствительности внесены изменения в систему подачи газа и электрическую схему прибора.

Ультрафиолетовое (УФ) излучение от ртутной лампы ВРМ-1 низкого давления проходит через измерительную кювету  $K_2$  и кювету сравнения  $K_1$  и попадает на фотоэлементы  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  с максимумом спектральной чувствительности в области 220—260 нм. Через кювету  $K_2$  попеременно пропускаются анализируемый воздух, содержащий озон (по магистрали АСД), и воздух, очищенный от озона (по магистрали ВСД). Протяжка газовой смеси осуществляется воздушным насосом. При этом в результате поглощения ультрафиолетового излучения в кювете  $K_2$  на фотоэлементы  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  попадают различные интенсивности световых потоков. С усилителя постоянного тока периодически снимается разностный сигнал, пропорциональный концентрации озона. Сигнал регистрируется самопишущим потенциометром КСП-4. Регулировка величины потока УФ излучения, поступающего в кюветы  $K_1$  и  $K_2$ , осуществляется поворотом цилиндрических диафрагм  $N_1$  и  $N_2$ .

Созданный газоанализатор прошел испытания в условиях химического производства с повышенным содержанием озона в помещении. Одновременно концентрация озона измерялась колориметрическим методом санитарной службой и прибором «Dasibi», модель 1003 АН, погрешность которого не более 3%, длительность одного измерения 25 с, порог чувствительности  $6,6 \cdot 10^{-3}$  мг/м<sup>3</sup>,

время релаксации не более 60 с. Оказалось, что описанный газоанализатор превосходит химические методы по быстродействию (постоянная времени менее 1 мин) и позволяет производить непрерывный контроль концентрации озона. Диапазон измерения концентрации озона данным газоанализатором 0,1... 20 мг/м<sup>3</sup>. Погрешность прибора не более 30% при концентрации озона порядка ПДК (0,1 мг/м<sup>3</sup>) и 3% при концентрации озона больше 1 мг/м<sup>3</sup>.

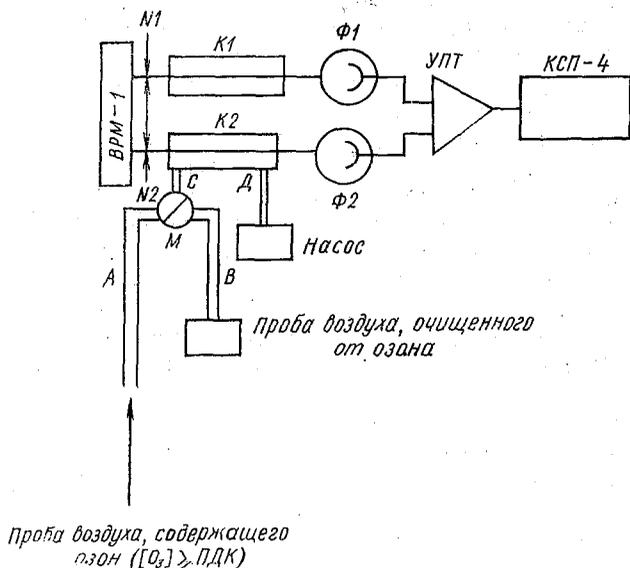


Рис. 1. Блок-схема газоанализатора озона.

**Контроль содержания галогенсодержащих соединений.** Большинство современных методов измерения концентрации галогенсодержащих соединений в атмосфере основано на предварительном сорбировании анализируемых галоидов с последующим анализом отобранных проб [1, 2]. Наличие двух этапов — отбор проб и анализ проб — приводит к следующим существенным недостаткам.

1. Необходима предварительная оценка измеряемой концентрации галоидов в атмосфере, так как этим определяется количество воздуха, прокачиваемого через сорбент.

2. Двустадийность процесса измерения делает невозможным оперативное измерение реальных концентраций галоидов, а также исключает непрерывное измерение концентрации.

3. Требуется постоянный контроль за скоростью газового потока через сорбент.

От этих недостатков в основном свободен электрохимический метод обнаружения галогенсодержащих соединений в атмосфере,

основанный на эффекте поверхностной ионизации молекул на платиновом электроде. На этом принципе основана работа галоидных течейскаателей (например, ГТИ-6) [3]. Однако достоинства указанного метода в существующих серийных приборах полностью не реализованы. Это объясняется тем, что для выполнения количественных измерений необходимо выполнить ряд условий:

- 1) обеспечить высокую стабильность температуры ионизирующей поверхности (не хуже 0,1%);
- 2) выдерживать хорошую стабильность скорости газового потока, идущего через датчик;
- 3) устранить дрейф нулевой линии записи концентрации в течение длительного времени.

Нарушение хотя бы одного из этих условий вызывает резкое изменение как чувствительности датчика, так и значительный дрейф нулевой линии записи, а следовательно, делает невозможным проведение количественных измерений. По этой причине галоидные течейскаатели используются только как индикаторные устройства.

Нами создана установка для измерения галогенсодержащих соединений в атмосфере во многом лишенная перечисленных недостатков. В качестве чувствительного (ионизирующего) элемента в установке использован стандартный датчик галоидного течейскаателя ГТИ-6. Датчик представляет собой систему из двух коаксиальных платиновых электродов — внутреннего накаливаемого эмиттера и наружного коллектора, между которыми приложена разность потенциалов (плюс на эмиттер). В зазоре между электродами протягивается исследуемая газовая смесь, при наличии в которой галоидных соединений возрастает ионная эмиссия с поверхности разогретого эмиттера и, как следствие, возникает ток в цепи коллектора. Приращение величины тока пропорционально парциальному давлению галоидсодержащих веществ в составе воздуха. Надо отметить, что датчик реагирует на широкий спектр соединений, однако чувствительность его к галогенсодержащим на несколько порядков выше. Для стабилизации температуры эмиттера датчика использована зависимость сопротивления платинового эмиттера от температуры. Стабилизатор температуры собран по схеме компенсационного стабилизатора. Применение данной схемы позволило обеспечить колебание температуры эмиттера менее чем на 0,1% при рабочей температуре  $T=1120 \dots 1220$  К. Стабилизация скорости газового потока через датчик выполнена путем включения в систему прокачки (после датчика) большого буферного объема ( $\approx 1$  м<sup>3</sup>), из которого постоянно велась откачка воздуха форвакуумным насосом. Для измерения ионного тока применялся измеритель малых токов ИМТ-05, сигнал с которого подавался на самописец.

Перечисленные технические решения позволили стабилизировать чувствительность установки, но при этом остался непредсказуемый дрейф нулевой линии записи концентрации, обуслов-

ленный изменением параметров элементов электрической схемы в процессе работы.

Для устранения влияния дрейфа нулевой линии записи была предложена оригинальная схема сравнения концентрации галогенсодержащих соединений в потоках воздуха, попеременно проходящих через датчик из атмосферы рабочего помещения и объема, где заведомо отсутствуют галоидные соединения. Переключение газовых потоков осуществлялось с частотой  $\approx 1$  Гц, при этом прокатка через воздухозаборники велась постоянно. В результате предложенных решений на ленте самописца фиксировался электрический сигнал, соответствующий разности двух сигналов: сигнала, обусловленного наличием галоидных соединений, и — начального тока (при отсутствии галоидов). Типичная запись сигнала представлена на рис. 2.

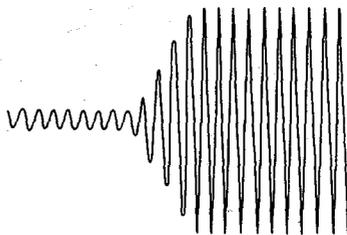


Рис. 2. Пример записи сигнала.

В результате примененных технических решений удалось создать макет анализатора, позволяющего вести непрерывную регистрацию галогенсодержащих соединений в атмосфере помещений химического производства в широком диапазоне концентраций.

Калибровка анализатора выполнена путем параллельных измерений концентраций галогенсодержащих соединений в атмосфере данным анализатором, а также фотокolorиметрическим методом с ксиленово-оранжевым красителем [4] и методом с ионноселективным электродом [5].

**Метод уменьшения концентрации озона в помещении.** Метод основан на явлении фотораспада озона под действием УФ света. В качестве источника УФ излучения использовались ртутные лампы, типа ДБ-30, максимум световой мощности которых при работе в резонансном режиме приходится на излучение с длиной волны  $\lambda = 253,7$  нм [6], поглощение которого вызывает фотодиссоциацию озона [7, 8].

Необходимое число ламп  $k$  и время их работы  $t$  рассчитывались из уравнения

$$n = n_0 \exp \left( - \frac{\mu \chi l \lambda k W_0 \eta}{V h c} t \right),$$

где  $W_0$  — световая мощность лампы;  $\eta$  — доля мощности, приходящая на излучение в резонансной линии  $\lambda = 253,7$  нм;  $\chi$  — коэффициент поглощения озона излучением  $\lambda = 253,7$  нм;  $l$  — длина оптического пути;  $\mu$  — квантовый выход фотодиссоциации озона;  $n_0, n$  — концентрации озона в начальный и текущий моменты времени соответственно;  $V$  — рабочий объем помещения;  $h$  — постоянная Планка;  $c$  — скорость света.

Значения параметров  $\mu$ ,  $\eta$ ,  $\chi$  выбирались из следующих соображений.

1. Квантовый выход фотолиза ( $\mu$ ) сильно зависит от состава газовой фазы — в озон-кислородной среде его величина лежит в пределах от 4 до 6 и увеличивается в присутствии некоторых примесей [7]. В то же время освещение загрязненной атмосферы может вызывать не распад, а, напротив, фотообразование озона [7, 9]. Поэтому для оценки величины квантового выхода в условиях реальной атмосферы нами было выполнено сравнительное исследование кинетики фотораспада озона в озон-кислородной и озон-воздушной средах (рис. 3) по методике [10, 11]. Оказалось, что константа скорости и, следовательно, квантовый выход фотораспада озона в озон-воздушной смеси в три раза меньше, чем в озон-кислородной, то есть лежит в пределах 1,3... 2.

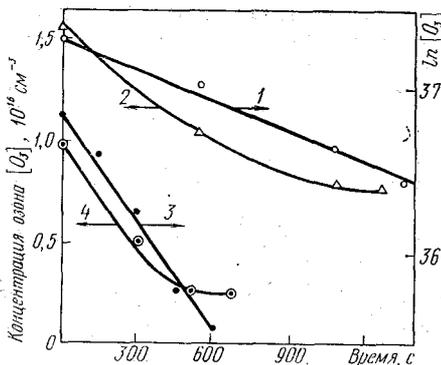


Рис. 3. Изменение концентрации озона под действием УФ излучения в озон-кислородной (4) и озон-воздушной (2) средах и кинетические кривые: 1 — в озон-воздушной; 3 — в озон-кислородной средах ( $P_{\text{общ}} \approx 4000$  Па,  $P_{\text{O}_3} \approx 40$  Па).

температуре, лежат в пределах 0,47... 1,1) · 10<sup>-17</sup> см<sup>2</sup> [7, 8, 12]. В наших оценках использовалось среднее значение величины  $\chi = 0,8 \cdot 10^{-17}$  см<sup>2</sup>.

В соответствии с данным расчетом были проведены испытания влияния УФ излучения на скорость уменьшения концентрации озона в условиях химического производства. Оказалось, что работа восьми ламп ДБ-30 мощностью  $W_0 = 30$  Вт снижает концентрацию озона в производственном помещении ( $V \approx 120$  м<sup>3</sup>) при работающей вентиляции до уровня ПДК в два раза быстрее, чем при работе только одной вентиляции. Скорость уменьшения концентрации озона определяется числом и расстановкой ламп. Отметим, что очистка воздуха помещения данным методом не сопровождается выбросом озона в атмосферу. Это является несомненным преимуществом по сравнению с традиционными методами очистки.

Применение предложенного комплекса — газоанализатор озона и лампы — позволяет снизить и контролировать концентрацию токсичного и коррозионно-активного газа — озона и, тем самым, улучшить качество воздуха в производственном помещении, по-

выснить срок службы и эффективность использования оборудования.

**Прогноз предсмоговой ситуации.** Известно, что накопление антропогенных загрязнений в атмосфере в определенных условиях может привести к образованию фотохимического смога [13]. Оперативное обнаружение предсмоговой ситуации в настоящее время является насущной задачей, в решении которой существуют немалые трудности. Одна из них состоит в том, что смог образуется при наличии в атмосфере определенной смеси загрязнителей, в то время как существующие газоанализаторы контролируют содержание определенных веществ или групп родственных соединений.

Один из способов обнаружения предсмоговой ситуации описан в [14]. Способ основан на реализации фотохимической реакции в пробе воздуха и оценке возникающего при этом уровня концентрации озона. Недостатком способа является то, что опасность возникновения смога оценивается по промежуточному относительно короткоживущему продукту — озону, концентрация которого в атмосфере подвержена сильным короткопериодическим вариациям, непосредственно не связанным с уровнем загрязнения [15, 16]. Можно ожидать, что более достоверным показателем возможности образования фотохимического смога будет концентрация одного из конечных продуктов атмосферных фотореакций — высокодисперсного фотохимического аэрозоля [13].

Это соображение положено в основу предлагаемого нами способа оперативного обнаружения предсмоговой ситуации в атмосфере. Способ основан на облучении пробы воздуха в фотохимическом реакторе и измерении концентрации возникающих при этом аэрозолей.\* По концентрации образовавшихся в реакторе фотохимических аэрозолей и предлагается судить об опасности возникновения фотохимического смога при данной загрязненности воздуха.

Для реализации данного способа предлагается устройство, которое состоит из воздуховода, фотохимического реактора, работающего в импульсном режиме, и 2-х канальной схемы регистрации аэрозольных частиц. Первый канал работает в паузах между импульсами УФ излучения. При этом измеряется исходная концентрация аэрозолей, характеризующая уровень аэрозольного загрязнения атмосферного воздуха. Второй канал работает в период засветки реактора и измеряет суммарную концентрацию исходного и вторичного (фотохимического) аэрозоля. Вычитанием сигналов можно получить величину, пропорциональную приросту концентрации аэрозоля в реакторе, то есть концентрации фотохимического аэрозоля.

\* Работа выполнена совместно с сотрудниками ЛИАПа — Казаченко В. И., Колобашкиной Т. В., Нейманом Л. А. и Турубаровым В. И.

Предлагаемое устройство обладает высоким быстродействием непрерывностью и возможностью автоматизации процесса измерения, что позволяет использовать его для оперативного обнаружения предсмоговой ситуации в атмосфере.

**Выводы.** Испытания измерительных приборов комплекса в условиях химического производства показали, что они превосходят приборы, используемые санитарной службой по быстродействию и точности измерений. Применение комплекса позволит улучшить качество и состояние атмосферы производственного помещения, существенно сократить «запретное время».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лейте В. Определение загрязнений воздуха в атмосфере и на рабочем месте. — Л.: Химия, 1980. — 343 с.
2. Shiratori M., Katsura M., Tsuchiya T. Proc. — Int. Meet. Fukuoka, Sept. 19—22, 1983, p. 45—49.
3. Теческатель галоидный ГТИ-6. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. — Л., 1975.
4. Методические указания по определению вредных веществ в сварочном аэрозоле. — Л.: изд. ВНИИОТ, 1976. — 74 с.
5. Прогрессивные методы анализа объектов окружающей среды. Материалы семинара, 5-6.02.1985 г. Л., Дом научно-технической пропаганды, 62 с.
6. Электрические источники света. Лампы газоразрядные. — Л., НПО «Светлана», 1971, вып. 4. — 12 с.
7. Калверт Дж., Питтс Дж. Фотохимия. — М.: Мир, 1968. — 177 с.
8. Walshaw C. D. Integrated absorption by the 9,6 micron band of ozone. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 1957, vol. 83, N 357, s. 15—21.
9. Окабе Х. Фотохимия малых молекул. — М.: Мир, 1981. — 286 с.
10. Сирота В. Г., Скобликова А. Л., Хворостовский С. Н., Гуськов М. И. Влияние освещения на гетерогенный распад озона. — III Всесоюзное совещание воздействия ионизирующего излучения и света на гетерогенные системы. Кемерово, изд. КГУ, 1982, т. 1, с. 141—142.
11. Ивлев Л. С., Сирота В. Г., Скобликова А. Л., Хворостовский С. Н. Спектрофотометрическое исследование кинетики взаимодействия озона с окислами. — Труды ЦАО, 1982, вып. 49, с. 85—90.
12. Hearn A. The absorption of ozone in the ultra-violet and visible regions of the spectrum. — Proc. Phys. Soc., 1961, vol. 78, N 503. — 65 p.
13. Ивлев Л. С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. — Л.: изд. ЛГУ, 1982. — 365 с.
14. Ortman G. C. Ozone precursor for investigating air pollution. ISA Trans., 1982, 21, N 2, p. 15—18.
15. Бригаев А. С. Озон в условиях загрязнения атмосферы в районе г. Москвы. — В сб.: Проблемы контроля и обеспечения чистоты атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1975, с. 113—118.
16. Борисов В. В., Ивлев Л. С., Сирота В. Г. Временные вариации концентрации озона в приземном слое атмосферы. — Тез. докл. Всесоюзный симп. по атмосферному озону. Л., 15—17 мая 1985 г. Л., ГГО, 1985, с. 44.

## ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

70-летний период после Великого Октября — один из знаменательных этапов в развитии отечественной практической метеорологии. Восстановление и развитие экономики и, в особенности, промышленное освоение Сибири, крайнего Севера и Востока страны, становление и совершенствование отраслей народного хозяйства требовали все новых видов метеорологической информации. Обеспечение запросов практики данными о климате и особенностях погоды отдельных регионов позволило успешно решать многие проектные, конструкторские, технические и оперативные хозяйственные задачи.

Особая роль в народном хозяйстве отводилась и отводится прогнозам погоды. Оправдываемость краткосрочных прогнозов достигла 85—90% [5].

Характерной особенностью метеорологического обеспечения сегодня стала технологизация службы прогнозов, перевод его на рельсы экономически эффективного использования прогнозов.

Развивая далее этот тезис, предварительно подчеркнем одно обстоятельство. В ближайшее десятилетие успешность прогнозов достигнет некоторого уровня «насыщения», стабилизации. Экстенсивный путь развития метеорологического обеспечения, эффективность которого определялась за счет роста успешности прогнозов, в перспективе будет исчерпан. Уже сейчас каждый процент прироста успешности обходится все более дорогой ценой. Оставшиеся до идеальных 10—15% составят прогностическую проблему для будущих поколений метеорологов.

В связи с возросшим интересом к оценке экономической полезности использования метеорологической информации, а прогнозов погоды в особенности, в последние годы в отечественной и зарубежной литературе появилось достаточно большое число исследований, касающихся этой проблемы. Из всего многообразия решаемых при этом задач следует выделить две целевые. Первая из них — оптимизация использования потребителем оперативных метеорологических прогнозов и вторая — оценка экономического эффекта, получаемого потребителем от реализации прогнозов в своей производственной практике.

При этом экономический эффект является такой мерой ценности прогнозов, которая точно отражает способность удовлетворять производственные запросы потребителей. Этот критерий обеспечивает содержательность обратной информации — насколько прогнозы были действительно полезны.

Решение указанных выше задач, определяющих развитие экономической культуры метеорологического обеспечения,

должно предусматривать: 1) дифференциацию прогнозов по отдельным видам (группам) производственных работ в данной отрасли; 2) разработку возможных аппроксимаций зависимости последствий поведения потребителей от условий погоды (разработку функций полезности: доходов или потерь); 3) выполнении сезонных или полугодовых обобщений прогнозов явлений погоды и метеорологических величин в виде таблицы сопряженности наиболее полно отражающих оправдываемость (успешность) прогнозирования — создание на местах картотек (и даже банков таблиц сопряженности прогнозов и 4) разработку регионально-отраслевых схем оптимизации прогнозов и оценку их экономической полезности.

В системе «погода — прогноз — потребитель» все более устойчиво внедряется идея дифференцированной технологии использования прогнозов. Поскольку потребитель прогнозов в конечном приближении есть определенный вид производственных работ, то возможна и дальнейшая дифференциация специализированных прогнозов, направленная на более узкую производственную область с более достоверной обратной экономической информацией.

Создание региональных гидрометеорологических центров должно способствовать экономически целенаправленному использованию всех видов метеорологической информации в народном хозяйстве.

Однако здесь возникает ряд задач, нерешенных в научном и организационном отношении. Особая роль отводится разработке автоматизированной системы доведения информации до потребителя: компьютеризация оперативной прогностической работы и введение прогностической информации в технологическую линию производственных работ.

Потребитель постоянно испытывает возрастающую ценность прогнозов, но дело ограничивается лишь пониманием этого. Многие потребители или вовсе не рассматривают разработку производственной модели (организационной структуры, связанной с АСУП) получения максимальной отдачи от прогнозов, их оптимального использования в условиях постоянно растущей зависимости от погоды, или испытывают серьезные затруднения при разработке такой модели. Здесь сказывается не просто недооценка прогнозов, а ретроспективное представление о «малости» их роли в производстве и, как следствие, слабое использование их как научной информации. В действительности все иначе. Ведь оказались же несостоятельными утверждения о «метеорологической автономности» и «всепогодности» некоторых видов производства, транспорта и т. д. Рост технической оснащенности потребителя сопровождается увеличением зависимости его от условий погоды. Бесхозяйственное в ряде случаев отношение к прогнозам — следствие, к тому же, отсутствия достаточно обязывающих потребителя правовых основ. Метеорологические прогнозы должны получить статус научно-производственной информации и

правовую привилегию (первоочередность) по отношению к иной информации в принятии производственных решений.

Ошибочно полагать, что дело прогнозиста якобы сводится только к передаче потребителю прогнозов, а каким образом они будут реализованы — не область метеорологии. Современная служба прогнозов — научно-производственная система, технологический процесс которой в первую очередь ориентирован на снижение потерь в народном хозяйстве по метеорологическим причинам. Прогноз — повседневный научный продукт, предназначение которого не внешняя, ознакомительная информативность, а, как уже говорилось, материализация в производстве. Его целевое назначение не должно зависеть от конъюнктуры, моды и уровня метеорологической культуры потребителя. Каждый единственный прогноз — результат огромных затрат людских, научных, материальных и финансовых ресурсов, которые выходят далеко за пределы прогностического подразделения. Сконцентрированная в прогнозах информация требует не просто обязательной компенсации затрат, а многократно большего возврата их в любой материальной форме уже в недрах народного хозяйства. Материализация прогноза как научно-производственной информации есть целевая, в конечном счете, задача службы прогнозов в системе «погода — прогноз — потребитель». Перевод текста прогноза на язык рубля должен носить обязательный характер и представлять собой продолжение технологической линии в системе «погода — прогноз — потребитель». Внедрение прогнозов в производство приходится и на долю разработчика, поставщика прогнозов. Подтверждение этого тезиса мы находим в ряде работ [1, 3, 4] и известном указании Госкомгидромета СССР службе прогнозов по дальнейшему развитию контактов с потребителем. Внедрение прогнозов в производство требует соответствующего технического оснащения прогностических подразделений. Необходима при этом и соответствующая перестройка метеорологического стереотипа мышления, психологическая перестройка синоптика к собственному прогнозу. Прогноз это не отчет перед потребителем, а метеоролого-производственное задание потребителю.

Отсюда очевидна концепция комплексного решения проблемы повышения экономической эффективности метеорологических прогнозов посредством взаимодействия поставщика и потребителя. Отрасль народного хозяйства совместно со службой прогнозов обеспечивают реализацию прогнозов.

Значительные научные исследования в этом направлении выполнены в Гидрометцентре СССР, в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, в ряде региональных научно-исследовательских институтах Госкомгидромета СССР и НИИ других ведомств. Большой интерес представляют многочисленные зарубежные исследования этой проблемы.

Здесь особо следует выделить тематику оптимизации прогностической информации в национальной экономике [1, 2, 4, 7,

8, 10, 12]. Все эти работы показывают значимость проблемы научной, по современному технологической реализации прогнозов в производстве.

Определенные исследования, касающиеся этой проблемы, выполнены автором в Ленинградском гидрометеорологическом институте [9, 10, 11].

Здесь мы кратко остановимся на результатах некоторых из них. Особое значение приобретает прогностическая информация в реализации энергосберегающей политики во всех отраслях народного хозяйства: в энергетике, на транспорте, в работе рыбопромышленного флота, в сельском хозяйстве и во многих других сферах общественного производства.

В работе [10] было показано, что использование прогнозов температуры воздуха  $t_{\text{пр}}$  для теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) позволяет существенно снизить потери в народном хозяйстве. Предложенная методика была апробирована на ряде ТЭЦ городов страны. Экономический эффект прогнозов  $t_{\text{пр}}$  рассчитывался как при стратегии доверия, так и оптимальной стратегии.

Стратегия доверия предполагает постоянную ориентацию на прогноз. Задание режима работы ТЭЦ определяется содержанием прогноза в расчете на минимум средних потерь

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m q_{ij} s_{ij}, \quad (1)$$

где  $q_{ij}$  — условные вероятности осуществления текстов прогнозов (выбранных фаз, градаций температуры воздуха) в матрице сопряженности прогнозов;  $s_{ij}$  — элементы матрицы метеорологических потерь;  $i=1, n$  и  $j=1, m$ .

Предпосылкой выбора оптимальной стратегии использования прогнозов температуры воздуха является утверждение, что стратегия доверия не всегда оптимальна. При любом тексте прогноза более предпочтительное решение задания режима работы ТЭЦ устанавливается на основании систематических потерь, определяемых по формуле вида (байесовский подход [1, 3, 4, 11]).

$$R_k = \sum_{i=1}^k q_{ik} s_{kj}, \quad (2)$$

где  $k$  — число возможных заданий режима работы ТЭЦ при данном тексте прогноза.

Используя в качестве базового условия инерционный прогноз, определяется согласно [9, 11], экономический эффект  $\mathcal{E}$  оперативных методических прогнозов. В табл. 1 приведены результаты расчета по ряду городов страны вероятных потерь потребителя прогнозов (ТЭЦ) при использовании методических  $R_m$  и инерционных  $R_{\text{ин}}$  прогнозов, а также экономического эффекта при стратегии доверия  $\mathcal{E}_m$  и оптимальной стратегии  $\mathcal{E}_{\text{мо}}$ . При этом предполагается, что ТЭЦ полностью работает на теплоснабжение.

Результаты оценки экономического эффекта (тыс. руб. отопит. сезон)  
прогноза температуры воздуха для ТЭЦ ряда городов страны

Город	Число ТЭЦ, В	Мощность исследуе- мой ТЭЦ, МВт	Снижение потерь на одной ТЭЦ $\Delta R$ , тыс. руб. прогноз					Экономический эффект $\mathcal{E}$ , тыс. руб. сезон					
			при стратегии доверия			при оптималь- ной стратегии		при стратегии доверия		при оптимальной стратегии			
			$R_{ин}$	$R_m$	$\Delta R_m$	$R_{мо}$	$\Delta R_{мо}$	$\mathcal{E}_m$	$B \cdot \mathcal{E}_m$	$\mathcal{E}_{мо}$	$B \cdot \mathcal{E}_{мо}$	$\Delta \mathcal{E}_{мо}$	$B \cdot \Delta \mathcal{E}_{мо}$
Ленинград (ТЭЦ-2)	10	1188	7,65	4,45	3,20	3,40	4,25	967,4	9674,0	1284,7	12847,0	317,2	3172,0
Калининград	1	60	0,34	0,27	0,07	0,06	0,28	5,1	5,1	21,7	21,7	16,6	16,6
Куйбышев	4	215	0,42	0,34	0,08	0,32	0,10	22,8	91,2	26,1	104,6	3,3	13,4
Оренбург	1	65	1,82	1,46	0,36	0,71	1,11	18,6	18,6	59,9	59,9	41,3	41,3
Чебоксары	3	450	9,04	7,55	1,49	4,52	4,52	96,4	289,2	295,1	885,3	198,7	596,1
Красноярск	4	116	0,64	0,29	0,35	0,18	0,46	35,9	143,6	48,9	195,6	13,0	52,0
Омск	5	69	0,29	0,11	0,18	0,06	0,23	40,6	203,0	51,3	256,5	10,7	53,5
Печора	2	53	2,05	1,75	0,30	1,45	0,60	31,5	63,0	75,5	151,0	44,0	88,0
Пермь	3	95	6,91	5,08	1,83	2,45	4,46	242,0	726,0	597,2	1791,6	355,2	1065,6
Душанбе	1	198	3,12	2,43	0,69	1,75	1,38	61,4	61,4	122,9	122,9	61,5	61,5
Чимкент	3	60	3,82	1,75	2,07	1,60	2,22	180,8	542,4	194,5	583,5	13,7	41,1
Сумма	37	2569	36,10	25,48	10,62	16,50	19,61	1702,5	11817,5	2777,8	17019,6	1075,2	5201,1
Среднее	3	233,6	3,28	2,32	0,97	1,50	1,78	154,8	1074,3	252,5	1547,2	97,8	472,8

Как видим, экономический эффект использования прогнозов температуры воздуха для ТЭЦ при стратегии доверия меняется в широких пределах примерно от 10 до 980 тыс. руб. за сезон, а при оптимальной стратегии соответственно от 43 тыс. руб. до 1,3 млн. руб. Прирост экономического эффекта за счет оптимизации для того же периода достигает 300 тыс. руб.

Особое значение в проблематике оптимизации прогнозов приобретает разработка функций полезности [1, 4, 6, 7, 10], а в дискретном виде — наиболее распространенных матриц метеорологических потерь второго порядка. Исследования, проведенные на кафедре метеорологических прогнозов ЛГМИ, зависимостей ряда потребителей от альтернативных условий погоды позволили установить первые приближения значений элементов матриц метеорологических потерь (табл. 2) и оценить экономический эффект использования прогнозов за некоторые годы. Здесь мы иллюстрируем тот факт, что экономический эффект может иметь значительные различия. Это обусловлено, прежде всего, успешностью оперативных прогнозов за данный период и столь важным экономическим параметром потребителя как отношение затрат к убыткам  $Z_{\text{зм}}/L$  [4]. Чем меньше это отношение, тем больше экономический эффект. Кроме того, величина экономического эффекта зависит от энергоемкости, производственной мощности потребителя.

В ряде случаев решающее значение приобретают прогнозы погоды в сельскохозяйственном производстве. Используя тот же подход, выполнена оценка экономического эффекта прогнозов весенних заморозков в сельскохозяйственном производственном объединении (СПО) «Детскосельское», расположенном в пригороде Ленинграда. На площади около 2000 га ведется посадка рассады овощных культур. При известных параметрах: стоимости работ по выращиванию и посадке рассады капусты (580 руб/га), степени повреждения незакаленной и закаленной культуры, затрате на защитные меры — противозаморозковое дождевание (около 20 руб/га), получена следующая матрица метеорологических потерь (тыс. руб /решение):

$$s_{ij} = \begin{vmatrix} 20,0 & 340,2 \\ 10,0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Элементы первого столбца матрицы — результат ориентации потребителя на заморозок, а второго — на его отсутствие. Верхняя строка — заморозок фактически наблюдался, нижняя — отсутствовал.

Экономический эффект использования прогноза заморозков за семь лет (1976, 1978—1983 гг.) составил 1030,2 тыс. руб. или за каждую весну около 150 тыс. руб.

По аналогичным СПО европейской части страны можно получить сбережение овощных культур на десятки миллионов рублей.

## Успешность и экономическая полезность прогнозов для некоторых потребителей

№ п/п	Потребитель. Прогноз метеорологической величины, явления. Альтернативные условия погоды	Матрица сопряженности оперативных методических прогнозов $ n_{ij} $			Матрица сопряженности инерционных прогнозов $ n_{ij} $			Матрица метеорологических потерь $ s_{ij} $ , тыс. руб./прогноз		Систематические (вероятные) потери, тыс. руб./прогноз				$\Sigma_m$ , тыс. руб/сезон
		$ R _m$		$ R _{ин}$										
1	Рига. Морской рыбный порт. Скорость ветра, $V_{кр} > 12$ м/с. Холодное полугодие, 1984—1985 гг.	19	47	66	17	49	66	10,0	30,0	6,7	5,3	6,3	5,3	12,7
		37	747	784	49	735	784	5,0	0	10,2	1,8	7,7	1,9	
		56	794	850	66	784	850	[7]						
2	Лиепая. Морской рыбный порт. Скорость ветра, $V_{кр} > 12$ м/с. Осенне-зимние периоды, 1983—1986 гг.	494	35	529	354	175	529	6,3	90,2	6,9	8,7	7,2	8,1	1211,1
		143	414	557	175	382	557	8,9	0	70,0	7,0	60,4	28,3	
		637	449	1086	529	557	1086							
3	Клайпеда. Морской рыбный порт. Скорость ветра, $V_{кр} > 15$ м/с. Холодное полугодие, 1984—1985 гг.	116	50	166	90	76	166	12,3	64,0	9,9	6,9	9,9	7,1	192,5
		80	604	684	76	608	684	6,4	0	37,8	4,9	34,7	7,0	
		196	654	850	166	684	850							
4	Ростов н/Д. ЛЭН (центральные, западные) «Ростовэнерго». Гололед, 1979—1982, 1983—1985 гг.	104	23	127	58	69	127	0,45	1,46	0,45	0,45	0,45	0,45	5,9 по всей системе «Ростовэнерго» $5,9 \times 9 = 53$
		17	613	630	69	561	630	0,45	0	1,25	0,05	0,67	0,16	
		121	636	757	127	630	757							

Приведем некоторый перечень вопросов, научная постановка и практическое решение которых, на наш взгляд, могут заметно повысить уровень технологии использования прогнозов.

1. Первым и необходимым звеном в решении задач экономической реализации прогнозов должна быть объективная, строгая и научно-обоснованная система оценки оправдываемости прогнозов.

Оценка оправдываемости прогнозов погоды выполняется в настоящее время в оперативной синоптической практике по системе, которая предъявляет высокие требования к прогнозисту. Тем не менее, оценка качества прогнозирования только по критерию общая оправдываемость не является пока достаточно убедительной и полной мерой оценки. Не выявляется при этом преимущество методического прогноза перед инерционным и формальным, для которого постоянно может прогнозироваться одна и та же фаза явления, например, «явление не ожидается», не раскрываются сильные и слабые стороны самого метода и процесса прогнозирования.

Поэтому, нам представляется, что наряду с принятой оценкой оправдываемости прогнозов необходимо ввести в практику составление таблиц оправдываемости (таблиц сопряженности), которые сами по себе являются полной характеристикой качества прогнозирования. Такие таблицы, составленные по отдельным явлениям и метеорологическим величинам отдельно для теплого и холодного полугодия, могут быть использованы не только для вычисления известных критериев успешности прогнозирования и выяснения, какое явление или метеорологическая величина лучше прогнозируется, но и для установления направления региональных прогностических исследований. Систематическое ведение таблиц сопряженности позволит создать информационный банк успешности методических прогнозов. Следует постепенно заменить оперативные категорические прогнозы вероятностными.

Официальные прогнозы, выдаваемые сейчас в категорической форме, могут получить вероятностное представление на основании таблиц (матриц) сопряженности методических прогнозов, хотя и с некоторой потерей информации. Было бы весьма полезным создание в прогностических подразделениях каталога таблиц сопряженности как альтернативных, так и многофазовых прогнозов, а также средних региональных таблиц сопряженности.

Касаясь прогнозов заметим, что они не свободны от субъективных нагрузок, связанных с ошибками-страховками. Тем самым не только снижается успешность прогнозов, но и их экономическая полезность. Успешность прогнозов, в конечном итоге, должна быть категорией экономической.

2. Необходима повсеместная широкая разработка матриц метеорологических потерь во всех отраслях народного хозяйства: в сельском хозяйстве, на транспорте, в энергетике и др. Матрицы метеорологических потерь должны отражать зависимость конкрет-

того вида производственной деятельности от конкретного вида погоды.

Целесообразна разработка матриц метеорологических потерь, отражающих влияние комплекса метеорологических величин или явлений погоды (температура — ветер, температура — ветер — метель, температура — ветер — обледенение судов, туман — гололедица и др.) на производственную деятельность. Матрица метеорологических потерь есть полная характеристика экономических последствий степени соответствия решений потребителя последующим фактическим условиям погоды. Разработка такого рода матриц требует: наличия у потребителя алгоритма производственных решений — выработанного практикой регламента действий в зависимости от ожидаемых условий погоды и статистических сведений о затратах на предупредительные меры и прямых потерях по метеорологическим условиям. Работа с потребителем требует значительных усилий в том, чтобы разобраться в этой статистике, выдаваемой техническими отделами Управлений, необходимой для расчета матриц потерь. Заметим, что полученная матрица потерь носит долговременный характер. Сверка ее может выполняться через 5—10 лет при изменении степени подверженности потребителя воздействию погоды.

3. Не менее сложным остается вопрос дискретизации прогнозов, разложение их на такое число градаций, которое было бы наиболее полезным для потребителя. Непрерывный прогноз предпочтительнее фазового, но использование его для подавляющего большинства потребителей нереально. Практически все современные прогнозы фазовые. Чем больше число градаций (фаз), тем прогноз экономически полезнее. Но в этом случае каждой фазе прогноза должно соответствовать определенное производственное решение потребителя согласно установленному регламенту. Большинство же потребителей получают многофазовый прогноз, а работают по отношению к погоде в альтернативном режиме. На АМСГ, например, диспетчерская служба получает прогнозы высоты нижней границы облаков метеорологической дальности видимости и скорости ветра, которые содержат довольно большое число градаций. В то же время используются только два производственных решения: «полет выполнять по расписанию» или «вылет отложить».

Следовательно, в первом приближении, дискретизация прогнозов применительно к задачам оценки экономической полезности должна отвечать производственному регламенту. Прогнозы, составляемые и используемые в альтернативной форме, отражают нижний уровень их экономической полезности.

4. Потенциальные резервы экономической полезности прогнозов велики, поэтому необходимо осваивать интенсивную форму метеорологического обеспечения — разработку новых технологий реализации прогнозов. Выбор меры реализации прогнозов требует научного обоснования. Представляется, что в основу выбора при-

нения производственных решений на основании прогнозов может быть положен байесовский подход, позволяющий рассчитать вероятные средние потери потребителя и установить сравнительную оценку снижения потерь при использовании методического прогноза относительно стандартного (инерционного, климатологического, случайного).

5. В настоящее время все потребители получают прогностическую продукцию бесплатно. Парадоксальность этого заключается в следующем. Потребитель без прогнозов работать не может. Платить за эту продукцию ему не разрешают. Более того, если прогнозы используются потребителем недостаточно умело, то к услугам его госстрах. Потери по метеорологическим условиям, которые должны быть предотвращены самим потребителем, частично или полностью компенсируются государством. Потребитель поставлен в двояко выгодное условие: и прогнозы, и госстрах остаются для него неоплачиваемым долгом. Негативность сложившегося положения очевидна.

6. Повышение эффективности метеорологического обеспечения народного хозяйства невозможно без соответствующей подготовки специалистов метеорологов. На кафедре метеорологических прогнозов ЛГМИ, начиная с 1965 г., читается курс лекций «Метеорологическое обеспечение народного хозяйства», а в 1981 г. было издано учебное пособие аналогичного названия. Особое место в этой учебной дисциплине отводится изложенным в статье экономическим аспектам метеорологического обеспечения. Эти же вопросы освещаются и на факультете повышения квалификации (при ЛГМИ) специалистов Госкомгидромета СССР.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Багров Н. А. О хозяйственной полезности гидрометеорологических прогнозов. — Труды Гидрометцентра СССР, 1975, вып. 159, с. 101—114.
2. Борисенков Е. П. Проблемы прикладной климатологии. — Метеорология и гидрология, 1985, № 3, с. 5—17.
3. Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Вероятностные метеорологические прогнозы. — Л.: Гидрометеиздат, 1983. — 271 с.
4. Жуковский Е. Е. Метеорологическая информация и экономические решения. — Л.: Гидрометеиздат, 1981. — 303 с.
5. Израэль Ю. А. Роль атмосферных, геофизических наук в обеспечении Продовольственной программы. — В кн.: Продовольственная программа. Задачи науки. М.: Наука, 1983, с. 80—86.
6. Методические рекомендации по оценке экономического эффекта от использования гидрометеорологической информации в сельскохозяйственном производстве. — М.: Гидрометеиздат, 1981. — 47 с.
7. Методика определения экономической эффективности использования гидрометеорологической информации в народном хозяйстве. — Л.: Ртп. ГГО им. Воейкова, 1985. — 126 с.
8. Теория вероятности и математическая статистика в атмосферных науках. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. — 160 с.

9. Хандожко Л. А. Метеорологическое обеспечение народного хозяйства. — Л.: Гидрометеоздат, 1981. — 230 с.

10. Хандожко Л. А., Вдовин В. Б. Функция метеорологических потерь теплоэлектроцентралей. — Труды ГГО, 1987, вып. 507, с. 15—20.

11. Хандожко Л. А. Оценка экономического эффекта использования метеорологических прогнозов. — В сб.: Физика пограничного слоя атмосферы и ее прикладные аспекты. Л., изд. ЛПИ, 1984, вып. 85, с. 133—142. (ЛГМИ).

12. Черкавский С. К. Об эффективности гидрометеорологического обеспечения народного хозяйства. — Метеорология и гидрология, 1973, № 12, с. 93—97.

УДК 551.465

*Л. Н. КАРЛИН, Е. Ю. КЛЮЙКОВ, С. И. ВИЛЕНКИН*

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ОКЕАНА**

### **Введение**

Одной из важнейших задач современной физической океанологии является исследование закономерностей вертикального переноса тепла и солей через стратифицированный термоклин. Важную роль в этом процессе играет формирование тонкой структуры полей температуры и солености. Выполненные к настоящему времени оценки показывают, что существование ее обеспечивает такую интенсивность вертикального тепло- и солепереноса, которую в рамках  $K$ -теории в крупномасштабных моделях верхнего слоя океана параметризуют коэффициентом вертикального турбулентного перемешивания, имеющего порядок  $1 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ . В последнее время были выполнены работы, направленные на установление количественной связи между размерами элементов тонкой структуры и коэффициентами вертикального обмена [3, 5]. В связи с этим особую значимость приобретает изучение закономерностей формирования тонкой структуры океана. Оно ведется достаточно интенсивно, однако доминирующим направлением при этом стало использование натурных и лабораторных экспериментов. Математическое моделирование применяется значительно реже и его преимущества при исследовании проблемы реализуются не в полной мере. В данной работе сформулирован комплекс взаимосвязанных математических моделей формирования тонкой структуры полей температуры и солености верхнего слоя океана. Численные эксперименты с моделями позволяют изучить влияние определяющих факторов на элементы тонкой структуры, установить связь между их размерами и фоновой стратификацией. При фор-

мулировке моделей мы исходили из экспериментально установленного в натуральных и лабораторных экспериментах [1, 4] факта что ступенчатая структура, то есть чередование однородных слоев и высокоградиентных прослоек, как правило, характерна для условий, при которых распределение температуры и солености по вертикали способствует развитию неустойчивости, вследствие двойной диффузии. Поэтому в предлагаемых моделях механизмом структурообразования является дифференциально-диффузионная конвекция.

### Модель дифференциально-диффузионной конвекции

Основу модели составляют уравнения движения Навье—Стокса в приближении Буссинеска, тепло- и солепереноса, неразрывности. Результаты лабораторных экспериментов по дифференциально-диффузионной конвекции свидетельствуют, что она является осесимметричной и поэтому ее анализ возможен в двумерной вертикально расположенной плоскости  $(x, z)$ . Таким образом, исходная система имеет вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \Delta u; \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \Delta w + \frac{g\rho}{\rho_0}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \nu^T \Delta T; \quad (3)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \nu^S \Delta S; \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (5)$$

где  $u, w$  — составляющие конвективных скоростей (горизонтальная и вертикальная);  $\rho, \rho_0$  — плотность воды фактическая и стандартная;  $\nu, \nu^T, \nu^S$  — коэффициенты молекулярного обмена количеством движения, теплом и солями.

К уравнениям (1) и (2) применим операцию вихря. Введем функцию тока так, что

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad w = - \frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (6)$$

В результате получим

$$\frac{\partial}{\partial t} \Delta \psi + \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial}{\partial x} \Delta \psi - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial z} \Delta \psi = \nu \Delta \Delta \psi + \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x}. \quad (7)$$

3 (7) обозначим

$$\Delta\psi = -\varphi. \quad (8)$$

Тогда окончательно получаем систему уравнений, описывающую свободную двумерную конвекцию:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial z} = v^T \Delta T; \quad (9)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial S}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial S}{\partial z} = v^S \Delta S; \quad (10)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = v \Delta \varphi - \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \varphi}{\partial z} - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x}. \quad (11)$$

Дополним ее уравнением состояния:

$$\rho = \rho_0 (1 - \alpha T + \beta S). \quad (12)$$

Граничные условия задавались следующими: на верхней и нижней границах расчетной области при  $z=0$ ,  $z=H$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial S}{\partial z} = 0, \quad \psi = 0; \quad (13)$$

на левой и правой границах расчетной области при  $x=0$ ,  $x=L$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial S}{\partial x} = 0, \quad \psi = 0. \quad (14)$$

Начальные условия будут рассматриваться при описании конкретных численных экспериментов. Модель была реализована методом сеток с использованием разностей против потока. Шаги по пространству и времени с учетом требований сходимости и аппроксимации были выбраны:  $\Delta z = 1$  см,  $\Delta x = 0,25$  см и  $\Delta t = 1$  с. Количество узлов было  $22 \times 22$ .

### Численные эксперименты

Моделировались условия диффузионной конвекции и конвекции в виде солевых пальцев. Во всех случаях начальное состояние характеризовалось отсутствием движений и гидростатически устойчивой стратификацией плотности. В качестве возмущения в середине расчетной области задавался весьма слабый вихрь, охватывающий пять точек. При задании  $v^T = v^S$  этот вихрь с течением времени затухал под действием молекулярной вязкости. Иначе ведет себя возмущение при использовании величин  $v^T$  и  $v^S$ , характерных для типовых условий в океане ( $v^T = 1,4 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с,  $v^S = 1,3 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с). В этом случае возмущающий вихрь вследствие двойной диффузии интенсифицируется и в дальнейшем об-

разуются конвективные ячейки, форма которых определяется видом начального вертикального распределения температуры и солености воды. Если в начальный момент времени задается двухслойная жидкость и при этом в верхнем слое вода имеет меньшую температуру и соленость, чем в нижнем слое, то конвективные ячейки формируются по обе стороны от границы раздела:

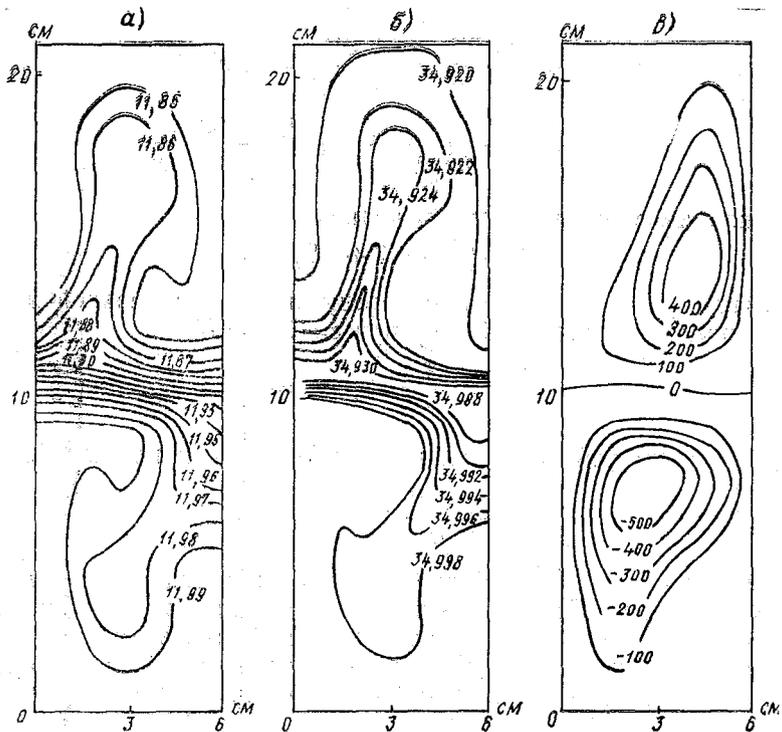


Рис. 1. Температура (а), соленость (б), функция тока  $\psi \cdot 10^4 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  (в) на развитой стадии диффузионной конвекции (спустя  $10^3$  с от начала расчетов). Начальные условия: в верхней половине  $T = 11,84^\circ \text{C}$ ,  $S = 34,92 \text{ ‰}$ ; в нижней половине  $T = 12,00^\circ \text{C}$ ,  $S = 35,00 \text{ ‰}$ .

(рис. 1). Такие конвективные движения приводят к образованию от границы раздела теплых и соленых языков в верхней половине объема, а в нижней половине — холодных и пресных (рис. 1). В дальнейшем происходит отсечение этих языков от границы раздела, и они превращаются в капли, которые дрейфуют к верхней и нижней границам расчетной области. Эти капли имеют отрицательную плавучесть по отношению к окружающей их жидкости и благодаря им осуществляется перенос тепла и соли через границу раздела.

Если в начальный момент времени двухслойность жидкости обеспечивается более теплой и соленой водой в верхней половине асчетной области, чем в нижней, то конвективные движения приобретают со временем форму узких вытянутых в длину ячеек,

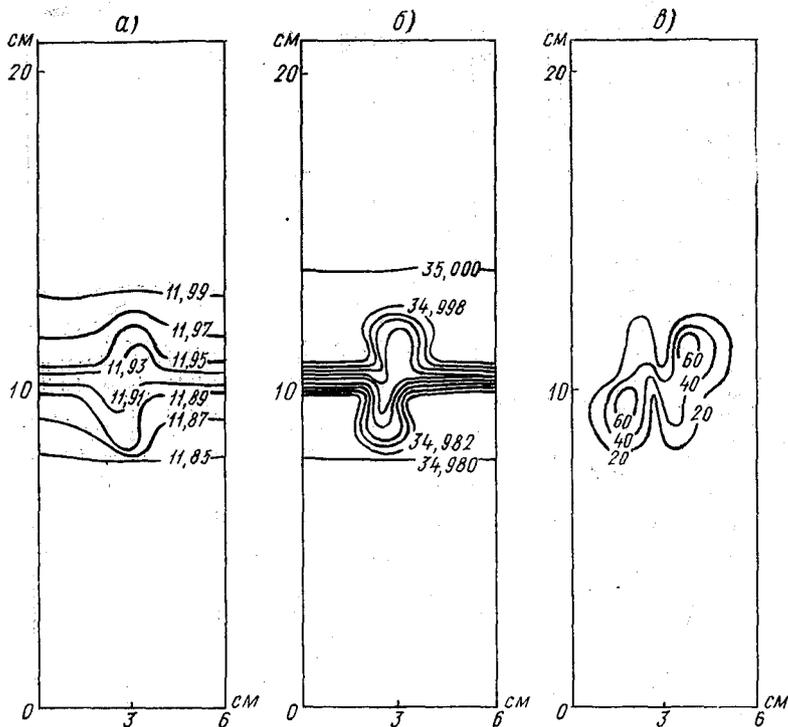


Рис. 2. Температура (а), соленость (б) и функции тока  $\psi \cdot 10^4 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  (в) при солевых пальцах спустя  $10^8$  с от начала расчетов. Начальные условия: в верхней половине  $T=12,00^\circ \text{С}$ ,  $S=35,00$  ‰; в нижней половине  $T=11,84^\circ \text{С}$ ,  $S=34,98$  ‰.

охватывающих обе половины объема с центром на границе раздела (рис. 2). Окончания этих ячеек со временем приобретают характерную вытянутую с расширением на концах форму (рис. 3). В дальнейшем расширенные части этих образований отделяются от основных ячеек, превращаясь в капли, которые переносятся к границам области. Эти капли, также как и при диффузионной конвекции, имеют по отношению к окружающей жидкости отрицательную плавучесть. Имй осуществляется транспортровка тепла и соли через границу раздела в жидкости.

В ходе численных экспериментов контролировались потоки тепла и солей через границу раздела, путем расчета изменения тепло- и соледержания верхней и нижней половин расчетной области. Это позволило получить несколько новых результатов

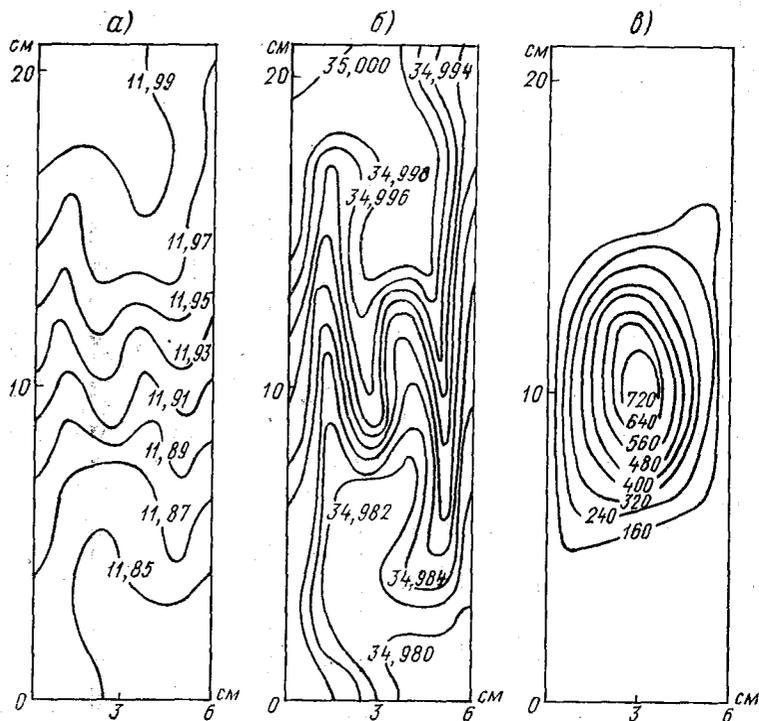


Рис. 3. Температура (а), соленость (б) и функции тока  $\psi \cdot 10^4 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  (в) при солевых пальцах спустя  $3 \cdot 10^3$  с от начала расчетов.

о характере поведения потока плавучести, имеющем принципиальное значение для формирования ступенчатой структуры в океане. Для диффузионной конвекции в лабораторных условиях было установлено, что [7]

$$C_s = \beta q^s / \alpha q^T \approx 0,15 \quad \text{при } R > 2$$

и

$$C_s = 1,85 - 0,85 R \quad \text{при } 1 < R < 2. \quad (15)$$

Тогда

$$q^p = -\alpha q^T + \beta q^s = -\alpha q^T (1 - C_s), \quad (16)$$

де  $q^T$  и  $q^S$  — потоки тепла и солей через границу раздела, нормированные соответственно на  $c_p \rho_0$  и  $\rho_0$ ;  $q^p$  — поток плавучести;

$\zeta$  — плотностное отношение, равное  $\frac{\beta \Delta S}{\alpha \Delta T}$ ;  $\Delta T, \Delta S$  — перепады температуры и солёности на границе раздела.

Из (16) следует, что отрицательная плавучесть при диффузионной конвекции существует всегда и она тем эффективнее, чем больше величина  $R$ .

Численные эксперименты опровергают зависимости (15). Они дают увеличение  $C_S$  по мере увеличения  $R$ . Причем при  $R=1,5$ ,  $C_S \approx 0,64$  совпадает с найденным в лабораторных условиях, а затем увеличивается и переходит через 1 при  $R>2,5$ . Это означает, что при  $R>2,5$  потока отрицательной плавучести не наблюдается. Данный вывод нам представляется более естественным, нежели полученный лабораторным путем. Он устанавливает, что с увеличением стратифицированности вод эффективность процессов структурообразования уменьшается, а при большом  $R$  они вообще не имеют места, что подтверждают натурные наблюдения в океане.

Для солевых пальцев поток плавучести исследовался в лабораторных и численных экспериментах. Величина  $C_T = \frac{\alpha q^T}{\beta q^S}$  оказалась функцией плотностного отношения  $R$ . Причем лабораторные опыты [10] дают уменьшение  $C_T$  с ростом  $R$  (от 0,7 при  $R<2,5$  до 0,3 при  $R>6$ ). Напротив, численные эксперименты S. A. Riachsek and J. Toomge дали практически линейное увеличение  $C_T$  с ростом  $R$  [9]. Наши эксперименты в диапазоне  $1,5<R<2,5$  оказались в удовлетворительном согласии с лабораторными данными. При больших  $R$  величина  $C_T$  становится больше единицы. Следовательно, наши выводы совпадают с полученными лабораторным путем при малых  $R$ . При больших  $R$  наши результаты совпадают с [9]. Такая зависимость  $C_T$  от  $R$  является наиболее правдоподобной. С учетом выражения для потока плавучести при солевых пальцах

$$q^p = -\alpha q^T + \beta q^S = \beta q^S (1 - C_T), \quad (17)$$

она означает, что эффективность структурообразования максимальна при малых  $R$ , уменьшается с ростом  $R$ , и оно вообще прекращается при больших  $R$ . Таким образом, численные эксперименты с моделью позволили установить новые закономерности в поведении потока отрицательной плавучести при конвекции, вследствие двойной диффузии, являющейся важным механизмом структурообразования полей температуры и солёности. Найденные закономерности дают основу для формулировки простой модели ступенчатой структуры термоклина.

## Моделирование ступенчатой структуры термоклина

Численные эксперименты, проанализированные выше, а так же лабораторные опыты показывают, что вертикальные размеры конвективных ячеек, возникающих при конвекции из-за двойной диффузии, имеют порядок  $10^{-1}$  м. Размеры же однородных слоев при структурообразовании могут достигать нескольких десятков метров. Отсюда следует, что должен существовать механизм образования потенциальной энергии, высвобождаемой солеными пальцами и диффузионной конвекцией в энергию перемешивания способную сформировать однородные слои такой толщины. Таким механизмом является поток отрицательной плавучести, имеющий место при конвекции, обусловленной двойной диффузией. Его величина сопоставима с потоком плавучести на поверхности океана. Поэтому по аналогии с приповерхностным слоем следует ожидать развития перемешанного слоя от зоны конвекции из-за двойной диффузии. Его толщина в зависимости от величины потока плавучести и условий фоновой стратификации может варьировать в пределах  $10^0$ — $10^2$  м. На подвижной границе конвективного перемешанного слоя, вследствие вовлечения невозмущенной жидкости, происходит образование скачков температуры и солености воды. На них создаются условия для формирования либо соленых пальцев, либо диффузионной конвекции. От новых зон палеообразования или диффузионной конвекции также развивается конвективный перемешанный слой. Таким образом этот процесс может повторяться многократно. Итогом его будет раздробление первоначально двухслойной жидкости на множество однородных слоев и прослоек. Схематически это выглядит так, как изображено на рис. 4 и 5. Следует отметить, что первоначальная двухслойность жидкости не является необходимым условием расслоения. Появление зон неустойчивости, а следовательно, пальцев образования или диффузионной конвекции, как показали наши численные эксперименты, возможно и при непрерывных профилях температуры и солености. Наличие фоновой стратификации не меняет картину принципиально, но сказывается на размерах однородных слоев и величинах скачков свойств на границах слоев.

Для исследования процессов расслоения термоклина рассмотрим следующую стилизованную картину. Пусть он стратифицирован гидростатически устойчиво по плотности, линейно по температуре и солености с градиентами  $\Gamma^T$  и  $\Gamma^S$  соответственно. Знаки  $\Gamma^T$  и  $\Gamma^S$  одинаковы, а на некоторой глубине произошло вторжение инородных вод с температурой воды  $T_n$  и соленостью  $S_n$ . Мощность интрузии характеризуется ее толщиной  $H$ . Тогда на верхней и нижней границах образуются скачки температуры  $\Delta T$  и солености  $\Delta S$ . Следствием этого становится конвекция из-за двойной диффузии, поток отрицательной плавучести и как результат — структурообразование от обеих границ интрузии. Эти процессы можно описать нестационарной одномерной моделью. Основу ее

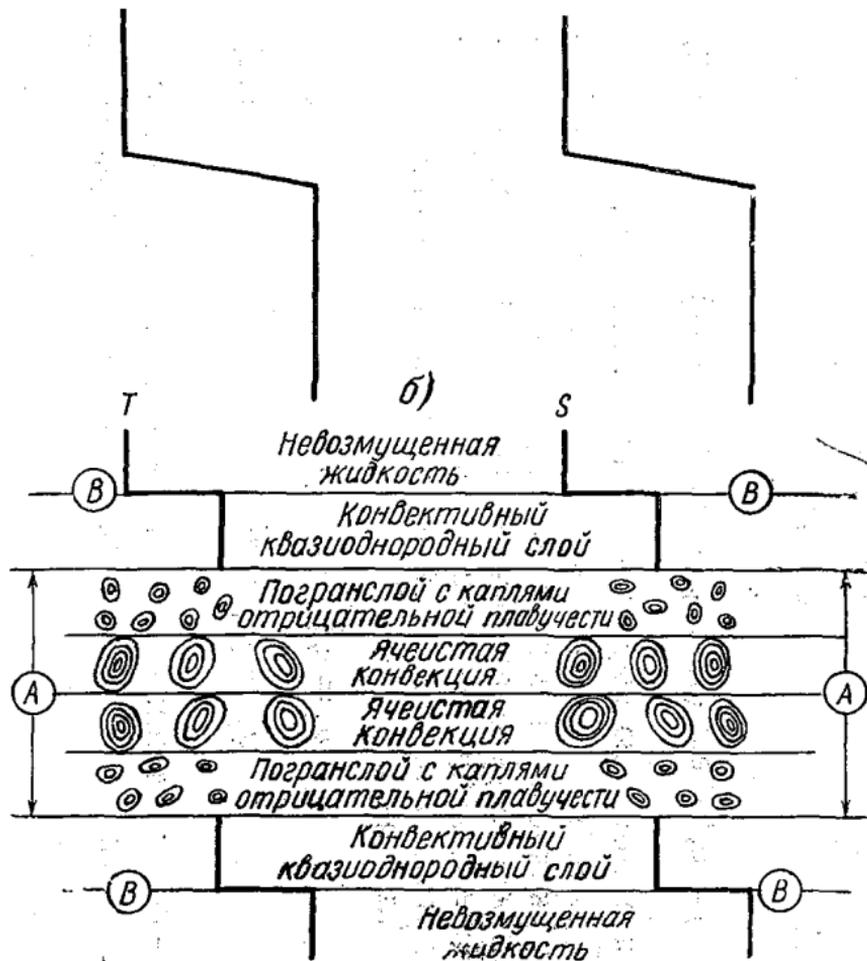


Рис. 4. Начальное распределение температуры (T) и солености (S) воды (а). Схематическое изображение формирования тонкой структуры T и S при диффузионной конвекции (б). В зонах, обозначенных B, происходят процессы, изображенные в области A.

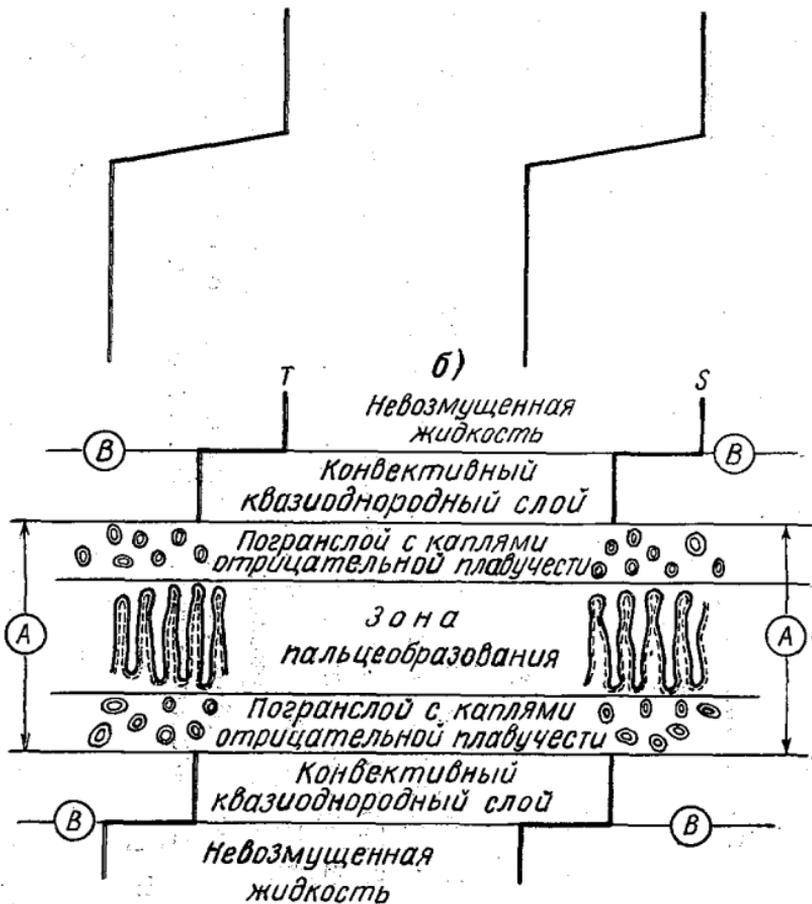


Рис. 5. Начальное распределение температуры ( $T$ ) и солености ( $S$ ) воды (а). Схематическое изображение процессов формирования тонкой структуры  $T$  и  $S$  при солевых пальцах (б). В зонах, обозначенных  $B$ , происходят процессы, изображенные в области  $A$ .

составляют уравнения тепло- и солепереноса, проинтегрированные в пределах перемешанного слоя конвекции, образованного потоком отрицательной плавучести при пальцеобразовании или диффузионной конвекции на границах интрузии:

$$\frac{\partial T_0}{\partial t} h = q_0^T - q_h^T; \quad (18)$$

$$\frac{\partial S_0}{\partial t} h = q_0^S - q_h^S, \quad (19)$$

где  $T_0$ ,  $S_0$  — температура и солёность воды в перемешанном слое;  $h$  — толщина перемешанного слоя;  $q_0^T$ ,  $q_0^S$  — потоки тепла и солей на границе интрузии;  $q_h^T$ ,  $q_h^S$  — потоки тепла и солей через подвижную границу перемешанного слоя. Потоки тепла нормированы на  $c_p \rho_0$ , потоки солей — на  $\rho_0$ .

Величины  $q_0^T$  и  $q_0^S$  рассчитываются по формулам, которые были определены в лабораторных условиях и подтверждены нашими численными экспериментами. При солевых пальцах на границе интрузии [4]

$$q_0^S = c\beta^{1/3} (S_0 - S_u)^{4/3}, \quad (20)$$

где  $c$  — эмпирический коэффициент, равный 0,1, а  $q_0^T$  можно найти зная  $q_0^S$  и используя выражение для  $C_T$ .

Для диффузионной конвекции [8]

$$q_0^T = 0,085 f(R) \nu^T (g\alpha/\nu^T \nu)^{1/3} (T_0 - T_u)^{4/3}, \quad (21)$$

где

$$f(R) = 0,101 \exp(4,6 \exp(-0,54(R-1))), \quad (22)$$

а  $q_0^S$  находится с помощью выражения для  $C_S$ , зная  $q_0^T$ .

При расширении перемешанного слоя происходит вовлечение невозмущенной жидкости в него и формирование скачков температуры и солёности на его подвижной границе. Последние обуславливают существование конвекции вследствие двойной диффузии. Тогда потоки тепла и солей на подвижной границе  $z=h$  можно представить так:

$$q_h^T = q_{h1}^T + q_{h2}^T; \quad (23)$$

$$q_h^S = q_{h1}^S + q_{h2}^S, \quad (24)$$

где  $q_{h1}^T$ ,  $q_{h1}^S$  — потоки тепла и солей за счет вовлечения;  $q_{h2}^T$ ,  $q_{h2}^S$  — потоки тепла и солей за счет дифференциально-диффузионной конвекции.

Потоки за счет вовлечения определяются по традиционным отношениям:

$$q_{h1}^T = - \frac{dh}{dt} (T_h - T_0); \quad (25)$$

$$q_{h1}^S = - \frac{dh}{dt} (S_h - S_0), \quad (26)$$

здесь  $T_h, S_h$  — температура и соленость воды на уровне  $z=h$  в взмученной жидкости, определяемые по величинам  $\Gamma^T$  и  $\Gamma^S$ .

Система замыкается уравнением баланса энергии турбулентности, записанным для подвижной границы перемешанного слоя,

$$\frac{\partial b}{\partial t} - c_1 \frac{b^{3/2}}{h} + g(-\alpha q_{h1}^T + \beta q_{h1}^S) - g(-\alpha q_{h2}^T + \beta q_{h2}^S) = 0, \quad (27)$$

где  $b$  — энергия турбулентных пульсаций, для оценки которой изменяется формула

$$b = c_4 [gh(-\alpha q_0^T + \beta q_0^S)]^{2/3}; \quad (28)$$

и  $c_4$  — эмпирические константы.

Подстановка (28) в (27) совместно с (25), (26) приводит к выражению для расчета эволюции толщины перемешанного слоя

$$\frac{dh}{dt} = \frac{2}{3} \frac{-c_1 c_4 g(-\alpha q_0^T + \beta q_0^S) + g(-\alpha q_{h2}^T + \beta q_{h2}^S)}{2/3 c_4 g^{2/3} (-\alpha q_0^T + \beta q_0^S)^{2/3} + \sqrt[3]{h} g [\alpha (T_h - T_0) + \beta (S_h - S_0)]}. \quad (29)$$

Из (29) следует, что толщина перемешанного слоя имеет свое предельное значение, при котором выполняется соотношение:

$$\frac{-\alpha q_{h2}^T + \beta q_{h2}^S}{-\alpha q_0^T + \beta q_0^S} = c_1 c_4. \quad (30)$$

Эволюция температуры и солености в интрузии находится по изменению ее тепло- и соледержания, вследствие потоков тепла солей на границах интрузии.

Таким образом, система уравнений (18), (19), (29) позволяет оспроизвести эволюцию температуры и солености перемешанного слоя; его толщину при появлении неустойчивости вследствие двойной диффузии. При этом надо иметь в виду, что существование первого конвективного слоя создает условия для образования второго, а существование второго — для третьего и т. д.

В связи с этим одновременно может наблюдаться несколько слоев. Они могут расширяться с разными скоростями, догонять друг друга, следствием чего становится поглощение медленно движущихся слоев более быстрыми. Поэтому приведенные формулы надо выписывать для каждого образующегося слоя.

Следует отметить, что для реализации моделируемых процессов наличие интрузии не является обязательным условием структурообразования. При фоновой стратификации с одинаковыми знаками градиентов температуры и солености воды для образования тонкой структуры достаточно наличия на некотором горизонте скачка температуры или солености. Последние могут быть вызваны не только интрузией, но и другими факторами, например обрушением внутренних волн, сдвиговой неустойчивостью и т. д.

### Численные эксперименты

Численные эксперименты с моделью были направлены на изучение закономерностей зависимости интенсивности структурообразования от условий фоновой стратификации и возмущений, наклад-

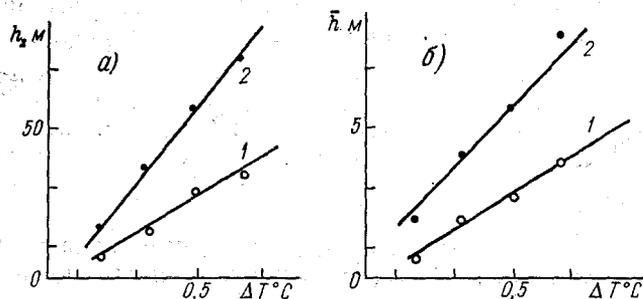


Рис. 6. Слой воды, охваченный структурообразованием  $h_2$  (а), и средняя толщина перемешанного слоя  $\bar{h}$  (б) при диффузионной конвекции:

1 — при  $R=2$ ; 2 — при  $R \rightarrow 1$ ; ○ — результаты расчетов при  $R=2$ ; ● — результаты расчетов при  $R \rightarrow 1$ .

ываемых на нее. Под последними понимаются скачки температуры и солености воды, вызванные различными причинами, в частности интрузионными процессами. Оказалось, что в целом эффективность структурообразования при диффузионной конвекции

больше, чем при солевых пальцах. В связи с этим при фоновой стратификации с инверсионным распределением температуры следует ожидать наиболее развитой тонкой структуры полей температуры и солености. Для придания выводам количественного характера из всего многообразия возможных ситуаций в океане рассмотрим две. В первой фоновые температура и соленость линейно увеличиваются с глубиной. На некотором горизонте наблюдается интрузия, толщиной  $H$ . При этом на верхней и нижней границах интрузии создаются условия для диффузионной конвекции. В этом случае слой воды, охваченный образованием тонкой структуры ( $h_z$ ), тем больше, чем больше скачки температуры на границах интрузии и меньше фоновые градиенты плотности воды. При этом зависимость  $h_z$  от  $\Delta T$  на границе интрузии имеет практически линейный характер. Причем скорость увеличения  $h_z$  с ростом  $\Delta T$  тем больше, чем меньше фоновая стратификация вод (рис. 6, а). Средняя толщина перемешанного слоя  $\bar{h}$  также линейно увеличивается при увеличении  $\Delta T$  (рис. 6, б).

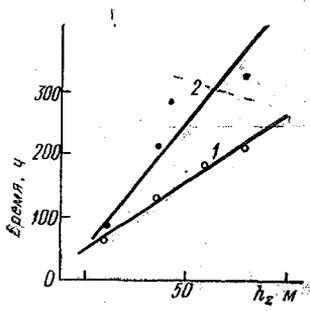


Рис. 7. Время достижения установившегося состояния при диффузионной конвекции: 1 — при  $R \rightarrow 1$ ; 2 — при  $R=2$ ;  $\circ$  — результаты расчетов при  $R \rightarrow 1$ ;  $\bullet$  — результаты расчетов при  $R=2$ .

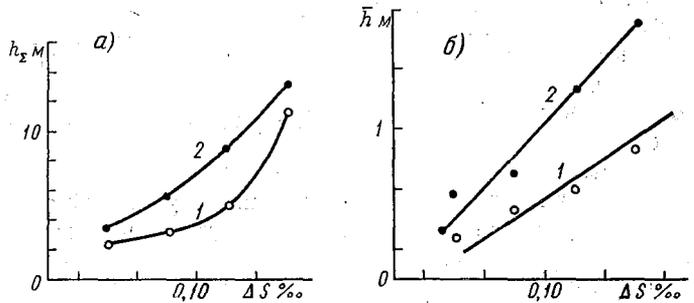


Рис. 8. Слой воды, охваченный структурообразованием  $h_z$  (а), и средняя толщина перемешанного слоя  $\bar{h}$  (б) при солевых пальцах: 1 — при  $R=2$ ; 2 — при  $R \rightarrow 1$ ;  $\circ$  — результаты расчетов при  $R=2$ ;  $\bullet$  — результаты расчетов при  $R \rightarrow 1$ .

Время достижения установившегося состояния тем больше, чем больше  $h_z$  (рис. 7). Однако при одинаковом  $h_z$  время установления тем больше, чем сильнее стратифицирована вода (рис. 7).

Аналогичные результаты были получены при фоновом убывании температуры и солености с глубиной и интрузией, при которой на ее границах образуются солевые пальцы. В этой ситуации

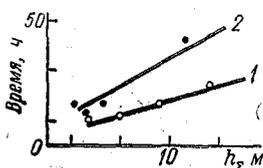


Рис. 9. Время достижения установившегося состояния при солевых пальцах:

1 — при  $R \rightarrow 1$ ; 2 — при  $R = 2$ ;  $\circ$  — результаты расчетов при  $R \rightarrow 1$ ;  $\bullet$  — результаты расчетов при  $R = 2$ .

$h_2$  и  $\bar{h}$  также увеличиваются с увеличением  $\Delta S$  (рис. 8). Однако зависимость  $h_2$  от  $\Delta S$  уже не является линейной, в то время как функция  $\bar{h}$  от  $\Delta S$  остается линейной. Время достижения установившегося состояния линейно увеличивается с ротом  $h_2$ . При этом чем больше стратификация вод, тем медленнее идут процессы структурообразования (рис. 9).

Модель позволяет проанализировать и множество других различных ситуаций.

### Заключение

В работе предложен комплекс разномасштабных моделей формирования ступенчатой структуры. Установлены зависимости интенсивности структурообразования, характеристик тонкой структуры от фоновых условий в океане и накладываемых на них возмущений. Модель может быть использована для получения климатической характеристики тонкой структуры океана по режимному пространственному распределению температуры и солености. Полученные зависимости можно также использовать при расчетах эффективных коэффициентов тепло- и солеобмена в стратифицированном океане.

В модели основным источником структурообразования служит неустойчивость вследствие двойной диффузии, что является, конечно, некоторым ограничением. Однако надо иметь в виду, что фоновые условия в океане, способствующие неустойчивости из-за двойной диффузии, являются весьма распространенными. Независимые оценки [2, 6] показывают, что более половины объема вод главного термоклина стратифицированы так, что одна из компонент: температура или соленость обладают запасом потенциальной энергии, которая высвобождается вследствие двойной диффузии.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гидродинамические неустойчивости и переход к турбулентности. / Под ред. Х. Суинни, Дж. Голлаба. — М.: Мир, 1984. — 344 с.
2. Карлин Л. Н. Математическое моделирование мелкомасштабной термохалинной структуры верхнего слоя океана. — Тезисы докладов II Всесоюзного симпозиума «Механизмы генерации мелкомасштабной турбулентности в океане». Калининград, 1985, с. 76—78.

3. Озмидов Р. В. Мелкомасштабная турбулентность и тонкая структура гидрофизических полей в океане. — Океанология, 1983, т. XXIII, вып. 4, с. 533—537.

4. Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкостях. — М.: Мир, 1977. — 31 с.

5. Федоров К. Н. Толщины слоев и коэффициенты обмена при послойной конвекции в океане. — ДАН СССР, 1986, т. 287, № 5, с. 1230—1233.

6. Федоров К. Н., Перескоков А. И. Типизация термохалинных слоев стратификации в Мировом океане. — Метеорология и гидрология, 1986, № 12, с. 71—77.

7. Huppert H. E., Turner J. S. Double — diffusive convection and its implications for the temperature and salinity structure of the ocean and lake /anda. — J. Phys. Oceanogr. 1972, vol. N 4, pp. 456—461.

8. Marmorino G. O., Caldwell D. R. Heat and salt transport through a diffusive thermohaline interface — Deep Sea Res., 1976, vol. 23, p. 59—67.

9. Piacsek S. A., Toomre J. Nonlinear evolution and structure of salt fingers. — In marine turbulence (ed. Nihoul J. C. J), p. 193—219.

10. Schmitt R. W. Flux measurements on salt fingers at an interface. — Marin. Res., 1979, 37, pp. 419—436.

УДК 551.466.5

А. В. НЕКРАСОВ

## ОЦЕНКА ОЖИДАЕМОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРИЛИВНОГО РЕЖИМА ПРИ СООРУЖЕНИИ ПРИЛИВНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Сооружение приливных электростанций (ПЭС), связанное со строительством плотин и отсечением части акватории морского бассейна, может привести к существенному изменению параметров приливных колебаний и обусловленных ими гидрологических условий в пределах зоны, прилегающей к створу плотины. Поэтому проектирование ПЭС должно сопровождаться прогностической оценкой ожидаемой трансформации приливного режима и связанных с ним гидрологических характеристик, которую целесообразно осуществлять на основе гидродинамического моделирования. Такое прогностическое моделирование получает в настоящее время все более широкое распространение за рубежом [7, 8, 10]. В последние годы на кафедре динамики океана в ЛГМИ\* были выполнены значительные работы в этом направлении применительно к наиболее перспективным крупномасштабным отечественным проектам, разрабатываемым во Всесоюзном проектно-исследовательском и научно-исследовательском институте «Гидропроект» [1].

\* Указанные работы выполнялись в содружестве с кафедрой океанологии полярных областей Ленинградского высшего инженерного морского училища им. адм. С. О. Макарова.

Прогностическое моделирование трансформации приливного режима нацелено на решение двух основных задач. Первая из них непосредственно связана с проектированием и заключается в учете ожидаемых изменений параметров приливных колебаний для корректной оценки эксплуатационных и мощностных качеств проектируемой ПЭС и оптимального режима ее работы, а также для определения объема необходимых строительных работ. Главными прогнозируемыми элементами в этом случае являются амплитуды колебаний уровня и их статистические характеристики (повторяемость и обеспеченность) в районе приливного створа. Вторая задача имеет более широкий характер и состоит в учете и анализе влияния сооружения и работы ПЭС на окружающую среду. В этом плане наиболее важными элементами трансформации приливного режима следует считать:

— изменение амплитуды и типа (спектральной структуры) приливных колебаний уровня в пределах всей зоны трансформации;

— изменение расположения, размеров и формы зоны береговой осушки;

— изменение среднего уровня — главным образом в пределах акватории, отсекаемой створом ПЭС;

— изменение картины приливных течений, приводящее к возникновению зон их усиления и ослабления.

Среди наиболее существенных вторичных трансформационных эффектов, оказывающих влияние на гидрологический режим, следует особо отметить:

— изменение режима температуры и солености в зоне трансформации за счет перестройки плотностной структуры, определяемой интенсивностью приливного перемешивания;

— изменение картины остаточной циркуляции;

— изменение ледового режима.

Основные результаты, приводимые ниже, были получены путем численных экспериментов на гидродинамических моделях Мезенского залива и Пенжинской губы. Обе модели основаны на численном решении уравнений движения и неразрывности, записанных в приближении теории мелкой воды в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} - f v &= -g \frac{\partial \xi}{\partial x} - k \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{h + \xi}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + f u &= -g \frac{\partial \xi}{\partial y} - k \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{h + \xi}, \\ \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [u(h + \xi)] + \frac{\partial}{\partial y} [v(h + \xi)] &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\xi$  — приливное возвышение уровня моря;  $u, v$  — компоненты скорости приливного течения вдоль координатных осей  $x$  и  $y$ ;

$f$  — параметр Кориолиса;  $g$  — ускорение свободного падения;  $h$  — глубина от невозмущенного уровня моря;  $k$  — коэффициент донного сопротивления.

Описание моделей изложено в работах [2, 3].

Следует отметить, что прогностические расчеты для наиболее известных зарубежных проектов в заливе Фанди [7, 5] и Бристольском заливе [8, 10, 9] нередко дают, как известно, неоднзначные результаты при использовании разных моделей для одного и того же объекта. Одной из главных причин этого является, видимо, сильная зависимость результата от условий, задаваемых на «жидкой» границе бассейна. Способ задания таких условий представляет собой одну из важнейших методических проблем при моделировании подобного рода, когда воспроизводится картина, характеристики которой заранее неизвестны в пределах всей расчетной области, в том числе и на ее границах. Корректно решить эту проблему можно только при использовании на открытой границе условий специального типа — так называемых импедансных граничных условий. При разработке и реализации моделей Мезенского залива и Пенжинской губы этому вопросу было уделено большое внимание. При этом следует подчеркнуть, что правильное задание импедансных граничных условий требует четкого понимания физического механизма моделируемых процессов.

Представление об основных чертах такого механизма, необходимое также при интерпретации результатов численных экспериментов, поскольку оно позволяет заранее предугадать и классифицировать важнейшие трансформационные эффекты, базируется на схеме «вторжение — отражение», по которой обычно формируется режим приливных колебаний в окраинных морских бассейнах типа залива. При этом пространственная картина колебаний, и прежде всего их амплитудные и энергетические характеристики, в значительной степени определяется резонансными условиями: геометрическими («настройка» бассейна на резонанс) и излучательно-диссипативными («добротность»). Сооружение в заливе приливной электростанции должно привести к трансформации приливного режима, причем наибольшее практическое значение для оценки мощностных характеристик ПЭС имеют те трансформационные эффекты, которые ведут к увеличению или уменьшению перепада уровней (напора) по обе стороны дамбы. Названные эффекты можно разделить на две группы: а) вызванные наличием дамбы и б) вызванные действием турбин и водопропускных отверстий. К важнейшим эффектам первой группы можно отнести:

1. Отражение приливной волны от дамбы. Этот эффект способствует увеличению амплитуды прилива с наружной стороны дамбы, т. е. ведет к росту возможного напора.

2. Изменение геометрии бассейна и соответственно его настройки на резонанс. При приближении к резонансу этот эффект способствует повсеместному росту амплитуд, а при удалении от

резонанса он ведет к их уменьшению; таким образом его влияние на напор неоднозначно.

3. Изменение диссипативных свойств бассейна. Как правило сооружение дамбы ведет к уменьшению диссипации по двум причинам: во-первых, из-за отсечения (и исключения из колебательного процесса) вершины залива, обычно наиболее мелководной и обладающей повышенной диссипативной способностью, и, во-вторых, из-за возникновения пучности и ослабления приливных течений в обширной зоне, прилегающей к дамбе. Этот эффект способствует приближению приливных движений к типу стоячих волн, в результате чего у дамбы (в пучности) амплитуда прилива и напор должны возрасти, но зато на расстоянии четверти длины приливной волны от дамбы (в узле) должно произойти уменьшение амплитуд с соответствующим усилением приливных течений.

К главным эффектам второй группы относятся:

1. Ослабление отражательной способности дамбы из-за ее частичной проницаемости при работе агрегатов ПЭС. Этот эффект ведет к некоторому снижению амплитуды с наружной стороны дамбы и к уменьшению стоячей доли в приливных колебаниях. С энергетической стороны этот эффект обусловлен ростом потерь, возникающих из-за отбора полезной энергии агрегатами, а также за счет дополнительной диссипации при протекании объемов воды через агрегаты и при колебаниях, возбуждаемых в отсеченной акватории. В целом этот эффект ведет к снижению напора.

2. Возбуждение колебаний во внутренней отсеченной части бассейна, приводящих к перекосам водной поверхности, которые могут способствовать как увеличению, так и уменьшению напора в створе ПЭС.

3. Стационарное смещение среднего уровня в отсеченном бассейне. Такое смещение автоматически устанавливается при односторонней работе ПЭС вследствие необходимости поддержания достаточных напорov при нулевом расходе через плотину в среднем за период. При наиболее распространенной схеме работы «на отлив» смещение среднего уровня в бассейне происходит в сторону повышения.

4. Локальные возмущения, вносимые работой агрегатов ПЭС. Работа указанных агрегатов сопровождается ритмичным, но прерывистым протеканием воды через тело плотины, что приводит к искажениям плавного хода колебаний в непосредственной близости по обе стороны от нее.

Приведем некоторые результаты оценки ожидаемой трансформации, полученные при реализации разработанных моделей. Как правило, эти результаты получены для двух случаев: при непроницаемой дамбе и при работе агрегатов в заданном режиме.

**Мезенский залив.** Ввиду подавляющего преобладания полусуточной волны  $M_2$  в этом районе, здесь приводятся только результаты, относящиеся к указанной приливной гармонике. Расчетная область модели, включающая, помимо самого Мезенского залива,

также всю Воронку Белого моря, а также положение плотины и размещение на ней агрегатов ПЭС, показана на рис. 1. На береговой черте задавалось условие, учитывающее береговую осушку [2, 3], а на открытых границах (в створе м. Святой Нос — м. Канин Нос и на входе в Горло) — импедансное граничное условие, учитывающее как внешнее воздействие на расчетную область, так и излучение энергии за ее пределы [7, 4].

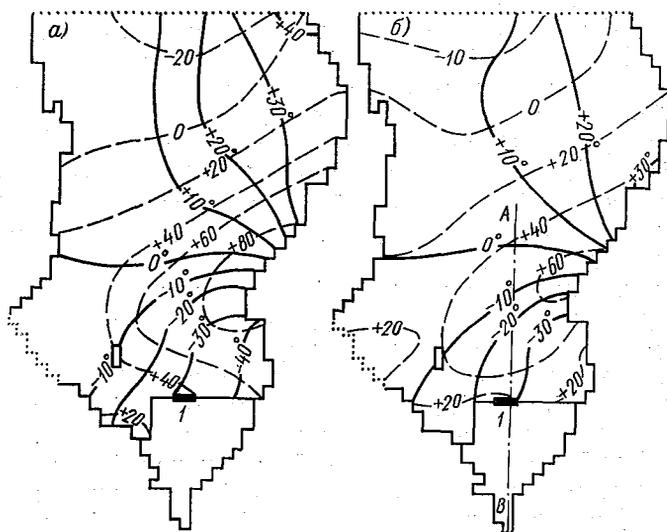


Рис. 1. Изменения амплитуд (прерывистые линии) и фаз (сплошные линии) полусуточного прилива  $M_2$  при сооружении ПЭС в Мезенском заливе. АВ — линия продольного профиля (см. рис. 2):

а — при сплошной дамбе; б — при действующих агрегатах; 1 — положение электростанции на плотине.

Результаты моделирования для случая сплошной дамбы (рис. 1, а) предсказывают увеличение амплитуды не только в оставшейся после отсечения части Мезенского залива, но и на большей части всей Воронки с максимумом (свыше 80 см) в южной части Канинского и северной части Конушинского берегов. В створе дамбы рост амплитуды составляет от 20 до 60 см, нарастая с юго-запада на северо-восток. В районе предполагаемой установки агрегатов ПЭС увеличение амплитуды составляет почти 40 см. Изменение фаз максимально в восточной части бассейна, достигая здесь 30—40°. При этом вблизи дамбы происходит сдвиг в сторону более раннего наступления полной воды, а вдали от

нее имеет место запаздывание. Заметные изменения претерпевает зона осушки прибрежных участков. При отсечении вершины Мезенского залива сплошной дамбой значительная часть этой зоны (примерно 435 км<sup>2</sup>) оказывается за пределами расчетной области. Однако рост амплитуд приводит к увеличению зоны осушки в оставшейся части расчетной области примерно на 125 км<sup>2</sup>. Новая площадь осушаемого мелководья при наличии сплошной дамбы будет равна приблизительно 400 км<sup>2</sup>.

В случае действующей ПЭС (односторонняя схема работы «на отливе») общий характер трансформации сохраняется (см. рис. 1, б). На основной части моделируемой области происходит увеличение амплитуд приливных колебаний с максимумом около 60 см вблизи южной оконечности Канинского берега. В створе проектируемой ПЭС увеличение амплитуды составляет около 15 см. Изменение фаз приливных колебаний более отчетливо выражено в восточной части бассейна и в районе створа ПЭС, где наступление полной воды ожидается примерно на час раньше, чем в природных условиях.

Анализ движений воды в бассейне, отсекаемом плотиной ПЭС, показывает, что амплитуда формирующихся здесь колебаний существенно уменьшается по сравнению с природными условиями, при этом у плотины эта амплитуда почти вдвое меньше, чем в вершине залива (рис. 2). Практическое отсутствие фазовых изменений в продольном направлении свидетельствует о стоячем характере колебаний в отсеченном бассейне; эти колебания сопровождаются продольными перекосами водной поверхности порядка 1 : 100 000. При указанной односторонней схеме работы агрегатов ПЭС в пределах отсеченного бассейна происходит повышение среднего уровня примерно на 90 см. Этот эффект в сочетании с уменьшением амплитуд должен привести к значительному сокращению ширины зоны осушки в отсеченном бассейне.

**Пенжинская губа.** В приливных колебаниях Пенжинской губы преобладают суточные составляющие и суммарный прилив по типу относится к суточному и неправильному суточному. Это сильно затрудняет задачу проектирования ПЭС, в том числе и в отношении прогностического расчета трансформированных приливных колебаний. Главная трудность состоит в том, что при моделировании случая с действующей ПЭС отдельный расчет для приливных гармоник теряет смысл, так как рассматриваемые колебания, будучи значительно меньше суммарных, не могут обеспечить реального режима работы агрегатов станции. Поэтому для получения достоверных оценок приходится выполнять моделирование суммарного прилива, а это, при значительной изменчивости последнего в месячном, годовом и многолетнем циклах, требует расчета на длительные промежутки времени, что связано с очень большим объемом вычислительных работ.

Разработка модели велась для двух вариантов расположения плотины: «малый створ» и «большой створ». Здесь приводятся

езультаты для малого створа, расположенного на линии м. Средний — м. Водопадный. Расчетная область и положение створа показаны на рис. 3, а. Задание граничных условий производилось по тем же правилам, что и на модели Мезенского залива.

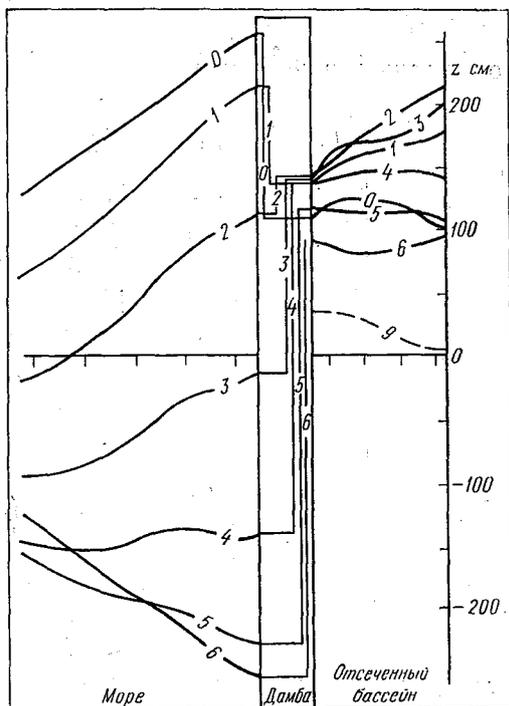


Рис. 2. Продольные профили водной поверхности перед плотиной и в отсеченном бассейне при односторонней работе ПЭС «на отливе». Цифры на кривых — часы. Профиль выбран вдоль линии *AB* на рис. 1.

Численные эксперименты для случая сплошной дамбы, выполненные для отдельных гармоник (в случае сплошной дамбы это допустимо) обнаруживают такие общие черты трансформации, как усиление колебаний вблизи дамбы и двузначность фазовых сдвигов (опережение у дамбы и отставание у открытой границы). При этом оказывается, что усиление полусуточных колебаний вблизи дамбы происходит гораздо заметнее, чем усиление суточных. Причина такого различия заключается в неодинаковом изменении резонансных условий для разных гармоник. Оценка показывает, что сооружение дамбы создает в оставшейся части Пенжинской

губы для полусуточных гармоник, ситуацию, близкую к резонансной, а для суточных — ситуацию, соответствующую лишь окраине области резонанса. Резонанс для полусуточных колебаний, приводя к их значительному росту у дамбы (пучность), одновременно ведет к падению амплитуд на открытой границе (узел), что должно иметь следствием изменение типа суммарного прилива: вблизи дамбы он должен приблизиться к полусуточному, а на

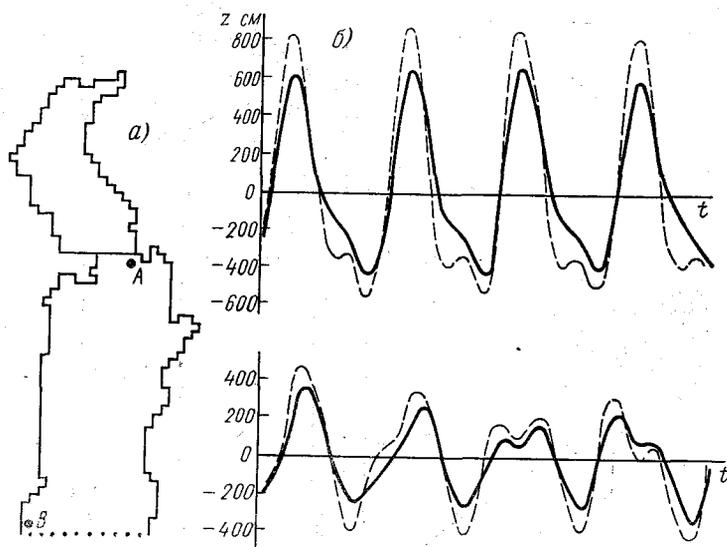


Рис. 3. Трансформация приливных колебаний в Пенжинской губе:

*a* — расчетная область модели; *б* — перестройка суммарного прилива в малом створе (верх — тропический прилив; низ — равноденственный прилив. Сплошные линии — расчет для природных условий, прерывистые линии — расчет при наличии дамбы).

входе в губу — к суточному. Для приливных течений картина будет обратной, т. е. при сооружении дамбы на входе в Пенжинскую губу следует ожидать смещение спектрального максимума из области суточных периодов в сторону полусуточных. Вблизи дамбы течения всех периодов резко ослабевают.

На рис. 3, *б* приведены примеры, иллюстрирующие трансформацию суммарного прилива вблизи дамбы. Здесь также можно видеть практически все основные названные выше трансформационные эффекты: увеличение амплитуды колебаний, сдвиг фазы в сторону опережения, усиление роли полусуточных составляющих. Следует отметить изменчивость трансформационных эффектов, обусловленную тропическим неравенством: в период тропического прилива наиболее заметно выражены эффекты, вызванные транс-

ормацией суточных составляющих, а в период равноденственных приливов становится ощутимой роль полусуточных гармоник. Поскольку суточные гармоники все же остаются преобладающими после трансформации, то в суммарном приливе периодам тропического прилива соответствуют максимальные, а периодам равноденственного прилива — минимальные значения трансформационного усиления.

Изменение спектральной структуры приливных колебаний качественно характеризуется приводимой ниже таблицей, где приведены соотношения между амплитудами суточных и полусуточных составляющих ( $A_c$  и  $A_{nc}$ ) до и после трансформации, а также коэффициенты трансформационного усиления  $K$  в двух пунктах: вблизи дамбы (пункт  $A$ ) и вблизи открытой границы (пункт  $B$ ). Как указывалось выше, сооружение дамбы смещает условия для полусуточного прилива в сторону резонанса, а для суточного прилива — в сторону антирезонанса. В результате вблизи дамбы амплитуда суточной составляющей возрастает на 24—33%, а у открытой границы — на 11—27%. В то же время амплитуда полусуточной составляющей увеличивается вблизи дамбы на 41—67%, у открытой границы (в зоне узла) она снижается на 19—23%. Таким образом, сооружение дамбы в малом створе изменяет характер суммарного прилива на противоположных концах остающейся части Пенжинской губы, смещая его в сторону полусуточного типа на северном конце и в сторону суточного типа на южном. Изменения аналогичного характера, но в «смягченном» виде, происходят и при моделировании случая с действующей ПЭС.

Амплитудные соотношения и коэффициенты трансформационного усиления ( $K$ ) суточных ( $c$ ) и полусуточных ( $nc$ ) составляющих суммарного прилива с учетом тропического неравенства

Амплитудные соотношения и коэффициенты $K$	Тропический прилив		Равноденственный прилив	
	пункт $A$	пункт $B$	пункт $A$	пункт $B$
$A_c/A_{nc}$ природное	2,52	3,23	2,50	2,31
$A_c/A_{nc}$ трансформированное	2,40	4,43	1,87	3,80
$K_{nc}$	1,41	0,81	1,67	0,77
$K_c$	1,33	1,11	1,24	1,27

В настоящее время исследование влияния строительства ПЭС на гидрологические характеристики в зоне трансформации продолжается. Основное внимание сосредоточено сейчас на анализе

тех изменений, которые создаются сооружением плотины и работой агрегатов станции в картине приливных течений, плотностной и термохалинной структуре, а также ледовом режиме прилегающих акваторий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бернштейн Л. Б. Основные направления исследований при разрыве приливных электростанций. — В сб.: Использование энергии приливных и ветровых волн в океане. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1984, с. 46—51.
2. Горелков В. М., Григорьева Л. П., Моносов М. Л. Трансформация полусуточного прилива в северной части Белого моря при условии строительства Мезенской ПЭС. — Тр. ин-та Гидропроект, 1981, № 77, с. 74—80.
3. Горелков В. М., Некрасов А. В. Моделирование полусуточного прилива в мелководном бассейне с учетом береговой суши. — В междувед. сб. Исследование и освоение Мирового океана. Л., изд. ЛПИ, 1982, вып. 77, с. 140—146. (ЛГМИ).
4. Некрасов А. В. Способ расчета приливных колебаний, трансформированных сооружением плотины в вершине залива. — В междувед. сб.: Структура и динамика вод Мирового океана. Л., изд. ЛПИ, 1983, с. 96—102. (ЛГМИ).
5. Duff G. F. D. Numerical modelling of tides in the Bay of Fundy. Tide Power and Estuary Management. Proc. 13-th Symp. Colston Res. Soc., Bristol 1979, p. 93—98.
6. Garrett C. J. R., Greenberg D. A. Predicting changes in tidal regime: the open boundary problem. Journ. of Physical Oceanography, 1977, vol. 7 N 2, p. 171—181.
7. Greenberg D. A. Mathematical studies of tidal behaviour in the Bay of Fundy. Man. Rep. Ser. Marine Sci. Dir. Dept. Env., Ottawa, 1977, N 46 p. 1—127.
8. Heaps N. S. Tidal effects due to water power generation in the Bristol Channel. Proc. Intern. Conf. Util. Tidal Power, 1970, Ed. T. J. Grey and O. K. Gashus, Plenum Press, London, 1972, p. 435—455.
9. Miles G. V. Estuarine modelling — Bristol Channel. Tidal Power and Estuary Management. Proc. 13-th Symp. Colston Res. Soc., Bristol, 1979, p. 76—84.
10. Townson J. M., Davies M. E., Matsoukis P. Numerical simulations of the Bristol Channel tide. Proc. Instn. Civ. Engrs., Part 2, 1980, vol. 68 Sept., p. 671—685.

УДК 551.46.09

Ю. П. ДОРОНИН, С. В. КОТОЛ

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ШЕЛЬФОВОГО МОРЯ В ХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЦЕЛЯХ

Человечество приступило к использованию океана и его ресурсов в первую очередь в шельфовой зоне. Здесь зародилось мореплавание и началось рыболовство. В этой зоне собирались первые сведения о течениях, колебаниях уровня и рельефе дна. Из-за специфики гидрологических условий в шельфовой зоне наиболее

ысока концентрация биологических ресурсов. В ней обнаружены большие запасы полезных ископаемых. Эти ресурсы послужили источником международных споров и, в конце концов, соглашения о сферах влияния в пределах шельфа. Интенсификация использования богатств шельфа, активизация судоходства и гидротехнического строительства предъявили требования к повышению их океанографического обеспечения, а следовательно, к повышению уровня изученности гидрологии шельфа.

К настоящему времени шельфовая часть Мирового океана в наибольшей степени освещена наблюдениями, однако сложность гидрологических процессов требует для статистического анализа длительных рядов наблюдений, которых в преобладающем случае нет. Поэтому и начинают применяться методы математического моделирования, для которых имеющаяся информация может рассматриваться как реперная.

Значительная часть площади морей, омывающих нашу страну, находится в пределах шельфа, причем некоторые из них сообщаются с океаном через проливы, ограничивающие водообмен. Это приводит к необходимости моделировать гидрологические процессы в проливе, усложняющие модель. Кроме того, все моря СССР в большей или меньшей степени замерзающие. Образующийся лед не только сам зависит от термохалинного и динамического состояния моря, но и влияет на него. Естественно, что это также нужно учитывать в модели. К сожалению, на настоящем этапе развития математического моделирования трудно в одной модели учесть все нюансы гидрологических процессов, протекающих в шельфовом море. Однако несомненно, что только при воспроизведении крупномасштабной изменчивости гидрологических процессов в годовом цикле удастся оценить характер их взаимодействия и, самое главное, проверить согласованность результатов моделирования с данными наблюдений. Это позволяет уже сейчас верно воспроизводить характер протекания тех гидрологических процессов и поля таких гидрологических элементов, которые необходимо знать при решении некоторых хозяйственных задач по освоению шельфа.

При исключении из описания изменчивости менее синоптической в модели можно использовать линеаризованные квазистационарные уравнения движения воды и льда. Уравнения же теплопроводности и диффузии соли должны содержать нестационарный и адвективные члены. Эти положения учтены в составленной модели:

$$if V = \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial V}{\partial z} - g \nabla_k \xi - \frac{g}{\rho_0} \int_0^z \nabla_k \rho dz; \quad (1)$$

$$if \rho_n h V_n = \tau_k + 0,5 (V_0 - V_n) \rho_0 \sqrt{fk} - h \nabla_k P; \quad (2)$$

$$\frac{dF}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial F}{\partial z} + K \nabla^2 F. \quad (3)$$

Здесь  $V = u + iv$  — комплексная скорость течения;  $k, K$  — коэффициенты вертикальной и горизонтальной турбулентности;  $\nabla_k = \frac{\partial}{\partial x} + i \frac{\partial}{\partial y}$ ;  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ ;  $\xi$  — отклонение уровня от среднего;  $f$  — параметр Кориолиса;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\rho, \rho_0, \rho_L$  — плотность и стандартная плотность воды и плотности льда соответственно;  $h$  — толщина льда;  $V_L = u_L + iv_L$  — комплексная скорость дрейфа льда;  $\tau_k = \tau_x + i\tau_y$  — комплексное напряжение трения ветра;  $F$  — обозначает температуру ( $T$ ) или солёность ( $S$ ).

Полагалось, что напряжения сжатия  $P$  тормозят движение только сплошного льда (концентрация  $N=1$ ). Описывались они уравнением

$$h\nabla^2 P = \left( \frac{\partial \tau_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_y}{\partial y} \right) + 0,5 \rho_0 V f k \left( \frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y} \right) + b(P - P_0)^2, \quad (4)$$

где  $b$  — эмпирически подбираемый размерный коэффициент;  $P_0$  — напряжение разрушения при сжатии.

Если лёд при моделировании оказывался не сплошным ( $N < 1$ ) то принималось  $P=0$ .

Сплошность льда представлялась функцией его дивергенции а при положительной температуре воздуха дополнительно учитывалось боковое таяние в виде функции от радиационного баланса водной поверхности ( $B$ ):

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial N u_L}{\partial x} + \frac{\partial N v_L}{\partial y} = \frac{(1-N)B}{L \rho_L h}, \quad (5)$$

где  $L$  — теплота плавления морского льда.

Вычисление роста и стаивания льда проводилось по упрощённым уравнениям теплового баланса. Прирост льда полагался пропорциональным градиенту температуры, который во льду и в снеге на нём принимался линейным, а таяние льда рассчитывалось при положительной температуре воздуха и считалось пропорциональным радиационному балансу снежно-ледяного покрова.

Плотность воды, входящая в уравнение (1), вычислялась по формуле Мамаева. Коэффициент вертикального турбулентного обмена полагался меняющимся скачкообразно на глубине  $h$ , определявшейся из условия, что при устойчивой стратификации число Ричардсона на ней возрастало до 0,25. В случае конвективного перемешивания  $h$  совпадала с глубиной, на которой происходил переход к устойчивой стратификации плотности.

В качестве граничных условий на поверхности моря в модели использовались потоки тепла, влаги и количества движения, выраженные через стандартные метеорологические характеристики, на дне и берегах моря — принималось отсутствие через них пото-

ков тепла, соли и льда, учитывался также тепловой сток рек и их опресняющее влияние.

В полном объеме применительно к Белому морю модель приведена в работе [1]. Такого рода модели без ледового блока [2, 3] позволили воспроизводить циркуляцию вод, а также поля температуры и солености, но отсутствие исходной гидрологической информации не давало возможности вывести эти модели за рамки исследовательских. Только учет ледового блока позволяет обходиться без точных начальных данных, используя постепенную приспособляемость внутреннего состояния системы к внешним воздействиям и граничным условиям. Естественно, что период приспособления оказывается тем короче, чем точнее заданы начальные условия.

По-видимому, первым исследованием, в котором использовалось положение о выходе на установившееся состояние замерзающего бассейна была работа Семтнера [4]. В ней показан характер постепенного изменения начальных полей температуры и солености, но необходимость гашения вычислительных возмущений заставила пользоваться большими коэффициентами горизонтальной турбулентности, в результате чего воспроизведенные поля океанологических характеристик оказались сильно сглаженными. В его модели также не учитывалось изменение сплоченности льдов. Использование в данном случае линеаризованного уравнения (1) и решение уравнения (2) методом прогонки не приводят к вычислительным возмущениям и моделирование можно было проводить на длительный срок без какого-либо сглаживания результатов.

Модель использовалась для воспроизведения гидрологических полей на ряде морей, из которых наиболее полный объем моделирования проведен по Белому морю [5]. Несмотря на приближения, заложенные в модели, результаты вычислений по ней оказываются полезными для использования в народнохозяйственных целях.

Возможность проводить моделирование на длительный срок, в течение которого происходит выход результатов моделирования на установившееся состояние, позволяет обходиться без проведения синхронной гидрологической съемки для получения исходной информации. Несомненно, что корректировка результатов моделирования необходима, но она не требует использования таких сил и средств, которые нужны для обычного получения начальных данных.

Модель позволяет на любой момент внутри года получить представление о трехмерных полях горизонтальных (рис. 1) и вертикальных составляющих течений. Пока наблюдения за течениями проводятся нерегулярно, а вертикальные скорости вообще не измеряются. Поэтому значение результатов моделирования трудно переоценить. Информация о течениях нужна судоводителям, она

используется при изучении и прогнозировании переноса загрязнений, требуется рыбопромысловым организациям, так как с ее помощью проводится индикация зон повышенной биологической продуктивности. В этом отношении особенно ценны данные о вертикальной составляющей скорости.

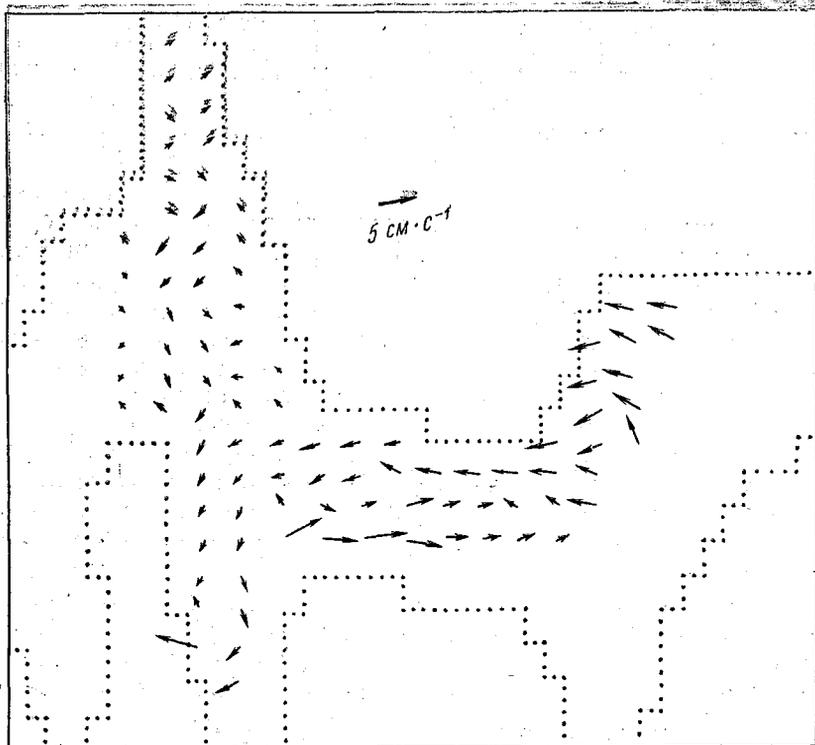


Рис. 1. Поле течений на 30-ти м — 20-я декада расчета (декабрь).

Для решения ряда гидробиологических задач важное значение имеет знание распределения температуры и солёности в море. В частности, представляет интерес интенсивность и положение теплого промежуточного слоя. Объем инструментальных наблюдений этих элементов, особенно зимой, крайне мал. Модель же позволяет составить не только общее представление о полях температуры и солёности, но и проследить формирование и изменение экстремумов, таких как теплый промежуточный слой (рис. 3).

Большое значение для хозяйственного использования замерзающих морей имеет информация о их замерзании, состоянии ледяного покрова и его разрушении. Сроки замерзания моря учи-

ываются при планировании окончания навигации определенного класса судов, окончания лесосплава, в проведении некоторых работ по марикультуре и т. д. Предвычислить даты замерзания можно, лишь зная термохалинную структуру вод и течения в предледоставный период [6]. В большинстве случаев гидрологическая

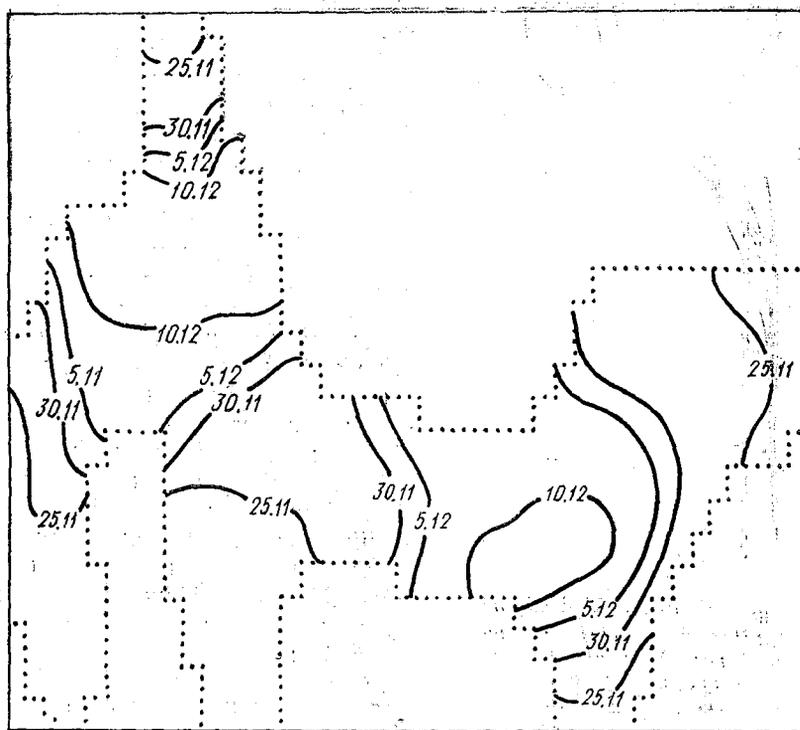


Рис. 2. Изохроны появления льда ( $N=1$ ). Полное становление ледяного покрова на Белом море после 10.12.

съемка с требуемой подробностью не проводится, а отдельные измерения могут служить лишь реперными данными к результатам расчетов с помощью математической модели. Численные прогнозы сроков замерзания арктических морей уже давно используются на практике. Проверка разработанного метода на материалах других морей также привела к положительным результатам (рис. 2).

Ни одна гидрологическая характеристика не влияет на хозяйственное использование моря так сильно, как ледяной покров. Его толщину, сплоченность и подвижки учитывают при зимней навигации, при добыче морского зверя, при подледном рыбо-

ловстве и т. д. Математическая модель дает возможность весьма оперативно на любой момент времени составить картину состояния льда в море (рис. 4) и определить ее изменение при смене метеорологической ситуации. Поскольку в морях с теплым промежуточным слоем существенен поток тепла из воды ко льду, то без его учета нельзя правильно определить толщину льда. Поэтому при моделировании приходится принимать во внимание термохалинное состояние моря и обусловленные им градиентные течения. Пока что совместное воспроизведение термохалинного состояния моря, течений и льда может быть проведено только с помощью математической модели.

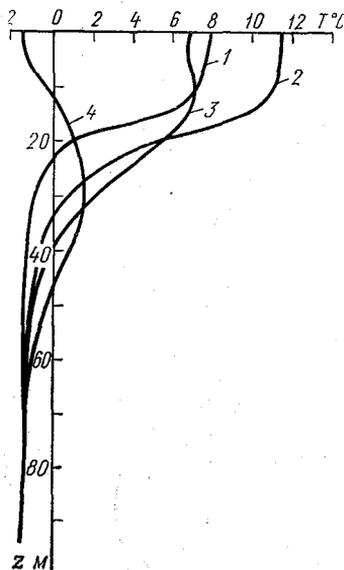


Рис. 3. Распределение по вертикали рассчитанной температуры воды в бассейне Белого моря:

1 — весна; 2 — лето; 3 — осень; 4 — зима.

Моделирование является единственным средством, с помощью которого удается определить влияние различных внешних факторов на гидрологический режим моря. Оно используется при оценке последствий антропогенных воздействий, таких как зарегулирование речного стока, сбросе в море теплых вод, создании оптимальных условий для развития марикультуры и др.

Изучение посредством моделирования влияния внешних факторов на взаимосвязанные гидрологические процессы в море представляется необходимым этапом при разработке прогностических схем. Такие модельные эксперименты позволяют выяснить роль и вклад каждого предиктора, а также определить влияние их ошибок на точность прогноза. Они, в частности, показали, что основная циркуляция вод в Белом море обусловлена распресняющим действием материкового стока. Следовательно, колебания речного стока надо принимать во внимание. Достаточно заметно влияние вариаций радиационного баланса и влажности воздуха. Поэтому математическое моделирование широко применяется в исследовательских работах гидрометеорологической службы.

Математическая модель гидрологических процессов уже используется в качестве одного из блоков комплексной экологической модели моря. Это означает, что можно ожидать еще более широкого теоретического и практического приложения принципов и результатов моделирования.

Математическая модель гидрологических процессов уже используется в качестве одного из блоков комплексной экологической модели моря. Это означает, что можно ожидать еще более широкого теоретического и практического приложения принципов и результатов моделирования.

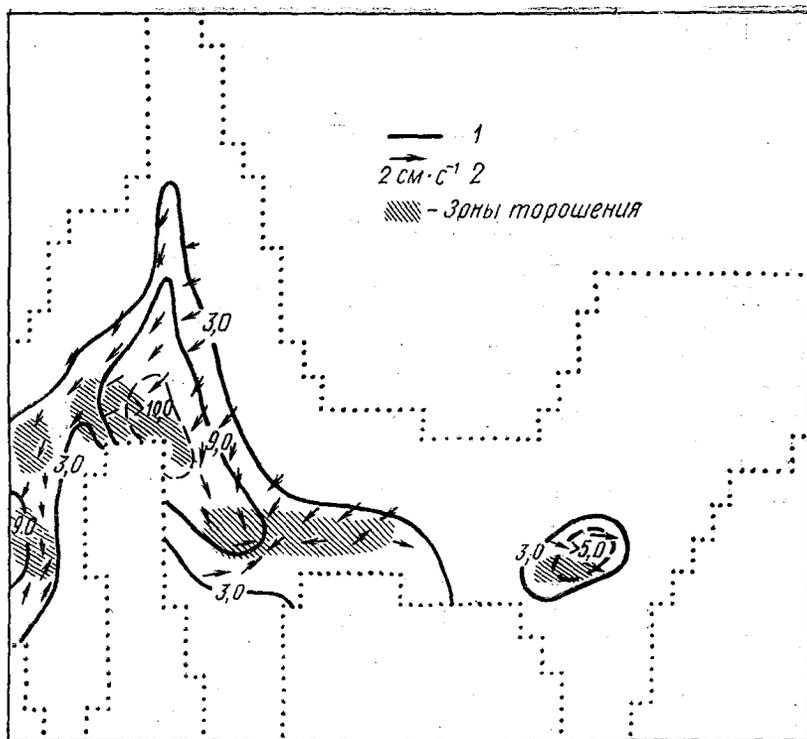


Рис. 4. Рассчитанное состояние ледяного покрова на Белом море в период таяния льда (май):

1 — изолинии толщины льда (см); 2 — скорость и направление дрейфа льдов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Котов С. В., Царев В. А. Комплексная исследовательская модель сезонных гидрологических процессов для условий Белого моря. — Архангельск, 1984, Материалы Региональной конференции по Белому морю, с. 15—19.
2. Тамсалу Р. Э. Моделирование динамики и структуры вод Балтийского моря. — Рига: Звайгзне, 1979. — 152 с.
3. Доронин Ю. П., Карлин Л. Н., Крейман К. Д., Мензин А. Б. Моделирование гидрологического режима Балтийского моря. — Тр. XII конф. балтийских океанографов, Ленинград 14—17 апр. 1980 г. Л., Гидрометеиздат, 1981, с. 21—26.
4. Semptner A. J. Numerical Simulation of the Arctic Ocean Circulation. Journ. of Phys Oceanogr. 1976, v. 6, N 4, pp. 409—425.
5. Котов С. В., Царев В. А. Анализ результатов моделирования внутригодовой изменчивости полей элементов гидрологического режима Белого моря с учетом их взаимосвязи. — Мурманск, 1985, Материалы Всесоюзной конференции по географии и картографированию океана, с. 6.
6. Доронин Ю. П., Хейсин Д. Е. Морской лед. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. — 316 с.

## ФРОНТАЛЬНЫЕ ЗОНЫ НА ЮЖНОМ КОНТИНЕНТАЛЬНОМ ШЕЛЬФЕ ВЬЕТНАМА

Внимание к исследованию гидрологии южного шельфа Вьетнама объясняется, с одной стороны, слабой его изученностью, а с другой, наметившимся в последние годы интенсивным освоением его в интересах народного хозяйства республики. Выполненные в последние годы исследования позволили получить общее представление о гидрологии этого района и обнаружить некоторые интересные в научном и важные в практическом отношении явления — наличие апвеллинга и систему гидрологических фронтальных зон.

По среднемноголетним данным в сезон юго-западного муссона (май — сентябрь) распределение температуры и солёности поверхностного слоя Южно-Китайского моря в целом характеризуется малой горизонтальной изменчивостью. Лишь в области южного шельфа наблюдается обострение горизонтальных градиентов субстанций. Данные наблюдений свидетельствуют также о довольно высоких градиентах в некоторых областях шельфа [1]. Материалы гидрологической съёмки на НИС «Академик Несмеянов» в августе 1982 г. подтверждают существование контраста температуры воды на шельфе больше  $9,0^{\circ}\text{C}$  на расстоянии около 40 км, а вне этого района изменение оказывается менее  $1,0^{\circ}\text{C}$ . Там же наблюдается и большой контраст солёности. Это и послужило основанием для предположения о существовании фронтальных зон в рассматриваемом районе. Используем только что указанные материалы наблюдений для изучения этого явления.

Следуя К. Н. Федорову [3], для тех районов моря, где еще не определен средний климатический градиент термодинамической характеристики верхнего слоя, фронтальная зона может быть определена с помощью следующего критерия:

$$\Gamma_{ф.з} \geq \Omega \bar{\Gamma}_к,$$

где  $\Gamma_{ф.з}$  — горизонтальный градиент характеристики во фронтальной зоне;  $\bar{\Gamma}_к$  — средний градиент поверхностного слоя;  $\Omega$  — коэффициент превышения градиента во фронтальной зоне над  $\bar{\Gamma}_к$ .

По существу коэффициент  $\Omega$  является количественным показателем критерия, определяющим положения границ фронтальной зоны. Гибкость выбора условия для выделения фронтальной зоны определяется параметром  $\Omega$ . Теоретически он должен быть таким, чтобы фронтальная зона сохранила характер индивидуальной физической структуры, обладающей значимыми пространственно-временными масштабами. Если  $\Omega$  выбран малым, то фронтальная

зона оказывается размытой. Наоборот, если  $\Omega$  слишком большой, то фронтальная зона может превращаться в отдельные очаги высоких градиентов.

Для выделения фронтальной зоны лучше всего стараться найти  $\Gamma_{ф.з}$  в поперечном фронтальном направлении. Поэтому используем модуль градиентов, получаемый из составляющих любой горизонтальной системы координат. Выбор коэффициента  $\Omega$ , в нашем случае, производится следующим образом. Вместо  $\bar{\Gamma}_k$  определяем средний поперечный градиент верхнего слоя по тем же данным, которые используются при исследовании. При этом надо иметь в виду, что конкретный материал вместе с пространственным ограничением района наблюдений может привести к увеличению  $\bar{\Gamma}_k$ , а последнее — затруднить выделение фронтальной зоны. В нашем конкретном случае  $\bar{\Gamma}_k = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ ‰/км}$  при анализе поля солёности. Соответствующие значения  $\Omega$  в диапазоне  $1,5 \div 3,0$  хорошо выделяют фронтальные зоны. Следует отметить, что на южном шельфе наблюдается подобие структурного распределения температуры, солёности и условной плотности. Поэтому положение и характер фронтальной зоны по одному элементу хорошо отражают особенности фронтальной зоны для других элементов, так что не имеет смысла каждый раз для выделения фронтальной зоны использовать все три отдельных элемента. Выбор какого-либо элемента для выделения фронтальной зоны определялся его ролью в формировании фронтальной зоны. Например, для верхнего слоя была выбрана солёность, так как она лучше, чем температура или условная плотность, показывает роль влияния речного стока на формирование поверхностной фронтальной зоны на шельфе. Для нижнего слоя была выбрана плотность.

Кроме стандартной обработки, мы применили еще и следующий простой прием, используя данные вертикального зондирования на разрезах, перпендикулярных береговой линии. Сущность приема заключается в том, что горизонтальный градиент является произведением вертикального градиента на тангенс угла наклона изоповерхности исследуемого элемента. По данным зондирования определялись вертикальные градиенты для глубинных горизонтов с дискретностью 2 м. Угол наклона изоповерхности определялся на карте распределения данной физической характеристики по разрезу. По результатам умножения тангенса этого угла на соответствующий вертикальный градиент строился вертикальный план распределения горизонтального градиента. Затем на основании выбранного численного критерия проводились линии границ фронтальной зоны. Горизонтальное расстояние между границами представляет ширину фронтальной зоны, а линия, соединяющая максимальные значения градиентов является фронтальным разломом. Результаты стандартного и профильного анализа убедительно показывают существование фронтальных зон на южном шельфе. Перейдем к рассмотрению этих результатов.

На рис. 1 представлена карта положения соленостных фронтальных зон верхнего слоя ( $z=2$  м). Тонкими сплошными линиями показаны границы фронтальных зон при  $\Omega=3$ , а пунктирными линиями — при  $\Omega=1,5$ . Жирными линиями показаны положения фронтов, где наблюдаются максимальные градиенты. Положения фронтов уточнены нулевыми значениями лапласианов, рассчитанными по полю солености.

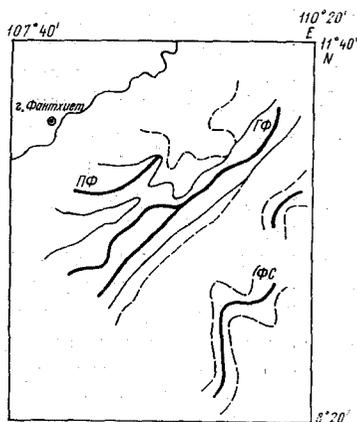


Рис. 1. Фронтальные зоны верхнего слоя.

Максимальный градиент солености на линии фронта ФЗС (ФС) составляет  $9,4 \cdot 10^{-3} \text{‰/км}$ , т. е. почти в три раза больше среднего поперечного значения.

ПФЗ образуется в результате перемешивания двух водных масс, обладающих противоположными физическими свойствами. Одной из них является соленая вода, поднимающаяся из глубины в результате апвеллинга [2] и занимающая более близкое к берегу пространство. Другой является распресненная вода в результате стока реки Меконг. Распресненная вода распространяется на северо-восток в виде узкой струи, вторгающейся в поле соленых вод. Контраст по физическим свойствам этих водных масс заметно обостряет градиенты солености в этой фронтальной зоне. Почти все значения градиентов внутри ПФЗ выше  $15,0 \cdot 10^{-3} \text{‰/км}$ , а максимальное значение достигает  $23,5 \cdot 10^{-3} \text{‰/км}$ . В ПФЗ поперечные градиенты солености отрицательные. Слева ПФ вода обладает свойствами, более близкими к глубоководной, а справа — свойствами, более близкими к пресным водам. Так как в прибрежной зоне шириной 40—50 км, наблюдения не проводились, нельзя определить, где кончается южный конец ПФ. А северный конец его располагается в районе  $10^{\circ} 45'$  с. ш.,  $109^{\circ} 00'$  в. д. в 75 км от берега. Здесь вследствие ослабления потока распресненных вод они уступают место глубинной соленой водной массе.

Причиной образования ГФЗ и ГФ является общий процесс шельфового апвеллинга, который активизируется в отдельных зонах при определенных условиях [1]. При этом в южной половине исследуемого района в процессе образования ГФЗ и ГФ участвует и большой приток распресненных вод, то есть здесь причина формирования ГФЗ та же, что и в случае ПФЗ, только с тем различием, что распресненная водная масса располагается не с правой, а с левой стороны фронта. Всюду в ГФЗ поперечные градиенты оказываются положительными и немного большими по абсолютным значениям в сравнении с градиентами в ПФЗ. (довольно сложные термодинамические процессы на шельфе приводят к осложнению образования ГФ. А именно в южной половине исследуемого района на протяжении больше 100 км ГФЗ содержит в себе два максимума градиентов в поперечном направлении, не уступающие друг другу по численным значениям (рис. 2). Здесь образуется, таким образом, главный фронт с двумя ветвями: левый главный фронт (ЛГФ) и правый главный фронт (ПГФ). Они отстоят друг от друга на расстоянии в среднем 25 км. Ширина ГФЗ здесь равна в среднем 50—55 км. В северной половине ГФЗ значительно сужается до 30—35 км.

В стороне открытого моря на расстоянии около 100 км от границы ГФЗ, т. е. почти над материковым склоном, находятся ФЗС и ФС. Средняя ширина ФЗС 20 км. Очевидно ФЗС и ФС образуются в результате конвергенции вод в этой области шельфа [3].

Общее представление о формировании фронтальных зон южного шельфа в перпендикулярном берегу направлении можно получить из рис. 2. А в табл. 1 представлены их основные численные характеристики.

С глубиной положение фронтальных зон и фронтов в начале изменяется мало. Но на глубине 30 м наблюдаются уже некоторые различия. Во-первых, ПФЗ далеко распространяется на север, до границ исследуемого района, интенсивность ее становится значительней, максимальное значение градиента достигает  $41,0 \cdot 10^{-3} \text{ ‰/км}$ . ГФЗ, наоборот, становится менее интенсивной. Во-вторых, в южной части исследуемого района ПФЗ и ГФЗ объединяются в единую фронтальную зону. Все это происходит за счет ослабления влияния распресненных вод и интенсификации подъема глубинных вод.

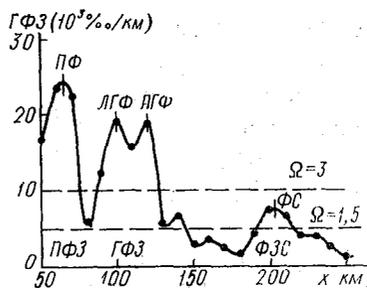


Рис. 2. Поперечный профиль характеристики фронтальных зон верхнего слоя.

Основные характеристики фронтальных зон поверхностного слоя ( $z=2$  м)

Характеристика	ПФЗ	ГФЗ	ФЗС
Средняя ширина (км)	—	40	20
Продольное протяжение (км)	150÷200	>300	>300
Среднее расстояние фронта от берега (км)	30	120	220
Перепад температуры ( $^{\circ}\text{C}$ )	0,74	0,31	0,12
Перепад солености ( $\text{‰}$ )	1,26	0,51	0,24
Перепад плотности (усл. ед.)	1,26	1,04	0,21
Максимальный градиент $T$ ( $10^3$ $^{\circ}\text{C}/\text{км}$ )	15,0	20,0	9,0
Максимальный градиент $S$ ( $10^3$ $\text{‰}/\text{км}$ )	23,5	26,1	9,4
Максимальный градиент $\sigma_t$ ( $10^8$ усл. ед./км)	20,0	20,0	5,0

Еще глубже горизонтальные градиенты связаны только с наклоном положения слоя скачка гидрофизических характеристик т. е. единственной причиной образования фронтальной зоны яв-

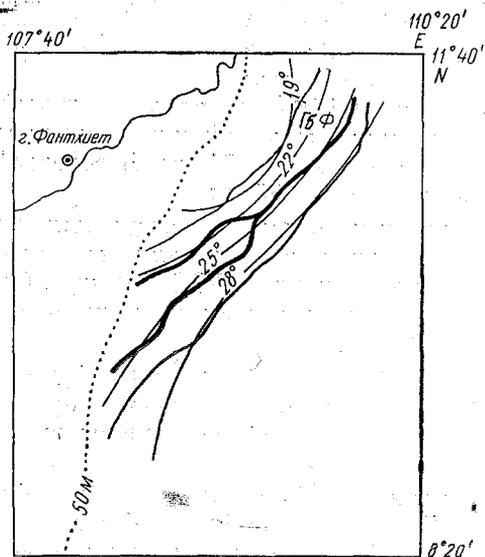


Рис. 3. Глубинная фронтальная зона.

ляется апвеллинг. На рис. 3 представлена карта положения фронтальной зоны на глубине  $z=50$  м. Там же показаны изотермы, проведенные через  $3^{\circ}\text{C}$ . Как уже указывалось, границы зоны определялись для этого слоя по плотности. Фронтальная

она ограничена изолинией градиента  $30 \cdot 10^{-3}$  усл. ед./км, что соответствует значению  $\Omega = 8$ . Как видно из рис. 3, характер и положение фронта и фронтальной зоны очень похожи на те, что мы отмечали у ГФЗ и ГФ, хотя у них уже разная природа образования. В южной половине района также создается двойной фронт. Справа от линии фронта вода относится к более легкой однородной массе верхнего квазигомогенного слоя шельфа, а слева — к более тяжелой массе термохалоклина открытой части моря, двигающейся к берегу по уклону дна при апвеллинге [1].

В табл. 2 представлены основные характеристики фронтальной зоны нижнего слоя или так называемой глубинной фронтальной зоны (ГБФЗ). Сравнивая их с характеристиками ГФЗ верхнего слоя (табл. 1), мы видим, что в нижнем слое фронтальная зона значительно больше обострена. Здесь температура воды значительно увеличивает свою роль в образовании фронтальной зоны, по сравнению с поверхностным слоем.

Таблица 2

Основные характеристики фронтальной зоны нижнего слоя ( $z=50$  м)

Характеристика	ГБФЗ
Средняя ширина (км)	50
Продольное протяжение (км)	> 300
Среднее расстояние фронта от берега (км)	100
Перепад температуры ( $^{\circ}\text{C}$ )	9,0
Перепад солености ( $\text{‰}$ )	1,21
Перепад плотности (усл. ед.)	4,50
Максимальный градиент $T$ ( $10^3$ $^{\circ}\text{C}/\text{км}$ )	3,0
Максимальный градиент $S$ ( $10^3$ $\text{‰}/\text{км}$ )	41,4
Максимальный градиент $\sigma_t$ ( $10^3$ усл. ед./км)	86,2

На рис. 4 показан вертикальный план фронтальных разделов одного разреза, принадлежащего южной половине рассматриваемой области. Обработка выполнена по полю плотности. Пунктирные линии на рисунке являются границами фронтальных зон, соответствующими значению выше указанного критерия  $\Omega$  ( $\Delta \delta_i / \Delta x = 30 \cdot 10^{-3}$  усл. ед./км). Рисунок подчеркивает сложнейшую картину фронтообразования на шельфе. В пределах небольшого пространства существуют практически пять фронтальных разделов. В верхнем слое — три: прибрежный фронтальный раздел (ПФР), главный фронтальный раздел (ГФР) и фронтальный раздел на склоне шельфа (ФРС). Эти фронтальные разделы мало откло-

няются от вертикального положения, что подчеркивает агеострофическую природу их формирования. В глубину ПФР распространяется до 25 м, где он объединяется с глубинными фронтальными разделами. Глубины проникновения ГФР и ФРС равны 35 и 50 м соответственно.

В нижнем слое положение и наклон фронтальных разделов в основном согласуются с положением и наклоном слоя скачка.

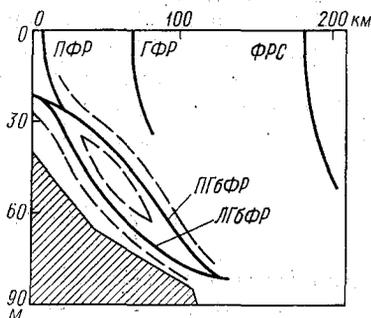


Рис. 4. Вертикальный план фронтальных разделов.

Однако, принципиально, они не должны быть идентичными по физическим характеристикам. На вертикальном плане видно, что в слое от 35 до 60 м глубинная фронтальная зона (ГБФЗ) разделена на две: левая и правая. Соответственно этому во всем пространстве нижнего слоя от 2 до 80 м образуются два раздела: левый глубинный фронтальный раздел (ЛГБФР) и правый глубинный фронтальный раздел (ПГБФР). Средний наклон этих разделов равен  $0,55 \cdot 10^{-3}$ , то есть немного больше среднего наклона рельефа дна шельфа.

В северной половине исследуемой области двойной глубинный фронтальный раздел превращается в единственный.

В итоге можем сделать следующие выводы.

1. В период устойчивого юго-западного муссона на южном шельфе Вьетнама формируется ряд фронтальных зон. В поверхностном слое образуются: прибрежная фронтальная зона, главная фронтальная зона, фронтальная зона материкового склона; а в нижнем слое — глубинная фронтальная зона.

2. Структура фронтальных зон на шельфе оказывается сложной. Различаются фронтальные зоны верхнего слоя и глубинные фронтальные зоны. Соответствующие фронты и фронтальные разделы в южной части рассматриваемого района могут быть двойными. Основное направление протяжения фронтальных зон — вдоль береговое.

3. Наклон фронтальных разделов верхнего слоя мало отличается от вертикального положения, а наклон глубинных фронтальных разделов следует наклону рельефа дна. Все это говорит об агеострофической природе формирования фронтальных зон на южном шельфе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ле Фьок Чинь. Некоторые вопросы о структуре вод южного континентального шельфа. — Журн. Наука и развитие, № 6, г. Хо Ши Мин, 198, с. 15—19 (на вьетнамском языке).

2. Ле Фыок Чинь и др. Постановка задачи исследования апвеллинга на южном континентальном шельфе. — В сб.: Морские исследования, т. 11, ч. 2, г. Нячанг, 1981, с. 13—31 (на вьетнамском языке).

3. Федоров К. Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. — Л.: Гидрометеиздат, 1983. — 296 с.

УДК 532.543 : 627.141

В. В. КОВАЛЕНКО

## СТОХАСТИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РЕЖИМА ВОДОПРОПУСКНЫХ СООРУЖЕНИЙ

В повышении эффективности работы железнодорожного транспорта важную роль играет инженерное обеспечение пути и, в частности, водопропускных сооружений (мостов и труб). Опыт показывает [1, 2], что применение стандартной методики гидравлических расчетов для малых мостовых переходов [1] не всегда обеспечивает требуемую полноту и физическую обоснованность получаемых результатов.

Гидравлические расчеты сводятся в основном к нахождению глубины  $h$  перед сооружением, с учетом аккумуляции воды, например, по уравнению [2]:

$$\frac{3 \cdot 10^8 k_0}{i_{\text{л}} i_c} h^2 \frac{dh}{dt} = - \sum_{i=1}^N a_i h^{(i)} + \varphi(t), \quad (1)$$

где  $\sum_{i=1}^N a_i h^{(i)}$  — полином, аппроксимирующий кривую пропускной способности сооружения;  $k_0$  — коэффициент, зависящий от морфометрии лога;  $i_{\text{л}}$ ,  $i_c$  — уклоны лога и склонов перед сооружением в ‰;  $\varphi(t)$  — расход  $Q$ , формирующийся на водосборе;  $t$  — время. В некоторых частных случаях, например при аппроксимации пропускной способности выражением  $Q = ah^3$ , уравнение (1) приводится к линейному виду

$$\frac{du}{dt} = -3tau + 3m\varphi(t) \quad (2)$$

(здесь  $m = 10^{-3} i_{\text{л}} i_c / 3 k_0$ ,  $u = h^3$ ).

Численные расчеты по уравнению (1) показали, что учет динамики процесса приводит к уменьшению (по сравнению со стандартной методикой) значений максимальных глубин иногда на несколько десятков процентов, а поэтому — и к снижению затрат на реконструкцию сооружений.

В случае рассмотрения системы взаимодействующих сооружений, имеем:

$$m_i^{-1} h_i^2 \frac{dh_i}{dt} = - \sum_{j=1}^N a_{ij} h_i^{(j)} + f(h_i - h_{i-1}) \text{sign}(h_i - h_{i-1}) + f(h_{i+1} - h_i) \text{sign}(h_{i+1} - h_i) + \varphi_i(t), \quad (3)$$

где  $f$  — функция, характеризующая пропускную способность профиля водораздела между соседними сооружениями (определяется морфометрически);  $\text{sign}(h_i - h_{i-1})$  — знаковая функция;  $i = \overline{1, k}$  ( $k$  — общее число взаимодействующих сооружений).

Возможны различные варианты применения системы (3). Первый («оптимистичный») заключается в том, что приток  $\varphi_i(t)$  учитывается только для одного сооружения. Результаты расчетов для этого случая приведены в таблице. Из нее видно, что в большинстве случаев категория сооружений улучшается.

**Результаты расчетов глубин и расходов в сооружениях с учетом и без учета перелива на участках Восточно-Сибирской железной дороги**

Относительные отклонения величин, рассчитанные без учета и с учетом перелива		Категория сооружения	
для глубин	для расходов	без учета перелива	с учетом перелива
1,26	0,68	3	2а
4,02	1,89	3	2б
4,78	5,20	3	1
0,79	0,58	3	3
2,76	3,00	3	1
5,26	3,42	3	1
16,60	7,45	3	1
14,07	2,16	3	2б
1,39	0,81	3	3
5,40	3,22	3	1
8,67	5,17	3	3
1,29	0,96	3	3
5,40	3,89	3	3
6,04	1,37	3	1
29,27	15,6	3	1
1,64	0,56	3	1

Второй («реальный») подход заключается в том, что учитываются все притоки  $\varphi_i(t)$  одновременно или с определенной временной сдвижкой. На рис. 1 приведен характерный пример результата численного расчета методом Эйлера гидравлического взаимодействия системы из трех рядом расположенных сооружений на

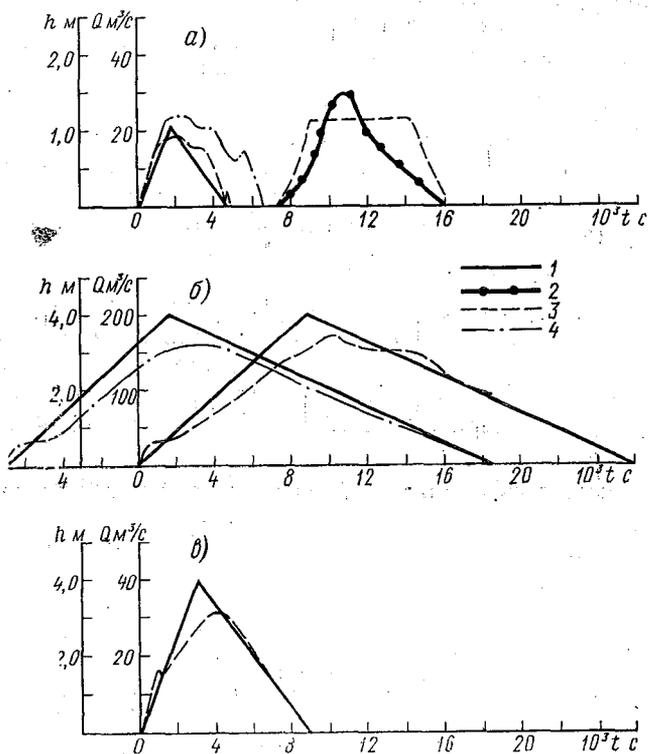


Рис. 1. Результат численного расчета гидравлического взаимодействия трех (а, б, в) водопропускных сооружений:

1 — гидрограф притока воды к сооружениям, схематизированный по треугольнику; 2 — расход, поступающий в аккумулирующую призму первого (а) сооружения за счет перелива; 3 — глубина при отсутствии временного сдвига притока воды к сооружениям; 4 — глубина при наличии временного сдвига.

участке Восточно-Сибирской железной дороги. Из этого рисунка видно, что третье сооружение никак гидравлически не взаимодействует с «соседями», а первое сооружение, справляясь со своим собственным притоком, стало «переливать» через насыпь вследствие притока воды из аккумулирующей призмы второго сооружения в случае, если задать определенную временную сдвижку между притоками воды с водосборных бассейнов.

Из изложенного понятно, что переход к динамическому описанию взаимодействующих сооружений дает более обоснованную физическую картину работы сооружений, но тем не менее остается открытым ряд важных вопросов.

Во-первых, в динамическом режиме кривая пропускной способности  $Q=f(h)$  перестает быть однозначной, так как расход в сооружении (на водосливе) зависит не только от глубины, но и от ее производных по времени и координате, т. е.  $Q=f(h, \partial h/\partial t, \partial h/\partial x, \dots)$ . Корни подобной неоднозначности уходят в проблему гидравлических сопротивлений при нестационарном режиме, которая пока окончательно не решена. Имеющиеся результаты [2] указывают на зависимость сопротивлений и от случайных факторов (например, стохастичности воздействия  $\varphi_i(t)$ ). Приближенная оценка различий в значениях глубин, подсчитанных с учетом и без учета влияния нестационарности на положение кривой  $Q=f(h)$ , показывает, что они могут иногда достигать 50% [2]. Следовательно, имеем не однозначную кривую  $Q=f(h)$ , а полосу  $Q=f(h+\Delta h)$ , оценить ширину которой можно только в статистическом смысле, например, задавая интервалы неопределенности  $\pm \Delta a_j$  для коэффициентов  $a_j$ , т. е. введя в уравнение (1) случайные параметры.

Во вторых, коэффициент  $m=10^{-3} i_{\text{л}} i_c / 3 k_0$  также может быть задан лишь в статистическом смысле, так как значения входящих в него параметров определяют весьма приближенно по топографическим картам.

В-третьих, расчет должен вестись не на детерминированное входное воздействие  $\varphi(t)$  с максимальным расходом заданной обеспеченности, а на случайный процесс. Как показывают вычисления по системе (3), в зависимости от значений сдвижек гидрографов, расходы, даже меньшие, чем расход, например 1%-ной обеспеченности, могут вызвать нарушения в работе сооружений.

Таким образом, уравнение (1), а тем более система (3), «пропитаны» статистическим духом. Переход к стохастическому описанию в случае непрерывного марковского процесса заключается в составлении дифференциального уравнения для плотности вероятности глубины  $p(h, t)$  — уравнения Фоккера — Планка — Колмогорова (ФПК)

$$\frac{\partial p}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial h} A(h, t) p(h) + 0,5 \frac{\partial^2 B(h, t) p(h)}{\partial h^2},$$

где  $A, B$  — коэффициенты сноса и диффузии соответственно.

Для уравнения (2), с параметрическим шумом  $V$  при нулевом среднем и интенсивности  $G_V$ , коэффициенты  $A$  и  $B$  выразятся формулами:

$$A = - (3 m a - 0,5 G_V) u + 3 m \varphi, \quad B = G_V u^2,$$

здесь под  $\varphi$  для простоты будем понимать «реализацию» случайного воздействия в виде схематизированного гидрографа с максимальным расходом требуемой обеспеченности).

При таком подходе уравнения для моментов (математического жидания  $\langle u \rangle$  и дисперсии  $D$ ) примут вид

$$\langle \dot{u} \rangle = - (3 m a - 0,5 G_v) \langle u \rangle + 3 m \varphi,$$

$$\dot{D} = - 2 (3 m a - G_v) D + G_v \langle u \rangle^2.$$

Ограничиваясь даже только первыми двумя моментами статистического решения, можно оценить влияние шумов на интервал

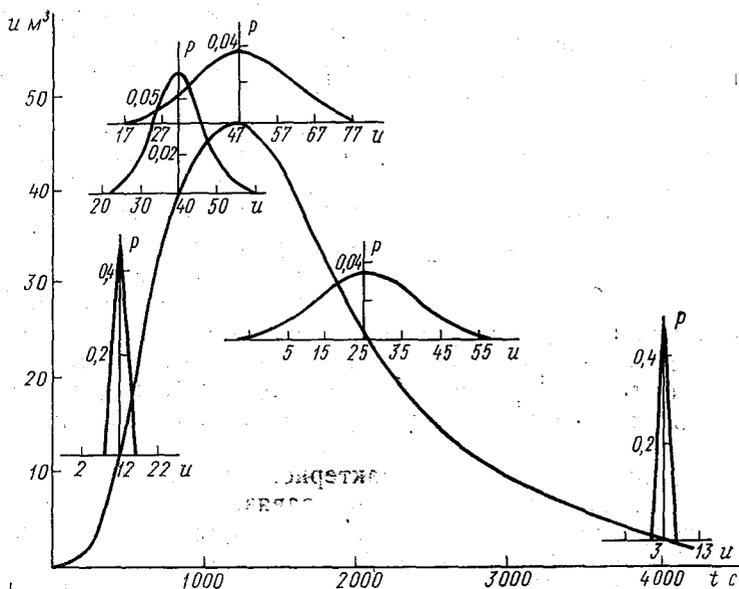


Рис. 2. Эволюция плотности вероятности глубины ( $u=h^3$ ) в сооружении для нормального приближения.

неопределенности для кривой  $h=f(t)$ , введя, например, энтропийное значение погрешности  $\Delta h$  по формуле  $\Delta h = k \sqrt{D}$ , где  $k$  — энтропийный коэффициент, значения которого изменяются в зависимости от закона распределения  $p(h, t)$  (например, для нормального:  $k=2,066$  [2]).

На рис. 2 приведен пример расчета эволюции плотности вероятности для нормального приближения. Из него видно, что при

стохастическом оценивании гидравлического режима можно указать доверительный интервал, в котором значения глубин будут опасными по существующим критериям надежности сооружений.

Для общего случая в качестве входного воздействия должно выступать не детерминированный (схематизированный) гидрограф с максимальным значением расхода заданной обеспеченности а случайный процесс (точнее — случайное поле), оказывающий влияние одновременно на несколько сооружений. Так как ливни вызывающие экстремальные расходы, имеют площадь орошения порядка  $10 \text{ км}^2$  [3], а средняя площадь водосборов малых водопропускных сооружений составляет, например  $(4,08 \pm 1,21) \text{ км}^2$  (с доверительной вероятностью  $P_{\text{дов}}=0,99$ ) для Восточно-Сибирской железной дороги;  $(1,30 \pm 0,45) \text{ км}^2$  ( $P_{\text{дов}}=0,99$ ) для Забайкальской железной дороги;  $(2,75 \pm 0,93) \text{ км}^2$  ( $P_{\text{дов}}=0,99$ ) для Свердловской железной дороги, то наиболее вероятно одновременное воздействие поля осадков на 2—3 водосборных бассейна. Вследствие того, что ливни, как правило, бывают фронтального происхождения, то важное значение приобретает угол между перемещением ливневого фронта и направлением железнодорожной или автомобильной магистрали, так как в случае их совпадения в работу будут включаться последовательно соседние сооружения. Особенно опасная ситуация может возникнуть для сооружений, находящихся в местах резкого изменения уклона пути.

Разумеется, подобный стохастический подход может быть распространен на русловые и фильтрационные расчеты. Критерии надежности водопропускных сооружений в этом случае должны включать как конструктивные параметры (размеры отверстия и насыпи, характеристика укреплений дна и др.), так и региональные особенности рассматриваемого участка дороги (направление полотна дороги, наиболее вероятное перемещение ливневых фронтов, связанное с характерной синоптической ситуацией в данном регионе и др.) и быть «завязаны» в стохастически функционал, имеющий временной тренд, например из-за повышения устойчивости насыпи к фильтрации с течением времени или из-за одностороннего антропогенного воздействия на рассматриваемый участок дороги.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по классификации переходов через малые водотоки по водопропускной способности. — М.: ЦНИИС Минтрансстрой, 1975. — 160 с.
2. Коваленко В. В. Измерение и расчет характеристик неустановившихся речных потоков. — Л.: Гидрометеиздат, 1984. — 160 с.
3. Горюшков И. Ф. Гидрологические расчеты. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 432 с.

## ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЧНЫХ РУСЕЛ И КАНАЛОВ СЛОЖНЫХ ФОРМ СЕЧЕНИЯ

Проблема гидравлических сопротивлений является одной из основных при расчетах пропускной способности как естественных, так и искусственных русел. Наиболее сложен и наименее изучен вопрос сопротивлений русел составных форм сечений, к которым относятся русла с поймами, большие земляные судоходные каналы и другие сложные русла.

В настоящее время в качестве характеристик гидравлических сопротивлений применяются коэффициенты: сопротивления ( $\lambda$ ), шероховатости ( $n$ ), Шези ( $C$ ) или уклоны водной поверхности ( $I$ ). Все эти параметры взаимосвязаны, поэтому от величины одного из них можно с помощью простейших формул перейти к значениям других.

Для условий одномерной идеализации общее сопротивление бесприточных, беспойменных участков рек принято описывать уравнением Сен-Венана

$$I = \frac{V^2}{C^2 h} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha V^2}{2g} \right) + \frac{1}{g} \frac{\partial (\alpha' V)}{\partial t}. \quad (1)$$

Правая часть этого уравнения представляет собой сумму частных уклонов, составляющих уклон водной поверхности: трения  $I_T = \frac{V^2}{C^2 h}$ , то есть уклон, учитывающий путевые сопротивления при равномерном движении потока;  $I_H = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha V^2}{2g} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha Q^2}{2g F^2} \right) \approx \frac{\alpha Q^2}{2gL} \left( \frac{1}{F_H^2} - \frac{1}{F_B^2} \right)$  — дополнительный уклон, возникающий при неравномерном движении, и  $I_{CT} = \frac{1}{g} \frac{\partial (\alpha' V)}{\partial t}$  — уклон при неустановившемся движении. Таким образом, уравнение (1) можно представить в виде

$$I = I_T + I_H + I_{CT}. \quad (2)$$

При переходе к руслам сложных форм сечения необходимо рассматривать уже уравнение движения потока с переменной массой в виде

$$I = \frac{V^2}{C^2 h} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha V^2}{2g} \right) + \frac{1}{g} \frac{\partial (\alpha' V)}{\partial t} + \frac{(q_{вс} + q_p + q_c) V}{gF}. \quad (3)$$

Уравнение (3) отличается от уравнения (1) только дополнительным членом в его правой части, учитывающим массообмен ( $q_{вз}$ ) между его русловой и пойменной или другими составляющими потоков, пойменное регулирование ( $q_p$ ) и боковой (склоновый) приток ( $q_c$ ). Перепишем его в следующем виде:

$$\frac{q_{вз} V}{gF} + \frac{q_p V}{gF} + \frac{q_c V}{gF} = I_{вз} + I_p + I_c. \quad (4)$$

Тогда, с учетом (2) и (4), уравнение (3) можно записать:

$$I = \sum_{i=1}^m I_i = I_T + I_H + I_{ст.} + I_{вз} + I_p + I_c. \quad (5)$$

В (1—5) приняты следующие обозначения:  $V$  — средняя скорость потока;  $Q$  — расход воды;  $h$  — средняя глубина потока;  $L$  — расстояние между верхним (в) и нижним (н) створами;  $q$  — расход воды на единицу длины потока;  $\alpha$  и  $\alpha'$  — коэффициенты Корiolisa и Буссинеска. Остальные обозначения общепринятые.

Как показывает анализ натуральных данных [1, 8 и др.], наибольшее значение имеют потери на трение ( $I_T$ ), которые являются сложной интегральной величиной, зависящей от ряда слагающих факторов, и могут быть представлены в виде:

$$I_T = I_{ш} + I_{г} + I_{ф} + I_{д}. \quad (6)$$

Аналогично (6) можно записать:

$$\lambda_T = \lambda_{ш} + \lambda_{г} + \lambda_{ф} + \lambda_{д}, \quad (7)$$

$$n_T = n_{ш} + n_{г} + n_{ф} + n_{д}, \quad (8)$$

где индексы обозначают: «ш» — сопротивления выступов зернистой шероховатости; «г» — донных гряд; «ф» — формы сечения «д» — дополнительные сопротивления.

Тогда, с учетом (6), уравнение (5) можно представить в виде

$$I = I_{ш} + I_{г} + I_{ф} + I_{д} + I_{ст.} + I_{вз} + I_p + I_c \quad (9)$$

или

$$\lambda = \lambda_{ш} + \lambda_{г} + \lambda_{ф} + \lambda_{д} + \lambda_{ст.} + \lambda_{вз} + \lambda_p + \lambda_c, \quad (10)$$

$$n = n_{ш} + n_{г} + n_{ф} + n_{д} + n_{ст.} + n_{вз} + n_p + n_c. \quad (11)$$

Наиболее часто в расчетах сопротивлений естественных русел используют коэффициенты шероховатости, а для искусственных русел — коэффициенты сопротивления.

Для расчетов каждой составляющей правой части уравнений (9), (10) или (11) предложены формулы или выполнена оценка их доли в общем сопротивлении. Однако попытка суммировать их значения может привести к большим погрешностям расчетов так как точность вычисления каждой составляющей недостаточна

ысокая. Поэтому для расчетов пропускной способности русел рек и каналов, как правило, принимают какой-либо один ( $n$  или  $\lambda$ ) параметр (интегрально учитывающий все виды сопротивлений), который определяют по соответствующим таблицам и описательной характеристике сопротивлений (грунтов, растительности и др.) по расчетному створу [5, 11].

Как известно [3 и др.], таблицы Срибного, Чоу и Бредли, являющиеся наиболее полными, составлены на ограниченной по объему исходной натурной информации, да и их детализация недостаточна. Например, таблица Срибного предусматривает всего девять различных позиций для определения коэффициента шероховатости. Причем для речных пойм со всем их многообразием таких позиций всего лишь шесть, в соответствии с которыми рекомендуемый коэффициент шероховатости изменяется от 0,050 до 0,200. Для русел рек таких позиций восемь, а значения коэффициентов шероховатости изменяются в пределах от 0,025 до 0,133. К тому же количественные характеристики расчетного створа отсутствуют, а качественные — допускают существенный субъективизм. Это приводит к большим погрешностям расчетов. Для примера можно привести величины максимального расхода воды обеспеченностью 0,33% на одном из створов р. Селемджи, полученные специалистами различных организаций и соответственно равные 19 800 м<sup>3</sup>/с и 10 100 м<sup>3</sup>/с. Они различаются примерно в 2 раза, хотя для расчетов была использована одна и та же исходная информация.

Далее расчет коэффициентов шероховатости русел и пойм по натурным данным осуществляется на основе формулы Шези, т. е. допускается, что движение руслопойменного потока является равномерным. Как вытекает из формулы (3), тем самым недоучитываются, а точнее приравняются нулю члены правой части уравнения (3), кроме первого.

Однако анализ и оценка этих членов уравнения показали, что в расчетах можно пренебрегать только членом уравнения  $\frac{1}{g} \frac{\partial(\alpha'V)}{\partial t}$ ,

в явном виде учитывающим влияние неустановившегося движения, так как его величина на равнинных реках, протекающих в естественном состоянии, не превышает 5% от уклона водной поверхности. Остальные члены уравнения могут составлять значительную величину, близкую к значению уклона трения [3, 8].

Безусловно, в табличных значениях коэффициентов шероховатости русла и поймы автоматически учитываются некоторые из этих факторов, так как их величины определяются обратным расчетом по формуле Шези и измеренным значениям скоростей потоков и уклонов водной поверхности. В то же время наименьшие и наибольшие значения коэффициентов шероховатости русел и пойм значительно отличаются от приведенных в указанных таблицах.

Так, на ряде рек Советского Союза наименьшие значения коэффициентов шероховатости русел составляют 0,014—0,018 (рр. Горынь, Словечна, Сев. Донец, Иртыш и др.) и 0,014—0,020 — для поймы (рр. Горынь, Ольшанка, Сев. Донец, Перехода и др.) Как видно из этого неполного перечня, в него входят как малые так и средние реки. Причем все эти реки относятся ко второму типу взаимодействия руслового и пойменного потоков [3], при котором ниже расчетного створа наблюдается поступление массы руслового потока на поймы. При этом скорости пойменного потока под воздействием руслового существенно увеличиваются, что при расчете коэффициентов шероховатости по формуле Шези — Пав

ловского  $n = \frac{h^{0,5+y} V^{0,5}}{V}$  приводит к получению их заниженных значений.

Можно привести противоположные примеры, когда значения коэффициентов шероховатости русел и пойм значительно превышают табличные. Так, на реках третьего и особенно пятого типа взаимодействия потоков коэффициенты шероховатости русел достигают значений 0,11—0,20 (рр. Ветлуга, Черная — Сагры, Аган Нестеровка, Казачка и др.), и пойм 0,20—0,31 (Ока — Половское Ветлуга, Ватинский Еган, Аган, Татакан и др.). Такие большие значения коэффициентов шероховатости наблюдаются на широких поймах, особенно при малых глубинах их затопления.

Следовательно, можно сделать вывод о недостаточности критериев оценки шероховатости русел и пойм и недостаточном их соответствии многообразным натурным объектам. Поэтому необходимы новые пути решения этой узловых задачи речной гидравлики.

Таким путем, по нашему мнению, является совершенствование теории сопротивлений и на ее основе разработка принципиально новых расчетных методов, охватывающих не только качественную описательную часть, которую, кстати, также надо совершенствовать, но и разработка количественных критериев оценки сопротивлений речных русел и пойм. Основным вопросом является переход от плоской, одномерной к сложной пространственной задаче

Рассмотрим, какие же новые методы расчета сопротивлений русел и пойм имеются в настоящее время.

Одной из первых [7] является попытка использовать для расчетов коэффициентов шероховатости уравнение неравномерного движения

$$n = \frac{2Fh^{\frac{2}{3}} \left\{ \frac{1}{L} \left[ \Delta h - \frac{Q^2}{2g} \left( \frac{\alpha_H}{F_H^2} - \frac{\alpha_B}{F_B^2} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}}}{Q_2 + Q_1}, \quad (12)$$

второе после ряда допущений может быть преобразовано в

$$n = \frac{h^{\frac{2}{3}} \left[ I - \frac{\bar{\alpha} \bar{Q}^2}{2gL} \left( \frac{1}{F_n^2} - \frac{1}{F_b^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}}{V}, \quad (13)$$

где  $\bar{\alpha}$  и  $\bar{Q}$  — осредненные для расчетного участка коэффициент Корзиолиса и расход воды.

Однако даже этот метод неполностью отражает физическую сущность процесса, требует измерений параметров потока и русла двух смежных створах и осредненных для расчетного участка длиной  $L$ .

Дальнейшим совершенствованием методики расчета является разработанная в ЛГМИ математическая модель потока в русле поймы. Движение такого потока в русле с односторонней поймой может быть описано системой уравнений неразрывности и движения потока с переменной массой:

$$I_p = \frac{V_p^2}{C_p^2 h_p} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha_p V_p^2}{2g} \right) + \frac{(q_{c1} + q_{в3}) V_p}{g F_p} + \frac{\alpha'_p}{g} \frac{\partial V_p}{\partial t}, \quad (14)$$

$$I_{п} = \frac{V_{п}^2}{C_{п}^2 h_{п}} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha_{п} V_{п}^2}{2g} \right) + \frac{(q_{c2} + q_{в3}) V_{п}}{g F_{п}} + \frac{\alpha'_{п}}{g} \frac{\partial V_{п}}{\partial t}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial (Q_p + Q_{п})}{\partial x} + \frac{\partial (F_p + F_{п})}{\partial t} = q_{c1} + q_{c2}. \quad (16)$$

Решение этой системы уравнений позволяет получить зависимость коэффициентов шероховатости от определяющих факторов:

$$n_p = \frac{n_{p0}}{\sqrt{1 - \frac{\sum \epsilon_{pl}}{I_p}}}; \quad n_{п} = \frac{n_{п0}}{\sqrt{1 - \frac{\sum \epsilon_{пl}}{I_{п}}}}, \quad (17)$$

где  $n$  и  $n_0$  — коэффициенты шероховатости, получаемые соответственно по формулам (17) и уравнению Шези;

$$\epsilon_1 = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha V^2}{2g} \right), \quad \epsilon_2 = \frac{(q_{c1} + q_{в3}) V}{g F}, \quad \epsilon_3 = \frac{\alpha'}{g} \frac{\partial V}{\partial t}.$$

Как указывалось [1, 8], в практических расчетах величиной  $\epsilon_3$  можно пренебречь.

Для расчета пропускной способности пойменных русел с помощью уравнений (14) — (17) необходима информация, которая в настоящее время отсутствует (расход массообмена, уклоны водной поверхности потока поймы и др.). Более того, даже методика измерения ряда таких параметров отсутствует (уклоны водной поверхности и др.).

Поэтому в настоящее время более целесообразным является получение полуэмпирических расчетных зависимостей на основе обобщения натурной информации.

Так, в ЛГМИ на основе теоретических проработок и анализ обширных экспериментальных (лабораторных и особенно натуральных) данных были получены графические зависимости вида  $\frac{n_p}{n_{p.б}} = f\left(\frac{h_p}{h_{p.б}}, \alpha\right)$  [2]. В этих зависимостях, в качестве основного расчетного параметра, принят угол  $\alpha$  между геометрическими осями русла и поймы, учитывающий характер взаимодействия потоков в них. Эти зависимости, по мере увеличения объема

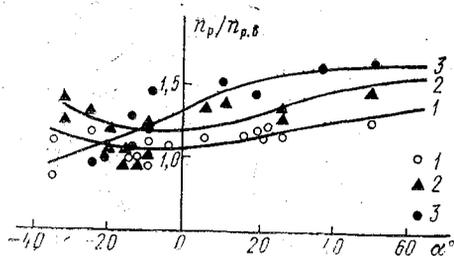


Рис. 1. Зависимость  $\frac{n_p}{n_{p.б}} = f\left(\frac{h_p}{h_{p.б}}, \alpha\right)$ :

$$1 - \frac{h_p}{h_{p.б}} = 1,10; \quad 2 - \frac{h_p}{h_{p.б}} = 1,25;$$

$$3 - \frac{h_p}{h_{p.б}} = 1,50.$$

информации, несколько раз уточнялись [4, 6 и др.] и в последнем варианте представлены на рис. 1. Данная методика применима только для расчета сопротивлений русел при условии взаимодействия потоков в них с пойменными.

В то же время в методике не учтен ряд факторов, таких как относительная ширина поймы и ряд других, но учитывается ряд особенностей движения паводочной волны.

Несколько хуже обстоит вопрос разработки методики расчета сопротивлений пойм. Это, в первую очередь, обусловлено сложностью их морфологического строения, низким качеством исходной информации и рядом других факторов, в частности переменным воздействием растительности.

Оригинальная, хотя и несовершенная, попытка оценки сопротивления поймы предпринята Ю. Н. Соколовым [9, 10 и др.] который выделил две основных составляющих сопротивления: рельеф и растительность.

Однако критерии для оценки этих составляющих не учитывают ряда существенных особенностей как рельефа, так и дина-

тики заполнения и опорожнения пойменного массива. Изменения величины и направления скоростей пойменных течений при увеличении уровня воды происходит весьма сложно.

На пойме возможно появление значительных аккумулярующих емкостей, различных продольных и поперечных течений, направления которых изменяется в различные фазы затопления поймы. Кроме того, существенное воздействие на пойменный поток оказывает русловой, что, как правило, приводит к увеличению скорости его течения.

В ЛГМИ была предпринята попытка получения поправок к табличным значениям коэффициентов шероховатости пойм в зависимости от определяющих факторов. Анализ графической зависимости  $\Delta n_{пт} = f(\alpha, H)$  показывает, что при увеличении абсолютной величины угла  $\alpha$  наблюдается и увеличение отклонения расчетных значений коэффициентов шероховатости ( $n_{пр}$ ) от табличных  $n_{пт}$  [6]. Ряд особенностей режима сопротивлений движению пойменного потока вытекает из анализа графика связи

$$\Delta n_{пт} = \frac{n_{пр} - n_{пт}}{n_{пт}} = f\left(\frac{B_{п}}{B_{р}}, \alpha\right).$$

Так, при относительных ширинах поймы  $\frac{B_{п}}{B_{р}} < 3$  определяющее влияние на  $n_{пт}$  оказывает угол  $\alpha$  (угол, под которым пересекаются оси руслового и пойменного потоков).

В диапазоне значений  $\frac{B_{п}}{B_{р}} = 3 \div 6$  отмечается совместное влияние

на скорости пойменного потока и коэффициенты шероховатости поймы, ее относительной ширины и угла  $\alpha$ . При значениях же

$\frac{B_{п}}{B_{р}} > 6$  влияние угла  $\alpha$  на режим сопротивлений практически не

ощущается и наблюдается достаточно тесная линейная зависи-

мость  $\Delta n_{пт} = f\left(\frac{B_{п}}{B_{р}}\right)$ . В качестве примера на рис. 2 приведена

зависимость  $\Delta n_{пт} = f\left(\frac{B_{п}}{B_{р}}, \alpha\right)$ , полученная на основе натуральных дан-

ных и таблиц Дж. Бредли.

Однако отклонение исходных данных от расчетной кривой значительное, что свидетельствует о необходимости ее уточнения на основе привлечения дополнительной информации, учитывающей все многообразие режима сопротивлений движению пойменного потока.

Таким образом, выполненный анализ этой сложной и многообразной проблемы свидетельствует о том, что уже назрела необходимость перехода при расчете сопротивлений движению потоков в руслах с поймами от методов, основанных на формулах

равномерного движения, к более совершенным, основанным на уравнении движения потоков с переменной массой и обширной натурной информации. Уже в настоящее время можно рекомен-

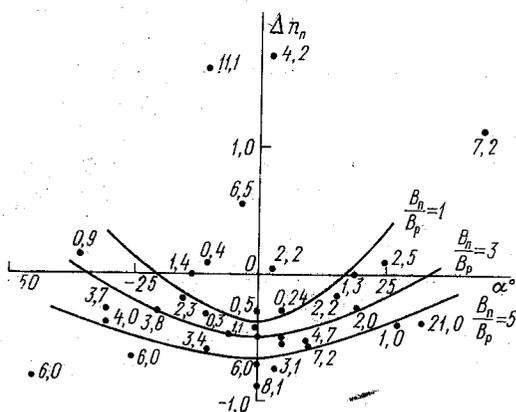


Рис. 2. Зависимость  $\Delta n_p = f\left(\alpha, \frac{B_p}{B_p}\right)$ .

довать для расчетов сопротивлений русел графические зависимости  $\frac{n_p}{n_{p.6}} = f\left(\frac{h_p}{h_{p.6}}, \alpha\right)$ . Для расчетов же коэффициентов шероховатости пойм необходимы дополнительные теоретические проработки и обширные натурные исследования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Барышников Н. Б. Речные поймы. — Л.: Гидрометеоздат, 1978. — 152 с.
2. Барышников Н. Б. Коэффициенты шероховатости русел и пойм. — Метеорология и гидрология, 1982, № 8, с. 83—90.
3. Барышников Н. Б. Морфология, гидрология и гидравлика пойм. — Л.: Гидрометеоздат, 1984. — 280 с.
4. Барышников Н. Б., Субботина Е. С. Сопротивление движения потоков в руслах сложных форм сечения. — В кн: Гидрофизические процессы в реках и водохранилищах. М., Наука, 1985, с. 46—49.
5. Бегам Л. Г. и др. Переходы через водотоки. — М.: Транспорт, 1973. — 455 с.
6. Исаев Д. И. Расчет коэффициентов шероховатости пойм. — Межвузовский сборник: Гидрологические прогнозы и расчеты. Л., изд. ЛПИ, 1982, вып. 79, с. 115—117. (ЛГМИ).
7. Расчеты паводочного стока. Методы расчетов на основе мирового опыта. Под ред. А. А. Соколова, С. Е. Ранца, М. Рома. — Л.: Гидрометеоздат, 1978. — 304 с.
8. Скородумов Д. Е. Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами построения и экстраполяции кривых расходов воды. — Тр. ГГИ 1965, вып. 128, с. 3—96.

9. Соколов Ю. Н. Гидравлическое сопротивление пойм. — Водные ресурсы, 1980, № 6, с. 143—154.

10. Соколов Ю. Н. Уравнения наклона гибкой растительности в связи с расчетом гидравлического сопротивления на поймах. — В кн.: Динамика и эрозия рек и водохранилищ. М., Наука, 1984, с. 72—86.

11. Чоу В. Т. Гидравлика открытых каналов. — М.: Стройиздат, 1969. — 64 с.

ДК 628.54

*С. А. ЧЕЧКИН, Г. И. КЛИМОВ, К. К. ХАЗАНОВИЧ, Н. А. БРОДСКАЯ*

## **РЕЖИМ УРОВНЕЙ И СОСТАВ ГРУНТОВЫХ ВОД В ЗОНЕ ПРЕДПРИЯТИЙ СЛОЖНЫХ ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЙ**

В ЛГМИ более 10 лет ведутся исследования изменений геологической среды, в том числе и гидрогеологической обстановки, в зоне различных промышленных предприятий. Первые результаты этих работ [1, 3, 4, 8—11] позволили сформулировать основные направления антропогенного влияния на природные воды и особенно на воды первого водоносного горизонта. Были определены главные факторы антропогенных изменений грунтовых вод в зоне предприятий химической, металлургической, нефтяной, рудодобывающей и некоторых других отраслей промышленности. Этих же работах был сделан вывод о том, что подземные воды, том числе и грунтовые, не являются настолько изолированными от техногенных воздействий, чтобы не ставить вопрос об их охране от истощения и изменений химического состава. За указанные годы в СССР и за рубежом доля подземных вод в общем водопотреблении неуклонно возрастала и в среднем достигла 70—75% [12].

В этих условиях широкое внедрение малоотходных и безотходных технологических процессов, определенное решениями XVII съезда КПСС, является наиболее эффективной мерой по охране подземных вод и снижения вредного воздействия на окружающую, в том числе, и гидрогеологическую среду в целом. Однако пока такие процессы нередко находятся в стадии внедрения или даже разработки. Поэтому проблема охраны подземных вод, пока что должна решаться на основе определения приоритетности мер по защите этих вод от истощения и изменения их природного (фонового) состава.

Очередность природоохранных мероприятий должна определяться на основе анализа влияния техногенных факторов на подземные воды и, в первую очередь, на воды первого водоносного горизонта. При этом нельзя исходить из термина «неприкосновенности» этих вод, как и недопустимы попытки полной их изоляции едином круговороте воды в природе.

Исходя из прежних наших выводов [8—11] и указанных выше предпосылок, возникла задача в определении конкретных техногенных изменений грунтовых вод с тем, чтобы в дальнейшем перейти к системе контроля за состоянием этих вод и в конечном итоге к системе мониторинга антропогенных изменений окружающей среды в зоне промкомплексов. Выполнению первой задачи посвящена настоящая статья. Она частично основана на материалах обобщения и анализа ряда опубликованных работ [1, 2, 5—11]. Основные исходные данные получены в ходе многолетних экспедиционных исследований ЛГМИ, проводившихся в двух районах.

Первый из них охватывает промышленную зону крупного предприятия сложных фосфорных удобрений: удобрений неорганических, содержащих в своем составе легкорастворимые аммонийные соли ортофосфорной кислоты. Это предприятие представляет собой промышленный комплекс с высокой материалоемкостью и водоёмкостью. Исходный продукт производства — фосфорная руда — добывается в ходе открытой карьерной отработки. В результате этого на значительной площади района верхняя часть геологического разреза подверглась резким изменениям — нарушена целостность зоны аэрации и повысились ее фильтрационные параметры. Здесь размещены многие производственные объекты: хранилища твердых и жидких отходов производства, водопонижительные установки, создана временная система водопонижения: использующая естественные водотоки и дренажные сооружения, включающие перекачивающие насосные установки.

Второй район включает зону захоронения кварцевыми песками с примесью биогенного фосфата мощностью до 1—1,5 м отходов сернокислотного производства — пиритного огарка, образующей прослой и линзы мощностью от нескольких до 50—80 см. Огарок после захоронения был вовлечен в современный геологический процесс, размываясь во время сильных ветровых волнений водоема, на берегу которого он был захоронен, и переоткладываясь в прибрежной зоне за пределами первичного его захоронения. Со времени захоронения огарка до начала исследований прошло 7—8 лет.

Рассмотрим состав и характеристики техногенных изменений грунтовых вод в указанных районах. При этом заметим, что в первом районе промышленное предприятие действующее. Поэтому здесь представилась возможность проследить динамику рассматриваемых техногенных изменений в ходе функционирования ряда производств предприятия. Во втором районе такая динамика выражена менее отчетливо и обусловлена воздействием только природных условий на захороненные отходы.

В зоне водоемких предприятий происходит техногенное увеличение объема грунтовых вод, сопровождающееся подтоплением промплощадок, затоплением подземных сооружений и коммуникаций, а также увеличением доли подземного питания ближайших

водоемов и водотоков. При подтоплении промплощадок под ними и во всей зоне влияния промпредприятия резко меняются параметры движения грунтовых вод и направления грунтового потока [1, 9, 10]. Весьма значительным изменениям подвергается режим уровней этих вод, техногенное воздействие на который может служить индикатором степени общего влияния промкомплекса на грунтовые воды.

В первом районе исследований по данным более 10 тысяч замеров уровней установлено, что даже на сравнительно ограниченных по площади участках встречаются различные типы режима грунтовых вод. Это различие относится к амплитуде колебания уровней, их интенсивностям подъема (спада) и срокам наступления экстремальных значений. На этой основе здесь выделено пять типов режима уровней грунтовых вод (табл. 1).

Таблица 1

Типы режима уровней грунтовых вод

Год наблюдений	Тип режима уровней	Амплитуда колебания		Сроки экстремальных уровней		
		за год наблюдений	средняя за 1983—1985 гг.	весна	лето	осень
1983	I	1,27	1,07	10—15.IV	19—23.VIII	10—20.I
1984		1,43		10—15.IV	10.VIII	5—7.XI
1985		0,51		25.IV—5.V	10—15.VIII	15.XI
1983	II	1,04	0,83	28.III—3.IV	1—10.VIII	10—15.XI
1984		1,00		5—7.IV	15—20.VIII	1—3.XI
1985		0,46		4.IV—10.V	15—20.VIII	1—4.X
1983	III	0,44	0,39	28.III—3.IV	15—20.VIII	5—10.XII
1984		0,53		5—8.IV	3—7.VIII	1—3.XI
1985		0,20		5—25.IV	1—3.VIII	1—5.X
1983	IV	0,75	0,59	5—8.IV	5—10.VIII	15.XI
1984		0,76		1—6.IV	5—10.VIII	1—3.XI
1985		0,26		5.IV—15.V	26.VII—2.VIII	1—5.X
1983	V	0,71	0,54	5—10.IV	1.VIII	явно не выражены
1984		0,78		15.IV	16—18.VIII	1—2.XI
1985		0,13		5.IV	явно не выражены	5.X

Каждый из указанных в табл. 1 пяти типов режима уровней характерен для участков, существенно различающихся степенью антропогенных изменений геологического разреза и удалением от техногенных источников пополнения запаса грунтовых вод [2]

Первый тип режима уровней грунтовых вод характерен для участков, незатронутых техногенными воздействиями и его можно принять как естественный. При этом четко прослеживается связь изменений уровней с ходом гидрометеорологических элементов. Годовая амплитуда уровней  $A(Z_{гр})$  в отдельных местах этих участков изменяется в пределах 0,50—2,17 м в зависимости от естественной водопроницаемости пород зоны аэрации и их водонасыщенности. В среднем за 1983—1985 гг. на преобладающей части участков величина  $A(Z_{гр})$  составила 1,07 м. Начало весеннего подъема уровней происходит всюду практически одновременно (10—15.IV). Летняя межень — в середине августа. Второй более низкий, чем весенний подъем грунтовых вод, происходит осенью, обычно в конце ноября. Исключение составил 1985 г. когда летняя межень практически была выражена слабо из-за обильных осадков в этот период. Это привело к наименьшей  $A(Z_{гр})$  в данном году.

Второй тип режима уровней грунтовых вод, также как и первый, присущ участкам района с ненарушенным карьерной отработкой геологическим разрезом. Но здесь проявились некоторые антропогенные воздействия на зону аэрации в ходе хозяйственной деятельности (осушение и заболачивание, подтопление). Годовой ход уровней подобен первому типу, но величина  $A(Z_{гр})$  меньше на 0,25 м и в среднем составляет 0,83 м. Уровни грунтовых вод в течение всего года более высокие, чем на участках первого типа. Это является следствием повышенной водопроницаемости горных пород из-за их техногенных изменений.

Наиболее существенные изменения природного режима уровней грунтовых вод можно характеризовать третьим типом. Он присущ участкам с наибольшей техногенной нагрузкой, где расположены основные накопители промстоков и хранилища твердых отходов, а также основные цеха. Здесь в течение всего года грунтовые воды наиболее близко расположены к земной поверхности и их режим практически не зависит от хода гидрометеорологических элементов. Величина годовой  $A(Z_{гр})$  минимальная, в среднем не превышает 0,2—0,5 м и по отдельным скважинам даже приближается к единицам сантиметров.

Четвертый тип режима уровней свойственен сравнительно однородным, в геологическом отношении, участкам с некоторой вариацией мощностей зоны аэрации. Геологический разрез нарушен карьерной отработкой, наблюдательные скважины находятся вдали от накопителей промстоков, имеются локальный дренаж и различных размеров водоёмы. Зависимость хода уровней грунтовых вод от режима гидрометеорологических элементов слабая. Как и в третьем типе, режим уровней зависит от воздействия ло-

кальных техногенных факторов. Средняя величина  $A(Z_{гр})$  практически вдвое меньше фоновой (табл. 1).

Пятый тип режима уровней выделяется на обработанных участках месторождения, рекультивированных и имеющих естественный и индустриальный дренаж (ручей, разрезная траншея). Откачка грунтовых вод здесь не производится. Территория участка настраивается производственными объектами. На таких участках режим уровней грунтовых вод имеет свои особенности. Величины  $A(Z_{гр})$  невелики (табл. 1). В 1983—1985 гг. наблюдался подъем уровня грунтовых вод на 0,25—0,30 м ежегодно. Это свидетельствует о процессе подтопления и зависит от совместного воздействия природных и локальных техногенных факторов.

В зоне действующих карьеров ход уровней грунтовых вод определяется режимом карьерной откачки. При летних систематических откачках образуется мощная депрессионная воронка, в центре которой уровни грунтовых вод снижаются почти до нулевой отметки.

Экстремальные значения уровней грунтовых вод для рассмотренных пяти типов их режима не совпадают. Это в значительной мере определяется степенью техногенного нарушения геологического разреза и зависимостью хода уровней от природных и техногенных факторов. Весенний подъем уровней на участках с наибольшими техногенными изменениями начинается в среднем на 10 дней раньше фонового подъема; на рекультивированных территориях это различие достигает 5 дней. Обычно весенний подъем грунтовых вод в зоне промкомплекса совпадает с началом таяния загрязненного снежного покрова.

Таким образом, в зависимости от антропогенного нарушения геологического разреза и мощности техногенного источника питания грунтовых вод — режим грунтовых вод настолько отличается от природного, что вблизи от этого источника, по существу, не зависит от гидрометеорологических условий: грунтовые воды весь год имеют необычно высокий уровень с минимальной годовой амплитудой. По мере удаления от техногенного источника питания грунтовых вод амплитуда колебания их уровней несколько падает. Но и в этих условиях она меньше, чем это характерно для природных условий района. Все это означает, что в зоне рассматриваемых типов промкомплекса формируется свой техногенный режим уровней грунтовых вод, характеризующийся незначительной амплитудой их годового хода, своими сроками наступления экстремальных уровней и тесно связанный с режимом техногенных изменений запасов грунтовых вод. Такое положение вынуждает по-иному рассматривать формирование стока водотоков в зонах промкомплексов: на малых и видимо средних реках при расчетах половодий, паводков, летней и зимней межени необходимо учитывать повышенный грунтовый и поверхностный сток, обусловленный деятельностью промкомплексов.

Кроме рассмотренного выше, существует и другой аспект воздействия на грунтовые воды — техногенные изменения их химического состава и минерализации в целом. Об этом можно судить по многолетним данным экспедиционных исследований авторов в указанных выше двух районах и по опубликованным данным.

В первом районе природная (фоновая) минерализация в верхней части горизонта грунтовых вод до начала функционирования предприятия была менее 0,75 г/л. По мере развития производственной деятельности промкомплекса непосредственное поступление промстоков в верхний водоносный горизонт, миграция продуктов твердых отходов вместе с атмосферными осадками, различного рода утечки из хранилищ жидких отходов и подземных коммуникаций привели к повышению минерализации грунтовых вод и формированию ореола измененного их химического состава (табл. 2).

Таблица 2

Ореолы измененного химического состава грунтовых вод

Год	Минерализация грунтовых вод, г/л			
	0,75—1,0	1,0—3,0	3,0—10,0	более 10,0
Номер и размер ореола (км <sup>2</sup> )				
1980	I более 7,0	II 7,5	III 6,1	IV 0,8
1985	I более 9,0	II 15,5	III 7,0	IV 1,0

Основными источниками техногенного изменения состава грунтовых вод различных ореолов являются: IV — инфильтрующиеся из хранилищ жидких и твердых отходов растворы, обогащенные легкорастворимыми веществами и их соединениями; III — преимущественно растворы из IV ореола; II — то же и обогащающиеся в зоне аэрации инфильтрующиеся атмосферные осадки, а также породы зоны аэрации; I — преимущественно породы зоны аэрации и инфильтрующиеся через них атмосферные осадки.

До начала производственной деятельности промкомплекса состав грунтовых вод (природный фон) был преимущественно гидркарбонатным щелочноземельным с преобладанием натрия в нижней части их горизонта. С повышением минерализации в них увеличивается содержание ионов сульфатов, фосфатов, фтора, аммония, натрия и ряда других компонентов. При высокой минерализации (более 10 г/л) рассматриваемые воды имеют преимущественно сульфатный или сульфатно-фосфатный смешанный по катионам, но с преобладанием аммония, состав. Все воды с минерализацией свыше 1,5—2 г/л перехватываются дренажем и направляются на очистные сооружения или разбавление для исполь-

ования в технических нуждах предприятия. Оставшиеся воды азбавляются естественным путем на территории предприятия и другие водные объекты не поступают. Относительно быстрое изменение качества грунтовых вод на территории рассмотренного ромкомплекса связано с высокими фильтрационными способностями нарушенных и перемещенных, в ходе карьерной отработки месторождения, пород верхней части геологического разреза. В нижней части последней породы залегают *in situ*, коэффициенты их фильтрации на два и более порядка ниже, чем в верхней. Но и здесь на отдельных участках состав вод претерпел сильные изменения (табл. 3).

Таблица 3

Некоторые данные об изменениях химического состава грунтовых вод нарушенной части геологического разреза у дамбы накопителя промстоков

Компоненты, мг/л	28.06. 1982 г.	20.07. 1983 г.	13.08. 1985 г.
$\text{NH}_4^+$	1680,0	3607,7	12150,0
$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	1423,7	2323,0	1575,0
$\text{HPO}_4^{2-}$	949,2	775,0	1050,4
F	5,8	3,3	6,1
$\text{SO}_4^{2-}$	4288,0	8885,7	30250,0
Сумма минеральных веществ	9169,0	16270,0	46685,0
pH	6,69	6,40	6,70

Весьма интересно, что, по данным опробования 13.08.1985 г. верхней части горизонта (в нарушенных породах), отмечены грунтовые воды с минерализацией всего около 20,65 г/л и с pH 6,45. Содержания в них ионов аммония составляло 5,0, фосфатов (в сумме) — 1,6, сульфатов — 12,0 г/л, а фтора — 7,6 мг/л.

По существу в нижней части горизонта грунтовых вод образовался вторичный очаг изменения химического состава вод, очаг, сформировавшийся в ходе последовательной непрерывной концентрации техногенных продуктов, поступающих из верхней части геологического разреза.

Подобных примеров образования вторичных очагов изменения химического состава грунтовых вод немало. Так, на одном из промкомплексов по производству минеральных удобрений, расположенном в других, по сравнению с первым районом, природных условиях, шламонакопитель площадью около 2 га был сверху законсервирован почвенным слоем. Выросла плотная, высотой 2—3 м кустарниковая растительность. По периферии этого изолированного шламонакопителя наблюдаются рассеянные выходы грунтовых вод техногенного состава.

Этот пример и приведенные данные по первому району свидетельствует о том, что вторичные очаги изменения состава грунтовых вод являются более устойчивыми и длительно действующими источниками техногенного воздействия на химический состав вод первого водоносного горизонта. В ряде случаев, даже создав безотходное производство на месте прежнего, оказывавшего техногенное воздействие на грунтовые воды, образовавшийся ранее вторичный очаг будет длительное время негативно влиять на состав этих вод.

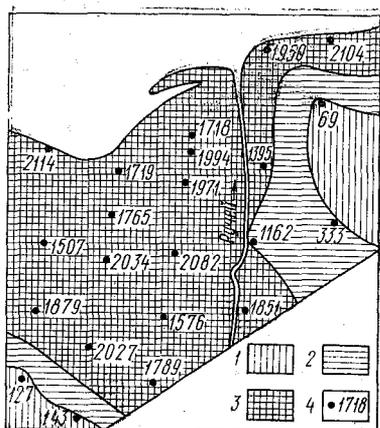


Рис. 1. Схема содержания  $\text{SO}_4^{2-}$ :

1 — участки с содержанием  $\text{SO}_4^{2-}$  менее 300 мг/л; 2 — от 300 до 1200 мг/л; 3 — более 1200 мг/л; 4 — точки отбора проб и содержание  $\text{SO}_4^{2-}$  (мг/л) в верхней части горизонта грунтовых вод.

Такой вывод подтверждается результатами исследований авторов во втором районе. В гидрохимическом отношении здесь выделяются три участка: А — первичного захоронения пиритного огарка, Б — переотложения огарка (вторичное захоронение), В — фоновый участок (за пределами зоны захоронения огарка). Границы участка А совпадают с контурами гидрохимической аномалии по сульфат-иону с концентрацией более 1200 мг/л (рис. 1); участок Б — в пляжной зоне правобережья ручья. Состав грунтовых вод в пределах этих трех участков на различных глубинах представлен в табл. 4.

Данные табл. 4 свидетельствуют о том, что растворение захороненного пиритного огарка приводит к повышенной концентрации

сульфат-иона и железа во всей исследованной толще геологического разреза участков А и Б. Содержание этих компонентов в верхнем слое толщиной до 1 м более чем в 10 раз превышает гидрогеохимический фон. По мере увеличения глубины от земной поверхности содержание этих компонентов понижается, оставаясь в слое 5—8 м выше фонового по сульфат-иону в 9 и железу — в 1,5 раза. Примерно такое же положение с содержанием фосфата и фтора, источником которых являются фосфатсодержащие кварцевые пески, перекрывающие захороненный пиритный огарок. В то же время глубина проникновения высокоагрессивных вод с содержанием сульфат-иона более 1200 мг/л на участке Б не превышает 1 м. По-видимому, это обусловлено более поздним, вторичным, захоронением здесь источника изменения химического состава грунтовых вод.

Таблица 4

## Химический состав грунтовых вод второго района

глубина, м	Количество анализов	Основные компоненты грунтовых вод							
		pH	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Fe <sup>3+</sup>	F <sup>-</sup>	p	сухой оста- ток
Участок А									
0—1	13	5,68	1793	112	174	151	10	17	3366
1—3	5	6,64	1270	171	390	178	9	10	2669
3—5	4	6,62	1248	60	230	142	6	10	2822
5—8	16	6,70	774	88	510	20	2	2	2155
	среднее	6,25	1333	105	329	94	7	10	2783
Участок Б									
0—1	2	6,40	2032	76	140	141	10	17	5816
1—3	3	6,71	703	64	303	64	8	6	6334
3—5	1	7,47	409	26	404	0	11	2	4232
	среднее	6,73	1097	62	265	68	9	9	5811
Участок В									
0—1	4	6,55	167	103	342	13	8	6	835
1—3	2	6,56	164	57	115	7	1	1	544
3—5	2	7,28	50	76	528	1	9	11	408
5—8	2	7,72	123	26	281	13	2	2	647
	среднее	6,93	134	73	332	10	2	4	654

Примечание: содержание компонентов (кроме pH) приведено в мг/л.

Существенное различие содержания компонентов в грунтовых водах участков А и Б по сравнению с гидрогеохимическим фоном (табл. 4) свидетельствует о наличии вторичного очага резкого изменения химического состава вод нижней части геологического разреза. Это подтверждается показателем pH: его значения во всей исследованной толще геологического разреза закономерно возрастают по мере продвижения от участков А и Б к зоне В (рис. 2).

Выщелачивающее действие и углекислая агрессивность грунтовых вод в значительной мере определяются, соответственно, концентрациями гидрокарбонат-иона и свободной углекислотой. Особенности изменения их содержания по данным табл. 4 установит

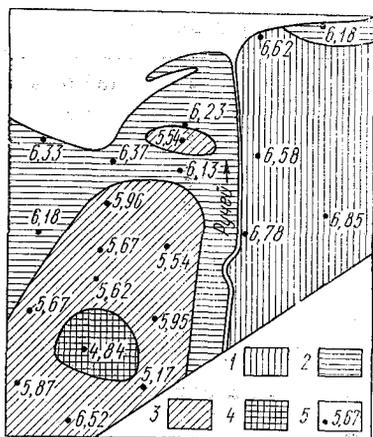


Рис. 2. Схема значений pH:  
1 — участки с pH более 6,5;  
2 — от 6,5 до 6,0; 3 — от 6,0 до 5,5; 4 — менее 5,5; 5 — точки отбора проб и значения pH.

ческих элементов. Состав этих вод настолько изменяется, что даже на периферии промкомплексов их общая минерализация в верхней части горизонта грунтовых вод иногда формируется длительно действующими вторичными очагами изменения состава грунтовых вод. В таких условиях проведение мероприятий по охране грунтовых вод должно базироваться на системе мониторинга антропогенных изменений состояния геологической среды как одного из звеньев общей системы «промышленное производство — окружающая среда».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бродская Н. А. Техногенное воздействие промышленного предприятия на динамику грунтовых вод. — Тр. IV конференции молодых ученых ЛГМИ. Деп. ВИНТИ, № 4195/79, с. 51—56.
2. Бродская Н. А. Режим грунтовых вод на территории предприятия фосфорных удобрений. — Межвузовский сб.: Вопросы охраны и рационального использования вод суши, Л., изд. ЛПИ, 1985, вып. 89, с. 23—28. (ЛГМИ)
3. Воробьев О. Г., Уфимцев Б. Ф., Чечкин С. А. Системный подход к количественной оценке влияния промышленного предприятия на окружающую среду. — Деп., № 876-ХП-Д80 / ЛенНИИ Гипрохим. Черкассы, 1980
4. Воробьев О. Г., Уфимцев Б. Ф., Чечкин С. А. Метод сравнительной оценки токсичности отходов промышленного предприятия. — Деп. № 2626-79. М., НИИТЭХИМ, 1979.

5. Климов Г. И., Болотникова И. В., Родина Н. И. Влияние грунтовых вод на загрязнение поверхностных водотоков и водоемов. — Межвузовский сб.: Гидрологические ресурсы Продовольственной программы. Л., изд. ЛПИ, 1984, вып. 86, с. 132—136. (ЛГМИ).

6. Климов Г. И. Основные особенности изменения качества природных вод отрасли фосфорных удобрений. — Межвузовский сб.: Вопросы охраны и рационального использования вод суши. — Л., изд. ЛПИ, 1985, вып. 89, 17—23. (ЛГМИ).

7. Чечкин С. А., Климов Г. И., Бродская Н. А. Использование «огашенных» карьеров месторождений для промышленного строительства. — кн.: Доклады научной конференции «Охрана геологической среды от отрицательного воздействия предприятий горнодобывающего профиля». М., изд. МГУ, 1984, с. 219—222.

8. Чечкин С. А., Климов Г. И., Бродская Н. А., Годыцкая В. И. Химическое загрязнение грунтовых вод предприятиями фосфорных удобрений. — Тр. ЛенНИИ Гипрохим, 1981, с. 10—16.

9. Чечкин С. А., Русанов Б. Д., Климов Г. И. Подземные воды природно-технических системах промышленных комплексов. — Межвузовский сб.: Вопросы гидрологии суши. Л., изд. ЛПИ, 1981, вып. 74, с. 138—148. (ЛГМИ).

10. Чечкин С. А., Климов Г. И. Воздействие промышленных предприятий на грунтовые воды. — Межвузовский сб.: Исследования формирования ечного стока и его расчеты. Л., изд. ЛПИ, 1981, вып. 76, с. 64—69. (ЛГМИ).

11. Чечкин С. А., Русанов Б. Д., Михайлов Л. Е. Антропогенное влияние на грунтовые воды. — Межвузовский сб.: Гидрометеорологическое обеспечение народного хозяйства. Л., изд. ЛПИ, 1982, вып. 78, с. 102—111. (ЛГМИ).

12. Язвин Л. С. Ресурсы подземных вод и их изменение под влиянием хозяйственной деятельности. — М.: изд. МГУ, 1981, ч. II, с. 244—251.

УДК 300.322

В. А. МАЛЬКОВ, В. М. СОЛОВЬЕВ

## ВНЕШНЯЯ СРЕДА КАК ФОРМА ВЗАИМОСВЯЗИ ПРИРОДЫ И ОБЩЕСТВА

Выступая на XXVII съезде КПСС генеральный секретарь ЦК КПСС М. С. Горбачев отмечал, что «социализм с его плано-вой организацией производства и гуманистическим мировоззрением способен внести гармонию во взаимоотношения между обществом и природой» [1].

В связи с этим перед естественными и общественными науками ставится сложная задача: комплексно исследовать механизм взаимоотношений между обществом и природой.

Заметную роль в этих исследованиях занимает философский анализ данной проблемы. Такой анализ предполагает первоначально выяснение вопроса о том, можно ли отождествлять понятия «природа» и «природная среда», которые соотносятся с понятием «общество». Известно, что природа на нашей планете сло-

жилась как целостная система еще до появления человека и остается до сих пор устойчивой, демонстрируя фундаментальность своих элементов и структурных связей. Отдельные люди и коллективы взаимодействуют не с этой природной структурой, а с отдельными предметами, процессами, сравнительно небольшими системами, образующими поверхностный уровень проявления природы как глобального целого. Чем мощнее становится общество, тем более глубокие существенные связи включаются в процесс взаимодействия между природой и человеком. Это усложняющаяся по мере развития общества совокупность проявлений природы и следует рассматривать как природную среду. Поэтому, анализируя среду как форму взаимодействия природы и общества, нам следует выяснить, во-первых, отношение среды с одной стороны, к природе, с другой, — к обществу; во-вторых, выявить ее структурные особенности, а также формы и условия ее развития; в-третьих, определить те понятия, которые отражают содержание категории «внешняя среда» общества.

В нашей научной литературе названный аспект проблемы освещен пока слабо. В предлагаемой статье авторы стремятся восполнить этот пробел, не претендуя на полноту раскрытия названного аспекта.

Как понятие, «среда» употребляется в различных науках, в том числе и в философии. Для материалистов это понятие отражает часть реального мира в виде различного рода явлений, предметов, процессов, независимых от нашего сознания. Это понятие соотносится всегда со «своим» диалектическим антиподом: средой обитания такого-то вида животных; геосреда как часть природы взаимодействующая с обществом, и т. п. Этим понятием отражается не любой набор компонентов реального мира, а упорядоченный определенным образом. Среда и ее диалектическая противоположность, т. е. развивающийся объект, относятся к своей более общей системе, которая обуславливает их тождество и вместе с этим содержит их различие. По отношению к обществу и геосреде такой системой является тот уголок Вселенной, в котором возникли и существуют структурно-генетические предпосылки условия и основы для развития общества. К ним следует отнести определенное сочетание различных форм движения и видов материи в массе конкретных материальных объектов и процессов. Это сложное природное образование, представляющее собой целостную систему, рассматривается в современной науке как биосфера [2, 3].

Развитие общества выражает развертывание сущности биосферы, и, наоборот, гибель последней означает и гибель человечества на данном этапе его развития. В свою очередь, биосфера проявляется в виде многообразных конкретных форм бытия органического вещества и предметов неживой природы. Совокупность всех таких форм, взаимодействующих с обществом, и образует природную среду этого общества. Природная среда является бла-

оприятной, если конкретные формы проявления сущности биосферы как формы ее бытия соответствуют развитию общества, азвертыванию его сущности. В свою очередь, конкретные проявления сущности общества, его формы бытия также могут соответствовать или не соответствовать условиям развития биосферы. Здесь мы наблюдаем противоречие между способом существования и развития сущности у общества и у биосферы. По мнению (обычянского, «взаимодействие природы и общества представляет собой, разумеется, не просто самовозобновляющийся, самодвижущийся, но и саморазвивающийся процесс» [4].

Поэтому общество может воздействовать на существенные связи в природной среде, если расширяет фронт своих влияний а конкретные формы проявления этой среды до границ меры. Ю, пока общество характеризуется меньшим порядком своей ошности, оно не в состоянии существенно влиять на формы развития и функционирования биосферы. Именно при таком соотноении общества и более мощной системы (биосферы) проявления ушности последней и отражаются в понятии природной среды бщества.

Общество может прогрессивно развиваться, если, потребляя омпоненты среды, вместе с тем, не будет задевать ее структурной основы, на которой существует и развивается окружающая природа. Это оказывается возможным благодаря тому, что среда тносится к классу вероятностных систем. Известно, что в этих истемах имеется два уровня — поверхностный и более глубокий, ыражающий сущность системы, ее внутреннюю основу. Этот второй уровень выступает как регулярность, закономерный порядок массе случайных и единичных явлений поверхностного уровня. У. В. Сачков указывает на относительную автономность обоих ровней [5]. Определяя отношения между элементами поверхностного уровня как случайные, автор отмечает, что при переходе т одного явления к другому характеристики явления изменяют ои значения и независимо от значений этих характеристик других явлений. Говоря иначе «... в общем случае между самими явлениями может и не быть непосредственных, прямых зависимости — они могут быть независимыми и, следовательно, ни чем ни определять друг друга», поскольку явления определяются ушностью, как и связи между ними [6]. Отношения и связи того рода мы будем характеризовать как индифферентные.

Индифференция как специальное научное понятие в нашей философской литературе пока еще не рассматривалось, хотя этот ермин в его первоначальном значении (безразличие, безучастие, авнодушие, и т. п.) используется многими авторами. Это понятие мы встречаем в трудах классиков марксистской философии, оторые наполняли его философским содержанием. В этом отношении является примечательным высказывание К. Маркса, где он характеризовал особенности капиталистических производствен-

ных отношений [7]. К. Маркс характеризует индифферентные отношения, прежде всего, как внешние, несущественные. Ф. Энгельс обращал внимание на такие признаки у индифферентных отношений, как неизменность, неспособность выявлять специфически свойства у тел, участвуют ли они в физических, химических, биологических процессах [8].

Мы выделим, прежде всего, такие индифферентные отношения и связи, которые по отношению к структуре характеризуются как несущественные, внешние, случайные и т. д. Они устанавливаются между компонентами системы благодаря тому, что структура поглощает у этих компонентов все их свойства, она влияет на них только в такой мере, чтобы они оставались в пределах системы. В результате каждый из них может вступать с другими компонентами в связи, отличающиеся от структурных. Такие связи и отношения мы будем характеризовать, как системную индифференцию. Отношения между элементами, выражающие структурное обособление, устойчивость, постоянство, инвариантность структуры являются также индифферентными. Например, генетический код одного животного является нейтральным к наследственным признакам другого животного. Это — структурная индифференция. Чтобы не смешивать этот вид индифференции со структурной, отметим их отличительные особенности. Последняя есть выражение закономерных связей — общих, необходимых, устойчивых, существенных, проявляющихся в повторяемости. Отношения же структурной индифференции есть проявление этих структурных связей во взаимодействии единичных, конкретных тел, для которых эти связи могут и не быть существенными, общими и т. д. Например, наследственный признак выражает структуру биологического вида, тогда как для человека биологическая устойчивость уже не является проявлением сущности. Кроме того, если для структурных связей необходимость выступает как общий признак, то в случае структурной индифференции необходимость проявляется в форме единичных актов. Этот признак выражает устойчивость данной формы бытия в конкретном предмете, ее сохраняемость, отграниченность от других форм. Для выявления сущности здесь не достает процесса развития, в котором объекты выступают как диалектические противоположности, а не как внешние и случайные. Важнейшим признаком такой индифференции, по Гегелю, является отсутствие у частей целого всякой самостоятельности, индивидуальности, а также отсутствие способности и необходимости присоединять к целому, нечто другое как недостающее [9]. Отсутствие у элементов индивидуальных свойств, которые бы отличались от свойств структуры, порождает неразличность этих элементов, что является формой негативной целостности этой структуры. Здесь система не проявляет своего содержания иначе, как через структуру, в которую входит и это содержание. Между содержанием и формой устанавливаются отрицательные обратные связи, здесь части связаны между собой только через целое и и

ке полностью изолированы друг от друга. Целое определяет и их устойчивость.

Системная и структурная индифференция всегда находится в единстве, и это единство мы будем рассматривать как индифферентную совокупность.

Уже из этого анализа особенностей индифференции можно говорить о ней как о понятии, отражающем структуру бытия различных вещей, взаимодействующих между собой. В таком же смысле об индифференции писал Гегель [10]. Общество существует во внешней среде до тех пор, пока взаимодействует с ней через область индифференции. Как только эти взаимодействия переходят на область структуры, среда уже перестает быть внешней. Мы имеем в этом случае две однопорядковые и диалектически взаимодействующие системы; например, пашни, плотины на реках, парки и т. п. — никто не называет внешней средой по отношению к обществу. В таком переходе среды в систему нового типа состоит одна из сторон развития системы «природа — общество» от бытия к сущности.

Таким образом, можно сказать, что внешняя природная среда является сферой бытия различного рода природных и социальных объектов. В этой сфере находят свое выражение существенные связи, определяющие развитие и функционирование систем, относящихся к разнокачественным областям реального мира. Здесь взаимодействие общества и природной среды выступает как одно из проявлений отношения между сущностью и бытием общества.

Структурная и системная индифференция каждая в отдельности не выражают процесса развития, следовательно, сами по себе они не могут быть формами выявления сущности развивающейся системы. Оба вида этих связей не имеют необходимого для развития соответствия между стороной тождества и стороной различия, такого рода, чтобы могло это соответствие развертываться в противоречие, как источник самодвижения. Для структурной индифференции характерно то, что она выражает основу целостности системы, тождественность ее структурных элементов. Что же касается различий между элементами этой монолитной структуры, то они являются формой бытия системы, рассматриваемого со стороны многообразия частей целого, элементов структуры. Множественность этих частей и элементов выражает также целостность системы, а не природу каждого из них.

Системная индифференция содержит также несоответствие между тождеством и различием, но уже в другом отношении. Здесь не достает такого взаимодействия, которое бы соответствовало условиям превращения несущественных различий в противоречия. Отсутствие у системной индифференции диалектических противоположностей с характерными для них взаимоположением, взаимопроникновением на уровне структурных, существенных взаимодействий делает различия внешними непосредственными фактами бытия.

Природная среда характеризуется таким соотношением обоих видов индифференции, которое отвечает главному условию развития общества: она не должна быть слишком хаотичной и чрезмерно упорядоченной. Чрезмерная хаотичность привела бы к тому, что общество, в конце концов, не смогло бы противостоять росту энтропии. Если же среда будет выступать как жесткая упорядоченность в форме лишь структурной индифференции, то для развития не сложатся нормальные условия из-за отсутствия «строительного материала».

Общество развивается нормально, если природная среда является такой индифферентной совокупностью, в которой соотношение системной и структурной индифференции таково, что постоянно существуют неравновесные состояния, для которых воздействия общества оказываются достаточными, чтобы зарождалась системы равновесия в природе. Эти системы являются первичными компонентами очеловеченной природы, когда предмет внешней среды превращаются в искусственное тело общества. Домашний скот, сады и пашни, шахты и т. п. — все это системы равновесия, выражающие единство человеческого и природного. Природа также состоит из различных форм равновесных систем, которые образуют более глубокий уровень индифферентной совокупности по сравнению с исходными компонентами среды.

Ф. Энгельс отмечал, что «возможность относительного покоя тел, возможность временных состояний равновесия является существенным условием дифференцирования материи и тем самым существенным условием жизни» [11]. Специфика систем равновесия связана с той стороной диалектического противоречия, которая выражает единство, совпадение, равнодействие противоположностей как результат взаимодействия, проявленный в окружающей среде. Особенность этих систем состоит в их способности сохраняться, оставаться устойчивыми и неизменными. Взаимодействующие внутренние силы, тенденции могут быть различными по своей природе, могут меняться относительно друг друга, но состояние равновесия остается прежним, если остается постоянной связью этого тела с другими телами. Вместе с тем, следует обратить внимание на многообразие форм равновесия. Ф. Энгельс соотносит это разнообразие с наличием различных форм движения [12]. Универсальной формой равновесия, хотя и не единственной, является состояние равновесия, связанное со свойствами механического движения, а также пространства и времени. В своей жизнедеятельности человек, живые организмы опираются не только на механическое движение и соответствующие свойства тел, но и на химические, микрофизические процессы, биологические и социальные. Понятно, что в биосфере и в обществе механические системы равновесия обрываются равновесием соответствующих форм движения. Во всех случаях рассматриваемые системы сочетают в себе противоположные свойства. С одной стороны, они выражают момент изолированности, обособленности от окружающих предме-

ов. С другой стороны, у всех систем равновесия имеются общие черты, связанные с универсальными свойствами пространства и времени, с универсальным характером механического движения, массой, энергией и др. В результате налицо предпосылки возникновения и развертывания противоречий, как источников развития и самодвижения.

Однако именно системы равновесия сами по себе характеризуются пассивностью относительно того, чтобы стать источником развития, активной формой самодвижения. Будучи выражением изолированности в определенном плане одной группы тел от других, системы равновесия вносят в отношения между собой и не входящими в них телами индифферентный характер. Так как они не являются источником развития, то по отношению к этому процессу они выступают как необходимые условия и предпосылки, образуя сферу бытия и область возможного.

Преобразование возможности развития в действительный процесс определяется особенностями самих же систем равновесия. Эти особенности связаны с тем, что в структуре каждой из систем равновесия устанавливается диалектическое соответствие между тождеством и различием, благодаря чему развивается противоречие и специализируются его стороны. Поэтому эти системы можно рассматривать и как механизмы спецификации. Благодаря им возникают между группой компонентов среды устойчивые опосредованные связи, выражающие существенные свойства у этих компонентов и придающие всей системе функциональный характер. Они сочетают в себе отрицательные обратные связи и положительные. Первые из них определяют свойства равновесия, тогда как вторые присущи механизмам спецификации. Далее эти системы появляются закономерно только при условии, если внутри ландшафта, биоценоза устанавливается устойчиво-неустойчивое состояние по отношению к антропогенному фактору. Возникшие социально-природные системы равновесия выступают как элементы того же ландшафта или более широкой аналогичной системы. Поэтому они вместе с другими компонентами образуют индифферентную совокупность. Благодаря процессу спецификации начинают меняться компоненты первичной системы, приобретая новые существенные свойства. Гегель рассматривал процесс спецификации как опосредствованную деятельность вещей в отличие от внешних непосредственных отношений их друг к другу и к окружающему миру [13]. Системы спецификации характеризуются Гегелем как формы присвоения человеком части природы, как физический захват. Хотя, по Гегелю, этот захват более совершенен из-за своей непосредственности и предметно-чувственной начисности, но этот способ присвоения несет много субъективности, имеет временный и ограниченный характер как по объему, так и вследствие качественной природы предметов. Отсюда физическое присвоение выражает захват только по отношению к единичным вещам. Эта форма присвоения является выражением не-

гармонического подхода к использованию природных ресурсов более того, здесь человек берет то, что легко изымается из окружающей среды. С развитием производительных сил объект хозяйственной деятельности (обрабатываемые пашни, выращиваемые сады и т. п.) становится для человека ближе экономически. Здесь происходит взаимное формирование человека и объекта природы как принадлежащих друг к другу. В этом процессе складывается замкнутый цикл между производством и потреблением: «Индивидуум, — пишет К. Маркс, — производит предмет, через его потребление возвращается опять к самому себе, но уже как производящий и воспроизводящий себя самого индивидуум» [14].

Уже процесс формирования человека и природы как субъекта и объекта предполагает хозяйственное отношение и к той части природы, которая еще не стала объектом хозяйственной деятельности, но может со временем оказаться им. Здесь отношения к окружающей среде складываются эмпирическим образом и поэтому односторонние, под углом зрения сложившегося хозяйственного цикла, а не глобального подхода к природной среде. Такой подход возникает уже на основе науки и коллективных интересов. В результате человек на практике и в представлении дели природу на «свою» и на окружающую среду. Посредством производительных сил он противопоставляет эти две части природы — культурную и дикую. По мере развития производства область культурной природы постоянно расширяется, вместе с этим расширяется и область окружающей среды.

При характеристике механизмов спецификации следует отметить что в них наблюдается формирование субстратной структуры и структуры функциональной. В этих системах субъект и объект образуют два полюса, которые развиваются различно. Объекты природы как элементы труда изменяются по линии узкой специализации, а человек как другой полюс совершенствует у себя способность применять различные орудия труда, жить и работать в разнообразных условиях. Это возможно лишь на базе формирования специфических человеческих свойств, материальным носителем которых является общество и отдельные люди как его элементы. Здесь общество и его члены формируются по отношению к природе как субстратная структура. По отношению же к множеству материальных элементов труда и конкретных предметов природы человек проявляет себя уже как носитель функциональной структуры, функциональных связей.

По мере развития производительных сил общества увеличивается масса механизмов спецификации, которые будучи однотипными, формируют массу однотипных специализированных природных элементов труда и условий его протекания. Это является развитием новой структуры, отличной от природной, так как выражает устойчивость не просто бытия, а сущности, свойственной социальным процессам. Из объектов природы человек создает

вой природные формы бытия, которые соотносятся со средой и как элементы индифферентной совокупности, и как структурные элементы. Такое соотношение углубляется по мере развития человеческой практики.

Здесь нам следует отметить различие между системами равновесия и механизмами спецификации. Выше рассматривались случаи, когда они совпадали. Вместе с тем, не любая система равновесия является механизмом спецификации. Например, климатические условия, циркуляция атмосферы выражают определенное равновесие в природе, но в этих атмосферных системах не происходит специализации материального носителя воздуха. Он — легколетучий компонент, а потому появляющиеся у него свойства не закрепляются субстратно. При использовании ветра возникают механизмы спецификации лишь в системах орудий труда мельницы, парусные суда, летательные аппараты и т. п.).

Процесс специализации изменяет стороны, образующие системы равновесия, создавая предпосылки для перестройки характера самого равновесия.

Необходимо отметить, что системы равновесия отражают особенности отрицательных обратных связей, а механизмы спецификации — положительных. Последние выражают развертывание устойчивости явления, а потому от них зависят и формы конкретного бытия, и, следовательно, состояний равновесия.

Будучи формой совместного бытия и для общества и для природы, среда оказывается ареной развертывания и развития противоречий. Сначала взаимодействие этих двух частей реального мира происходит на уровне единичных событий, процессов, явлений. Так было при зарождении человеческого общества, аналогичную картину мы наблюдаем в тех случаях, когда люди осваивают новые области внешней среды. Вместе с развитием общества или просто по мере освоения человеком ранее необжитой природы образуются социально-природные комплексы, которые как системы равновесия углубляли среду в том плане, что индифферентная совокупность уже выражала формы бытия, относящиеся к конкретным отдельным предметам и процессам. Процесс усложнения среды идет в соответствии с действиями закона взаимного перехода количественных изменений в качественные. До определенного предела эти изменения выступают как безразличные, индифферентные по отношению к качеству, в рамках которого они происходят. Такие изменения проявляются в том, что как только образуются социально-природные комплексы, происходит качественный скачок в развитии среды, которая начинает выражать совокупность форм бытия более мощных систем равновесия. Например, члены колхоза определяют свой объект как элемент внешней среды не в виде отдельных деревьев, а в виде лесных годий.

Так как участки природы — это самостоятельные целостные системы, то возникающие социально-природные комплексы могут

нарушать целостность этих систем. Природа может реагировать на воздействие общества как целое или как части целого потому что масштабы и глубина изменений в сфере индифферентной совокупности задевают структурный их уровень, количественные и изменения в конкретных формах бытия переходят некоторую меру и ведут к изменению качества, а вместе с этим и к изменению содержания среды, ее существенных свойств.

Другое направление во взаимодействии природы и общества связано с превращением человеческой деятельности в необходимый фактор развития сущности природных систем, а это в свою очередь является внутренним условием развития социально-природных комплексов.

Таким образом, первое направление воздействия общества на природу происходит на основе индифферентных отношений, носителями которых являются системы равновесия. Следовательно структуры бытия как индифферентная совокупность определяют своеобразием состояний равновесия. Те противоречия, которые возникают, являются также формами бытия. Вместе с тем, они не выражают таких существенных связей между взаимодействующими сторонами, которые обуславливали бы саморазвитие, развертывание сущности, выражали бы процесс усложнения и упорядоченности структуры энергетического потока. Такая характеристика свойственна уже противоречиям сущности. Эти противоречия связаны с процессом дифференциации как становление структуры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Материалы XXVII съезда КПСС. — М.: Политиздат, 1986, с. 50.
2. Федоров Е. К. Экологический кризис и социальный прогресс. — Л.: Гидрометеоздат, 1977, с. 11.
3. Комаров В. Д. Научно-техническая революция и социальная экология. — Л., изд. ЛГУ, 1977, с. 80.
4. Взаимодействие общества и природы. — М.: Наука, 1986, с. 42.
5. Сачков Ю. В. Роль вероятностного подхода к исследованию движения материи. — В кн.: Пространство, время, движение. М., Наука, 1971, с. 55.
6. Сачков Ю. В. Введение в вероятностный мир. — М.: Наука, 1977, с. 169.
7. Маркс К. Теории прибавочной стоимости. К. Маркс и Ф. Энгельс. Соч. т. 26, ч. 3, с. 529.
8. Энгельс Ф. Диалектика природы. К. Маркс и Ф. Энгельс. Соч. т. 2 с. 356, 558, 619.
9. Гегель Г. Соч., т. 2, с. 316.
10. Гегель Г. Соч., т. 5, с. 450—451.
11. Энгельс Ф. Диалектика природы. К. Маркс и Ф. Энгельс. Соч., т. 20, с. 567.
12. Энгельс Ф. Диалектика природы. К. Маркс и Ф. Энгельс. Соч. т. 20, с. 561.
13. Гегель Г. Соч., т. 2, с. 127, 418, 419.
14. Маркс К. и Энгельс Ф. Соч., т. 12, с. 720.

## МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

В настоящее время интенсивно разрабатывается проблема создания автоматизированных систем управления (АСУ) различными техническими объектами, поведение которых сильно зависит от внешних гидрометеорологических условий. В качестве примеров можно указать системы автоматической посадки самолетов [1], системы навигации необитаемых подводных аппаратов [2] и ряд других систем. Известно, что процесс управления основывается на информации принципиально прогностического характера [3], поэтому в составе АСУ должны существовать соответствующие автоматизированные подсистемы прогнозирования (АПП). Вопросы методологии проектирования АПП до настоящего времени являются малоисследованными. В работе излагаются основные аспекты, которые должны учитываться при проектировании АПП гидрометеорологических величин (АПП ГМВ), с учетом особенностей их функционирования в составе АСУ. Особое внимание уделяется выбору методов прогноза, реализующихся в конкретных АПП ГМВ.

Рассмотрим основные особенности функционирования АПП ГМВ в составе АСУ. В такие системы практически всегда входит измерительная подсистема, с помощью которой в моменты времени  $t_{\text{и}}$  получается измерительная информация о заданном векторе гидрометеорологических элементов  $\vec{X}(t_{\text{и}}) = \{x_1(t_{\text{и}}), x_2(t_{\text{и}}), \dots, x_n(t_{\text{и}})\}$ .

В моменты времени  $t_{\text{р}}$  на основании анализа  $\vec{X}(t_{\text{и}})$  принимается решение о том или ином управляющем воздействии на объект управления. Само управляющее воздействие осуществляется в моменты времени  $t_{\text{у}}$ . Очевидно, что моменты времени  $t_{\text{и}}$ ,  $t_{\text{р}}$  и  $t_{\text{у}}$  связаны неравенством

$$t_{\text{и}} < t_{\text{р}} < t_{\text{у}}. \quad (1)$$

Пусть известна зависимость, связывающая управляющее воздействие с вектором влияющих гидрометеорологических элементов

$$\vec{Y} = f(\vec{X}), \quad (2)$$

где  $\vec{Y}$  — вектор числовых характеристик, описывающий управляющее воздействие. На основании анализа (2) можно получить выражение для связи между погрешностью информации об  $\vec{X}$  и погрешностью управляющего воздействия

$$\delta \vec{Y} = \varphi(\delta \vec{X}). \quad (3)$$

Если известна максимально допустимая погрешность управляющего воздействия  $\delta \vec{Y}_{\max}$ , обеспечивающая правильное в заданном смысле управление объектом, то по (3) можно определить предельно допустимую погрешность исходной гидрометеорологической информации  $\delta \vec{X}_{\max}$ . Естественно, что реальные погрешности  $\Delta \vec{X}$  информации о векторе  $\vec{X}$ , использующей при управлении объектом должны удовлетворять условию

$$\Delta \vec{X}(t_y) \leq \delta \vec{X}_{\max}, \quad (4)$$

где

$$\Delta \vec{X}(t_y) = \tilde{\vec{X}}(t_y) - \vec{X}(t_y), \quad (5)$$

$\vec{X}(t_y)$ ,  $\tilde{\vec{X}}(t_y)$  — истинное значение вектора  $\vec{X}$  в момент осуществления управляющего воздействия  $t_y$  и оценка этого вектора в тот же момент времени. Оценка  $\tilde{\vec{X}}(t_y)$  получается по измеренным значениям  $\vec{X}_{\text{изм}}(t_{\text{и}})$ , получаемым в моменты времени  $t_{\text{и}}$ :

$$\tilde{\vec{X}}(t_y) = \psi[\vec{X}_{\text{изм}}(t_{\text{и}})]. \quad (6)$$

Из (6) и условия (1) следует, что при управлении объектом используется информация принципиально прогностического характера, причем характер прогноза полностью определяется видом функционала  $\psi$  в (6). Погрешность  $\Delta \vec{X}$  в (4) можно условно представить в виде

$$\Delta \vec{X} = \Delta \vec{X}_{\text{изм}} * \Delta \vec{X}_{\text{пр}}, \quad (7)$$

где  $\Delta \vec{X}_{\text{изм}}$  — погрешность измерительной информации;  $\Delta \vec{X}_{\text{пр}}$  — погрешность прогноза (6) при условии

$$\vec{X}_{\text{изм}}(t_{\text{и}}) = \vec{X}(t_{\text{и}}), \quad (8)$$

а знак \* обозначает объединение погрешностей [4].

При проектировании АПП ГМВ необходимо, в первую очередь определить измерительные устройства и методы прогноза (6), которые обеспечивали бы выполнение условия (4). В данной работе основное внимание уделено вопросам выбора пригодных методов прогноза, поскольку для современных АПП ГМВ зачастую выполняется условие

$$\Delta \vec{X}_{\text{пр}} \gg \Delta \vec{X}_{\text{изм}}. \quad (9)$$

Рассмотрим методы прогноза, применяемые в АПП ГМВ. При анализе свойств и погрешностей конкретных методов будем счи

ать, что выполняются условия (9) и (8), в результате чего (6) можно переписать в виде

$$\tilde{X}(t_y) = \varphi[\tilde{X}(t_x)]. \quad (10)$$

Из (10) следует, что в АПП ГМВ должны реализоваться методы автопрогноза, когда в качестве предикторов используются предыдущие значения вектора  $\tilde{X}$ , который подлежит прогнозированию. Различные методы автопрогноза отличаются друг от друга как видом функционала  $\varphi$  в (10), так и способами его построения.

Среди прогнозов вида (10) наибольшее распространение при использовании в АПП ГМВ получили статистические методы автопрогноза. В этих методах прогнозируемый вектор  $\tilde{X}$  представляется в виде случайного поля или процесса с заданными вероятностными свойствами, которые могут быть описаны некоторым набором вероятностных характеристик  $\tilde{Z}_x$  (плотность распределения  $f(\tilde{X})$ , математическое ожидание  $M[\tilde{X}]$ , дисперсия  $D[\tilde{X}]$ , корреляционная функция  $K_x(t_1, t_2)$  и т. п.). Состав набора  $\tilde{Z}_x$  зависит от характера гипотез о вероятностных свойствах вектора  $\tilde{X}$ . В статистических методах прогноза вид функционала  $\varphi$  в (10) определяется тремя способами:

- 1) структура и параметры функционала  $\varphi$  не зависят от  $\tilde{Z}_x$ ;
- 2) структура  $\varphi$  задается произвольно, а его параметры определяются из анализа  $\tilde{Z}_x$ ;
- 3) структура и параметры функционала  $\varphi$  определяются на основании анализа  $\tilde{Z}_x$ .

К автопрогнозам первой группы могут быть отнесены инерционный и климатический прогнозы [5]. Наиболее известными представителями второй группы являются различные методы оптимальной линейной экстраполяции [6], среди которых наибольшее распространение получил метод прогноза по последнему значению [7]. К автопрогнозам третьей группы можно отнести прогнозы с автоматическим подбором экстраполирующей функции [9], прогнозы с использованием фильтра Калмана [10], а также адаптивные методы с дрейфующими коэффициентами, вычисляемыми на каждом шаге временного ряда [8].

Любой из методов прогноза (10), предназначенный для использования в составе конкретной АПП ГМВ, должен оцениваться по многокритериальной системе, в которой два критерия являются основными:

— при прогнозе  $\tilde{X}$  на интервал  $T = t_y - t_x$  условие (4) должно выполняться с заданной вероятностью

$$\alpha \leq P\{|\Delta X(T)| \leq \delta X_{\max}\} \leq 1, \quad (11)$$

где  $P$  обозначает вероятность события в фигурных скобках;

— время  $\theta$ , затрачиваемое на прогноз, должно удовлетворять неравенству

$$\theta \leq T - t_{\text{исп}}, \quad (12)$$

где  $t_{\text{исп}}$  — минимальное время между получением спрогнозированного значения  $\vec{X}(t_y)$  и началом управляющего воздействия.

К критериям (11), (12) могут быть добавлены показатели технической сложности АПП ГМВ, а также различные ограничения экономического и технического характера.

Проанализируем потенциальные возможности различных методов прогноза с точки зрения их соответствия критериям (11), (12). Анализ проведем по группам методов прогноза, выделенным выше. Методы автопрогноза первой группы обладают максимальной простотой и требуют минимальных  $\theta$  при прочих равных условиях. Их реализация требует аппаратных средств минимальной сложности. Вместе с тем, по сравнению с другими методами они дают большую погрешность, в результате чего может не выполняться условие (11). Методы автопрогноза третьей группы обладают наиболее высокой потенциальной точностью, но их техническая реализация сложна, а из-за значительных объемов усваиваемой информации могут потребоваться большие  $\theta$ . В реальных условиях методы третьей группы часто могут давать незначительное уменьшение погрешности по сравнению с методами первой группы, что обусловлено многими причинами, среди которых главными являются:

— несоответствие вероятностных свойств реальных  $\vec{X}$  и их моделей, используемых при теоретически исследованиях погрешности прогноза;

— отличие реальных оценок функционалов  $\psi$  в (10) от их теоретических аналогов.

Теоретический анализ влияния указанных выше причин на реализацию потенциальной точности методов прогноза третьей группы весьма затруднителен и практически никогда не носит окончательного характера. Реальные свойства прогнозов этой группы являются малоизученными. Они могут давать приемлемые результаты в одних случаях и приводить к непредсказуемым групповым ошибкам в других.

Методы автопрогноза второй группы по критериям (11), (12) занимают промежуточное положение между методами первой и третьей группы. Они достаточно хорошо изучены в теоретическом отношении (см., например, [6, 9, 10]), что и обуславливает их широкое применение в составе АПП ГМВ [1]. Основным препятствием использования этих методов является нестационарность вектора  $\vec{X}$ , приводящая к изменению значений набора  $\vec{Z}_x$  со временем и изменению параметров функционала  $\psi$  в (10). Погрешности методов автопрогноза второй группы, обусловленные нестационар-

ностью вектора  $\vec{X}$ , изучены до настоящего времени слабо, хотя в реальных условиях именно они могут иметь важное значение.

Таким образом, при проектировании АПП ГМВ следует стремиться к использованию методов автопрогноза первой группы. Если эти методы оказываются неудовлетворительными по критерию (11), то необходимо исследовать возможность применения автопрогнозов второй и третьей группы. Для этой цели предлагается использовать метод статистического моделирования [11]. Применительно к данной задаче суть метода заключается в следующем:

- определяется прогнозируемый вектор  $\vec{X}$ ;
- задается набор вероятностных характеристик  $\vec{Z}_x$ , исходя из вероятностных свойств  $\vec{X}$  и с учетом его нестационарности;
- создаются числовые генераторы случайных последовательностей, принадлежащих классам случайных процессов с заданным набором вероятностных характеристик  $\vec{Z}_x$ ;
- рассчитываются реализации  $\vec{X}(t)$  при заданных числовых значениях  $\vec{Z}_x$ ;
- проводится статистическая обработка реализаций  $\vec{X}(t)$  с целью получения оценок набора  $\vec{Z}_x$ ;
- для конкретного метода прогноза по  $\vec{Z}_x$  определяется оценка функционала  $\psi$  в (10);
- рассчитываются независимые реализации  $\vec{X}_i(t)$ , причем  $\vec{Z}_x$  может либо оставаться прежним, либо целенаправленно изменяться, имитируя нестационарность  $\vec{X}$ ;
- рассчитываются реализации прогностических значений  $\vec{X}(t_n)$

$$\vec{X}_{\text{пр}i}(t_y) = \tilde{\psi}[\vec{X}_i(t_n)], \quad (13)$$

где в качестве  $\tilde{\psi}$  используется ранее полученная оценка функционала  $\psi$  в (10);

— рассчитываются погрешности прогноза по независимым реализациям

$$\Delta \vec{X} = \vec{X}_{\text{пр}i}(t_y) - \vec{X}_i(t_y); \quad (14)$$

— оценивается выполнимость критерия (11) на основании статистической обработки (14).

Реализация метода статистического моделирования требует выполнения значительных объемов расчетов на ЭВМ. Целесообразно разработать специализированное программное обеспечение, позволяющее осуществлять гибкое управление такими расчетами. В настоящее время на кафедре измерительно-вычислительных си-

стем ЛГМИ разработан первый вариант такого программного обеспечения, имеющего модульную структуру и ориентированного на ЕС ЭВМ. Разработанное обеспечение составляет основу системы автоматического проектирования средств измерений с заданными динамическими погрешностями [12]. Опыт использования указанной системы показывает, что практически для любой из мерительной подсистемы с помощью метода статистического моделирования можно оценить погрешности на ее выходе, а затем исследовать их влияние на качество функционирования АПП ГМИ и АСУ в целом. Таким образом, статистическое моделирование позволяет обоснованно решить основной вопрос при проектировании АПП ГМВ: выбор оптимального метода прогнозирования с учетом погрешностей измерительной информации, вероятностных свойств прогнозируемых величин и общей схемы функционирования АСУ в целом.

Рассмотренные выше аспекты системного проектирования АПП ГМВ являются основой для определения целей и критериев эффективности подсистемы, генерации альтернативных вариантов и их сравнения на базе математических и имитационных моделей функционирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Толстобров Б. Я. Методика аппаратного прогнозирования метеорологических величин. — В сб.: Гидрометеорологическое обеспечение народного хозяйства. — Л.: ЛПИ, 1982, вып. 78, с. 93—102.
2. Зарецкий А. В., Ястребов В. С. Синтез системы управления необитаемым подводным аппаратом. — В сб.: Технические средства и методы изучения океанов и морей. Тез. докл. Всесоюз. совещ. (Геленджик, 22—26 апр. 1985 г.). — М., ИО АН СССР, 1985, с. 92.
3. Кунц Г., О'Доннел С. Управление: системный и ситуационный анализ управленческих функций. — М.: Прогресс, 1981, т. 1. — 496 с., т. 2. — 512 с.
4. ГОСТ 8.009-84. ГСИ. Нормирование и использование метрологических характеристик средств измерений. — М., Изд-во стандартов, 1985. — 152 с.
5. Кудрявая К. И., Серяков Е. И., Скриптунова Л. И. Морские гидрологические прогнозы. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 310 с.
6. Колмогоров А. Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей. — Изв. АН СССР, серия математическая, 1941, т. 5, № 1, с. 3—11.
7. Эффективность гидрометеорологического обслуживания народного хозяйства. — Л.: Гидрометеиздат, 1973. — 164 с.
8. Бокс Дж., Дженкис Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. — М.: Мир, 1974, вып. 1. — 406 с., вып. 2. — 197 с.
9. Саркисян С. А. и др. Теория прогнозирования и принятия решений. — М.: Высшая школа, 1977. — 351 с.
10. Чувев Ю. В., Михайлов Ю. Б., Кузьмин В. И. Прогнозирование количественных характеристик процессов. — М.: Сов. радио, 1975. — 398 с.
11. Шалыгин А. С., Палагин Ю. И. Прикладные методы статистического моделирования. — Л.: Машиностроение, 1986. — 320 с.
12. Абрамов В. М., Пушев А. С. Автоматизация разработок океанских логических датчиков с заданными динамическими погрешностями. — В сб.: Технические средства и методы изучения океанов и морей. Тез. докл. Всесоюз. совещ. (Геленджик, 22—26 апр. 1985 г.). М., ИО АН СССР, 1985, с. 18—19.

## СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Н. П. Смирнов, Ю. В. Сустанов. Основные научные достижения Ленинградского гидрометеорологического института и задачи развития исследований на современном этапе . . . . .	3
Л. Г. Качурин, В. Ф. Псаломщиков. Нетепловые электромагнитные поля — предвестники опасных природных явлений . . . . .	12
К. В. Кондратович. Совершенствование методов долгосрочного метеорологического прогноза по океаническому району — актуальная народнохозяйственная задача . . . . .	22
С. Г. Звенигородский, С. П. Смышляев. Об учете трансформации приземных газов в моделях загрязненности и трансграничного переноса выхлопов . . . . .	31
Л. Т. Матвеев. Глобальное поле облачности и синоптические вихри по наблюдениям с метеорологических ИСЗ) . . . . .	43
Д. Подгорски, Л. Влак. Адвективно-конвективная тенденция поля облачности по спутниковым данным . . . . .	52
В. И. Воробьев, И. Н. Русин. Повышение эффективности краткосрочного прогнозирования погоды за счет автоматизации . . . . .	65
А. П. Бобровский, С. И. Краско, А. Л. Скобликова, В. Г. Сирота, Л. Н. Хворостовский, П. П. Хлябич. Система методов контроля и охраны воздушной среды в условиях химического производства . . . . .	75
Л. А. Хандожко. Экономические аспекты метеорологического обеспечения народного хозяйства . . . . .	83
Л. Н. Карлин, Е. Ю. Ключков, С. И. Виленкин. Математическое моделирование формирования тонкой структуры океана . . . . .	93
А. В. Некрасов. Оценка ожидаемой трансформации приливного режима при сооружении приливных электростанций . . . . .	107
Ю. П. Дорониц, С. В. Котов. Моделирование гидрологических процессов шельфового моря в хозяйственных целях . . . . .	116
Ле Фыок Чинь. Фронтальные зоны на южном континентальном шельфе Вьетнама . . . . .	124
В. В. Коваленко. Стохастическое оценивание гидравлического режима одопропускных сооружений . . . . .	131
Н. Б. Барышников, Д. И. Исаев, Н. П. Плоткина. Гидравлические опротивления речных русел и каналов сложных форм сечения . . . . .	137
С. А. Чечкин, Г. И. Климов, К. К. Хазанович, Н. А. Бродская. Режим равней и состав грунтовых вод в зоне предприятий сложных фосфорных добрений . . . . .	145
В. А. Мальков, В. М. Соловьев. Внешняя среда как форма взаимовязи природы и общества . . . . .	155
В. М. Абрамов, В. А. Большаков, Б. Я. Толстобров. Методология прогнозирования автоматизированных систем прогнозирования гидрометеорологических величин . . . . .	165
	171

Сборник научных трудов, вып. 96

**ВОПРОСЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
В ЦЕЛЯХ ИНТЕНСИФИКАЦИИ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА**

Редактор *З. Б. Ваксенбург*

Корректор *С. В. Холина*

Обложка художника *Н. И. Кулагина*

---

Сдано в набор 13.03.87. Подписано в печать 05.10.87. М-2058:  
Формат бумаги 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага тип. № 2. Лит. гари. Печать высокая  
Печ. л. 10,6. Уч.изд. л. 10. Тираж 500 экз. Зак. 288  
Темплан 1987 г., поз. 267. Цена 1 р. 50 к.

ЛПИ имени М. И. Калинина. 195251, Ленинград, Политехническая ул., 29.

---

Типография ВСОК ВМФ.

---

ДК 551.5+551.46+556

Основные научные достижения Ленинградского гидрометеорологического института и задачи развития исследований на современном этапе. Смирнов Н. П., Сустанов Ю. В. Сборник научных трудов «Вопросы эффективности гидрометеорологических исследований в целях интенсификации народного хозяйства». Л., изд. ЛПИ, 1987, вып. 96, с. 3—12. (ЛГМИ).

Дается характеристика основных результатов научных исследований, которые проводились сотрудниками Ленинградского гидрометеорологического института за последние годы, в области метеорологии, океанологии и гидрологии, представляющих наибольший теоретический и практический интерес для различных отраслей народного хозяйства.

Библ. 13.

---

---

ДК 551.322.

Нетепловые электромагнитные поля — предвестники опасных природных явлений. Качурин Л. Г., Псаломщиков В. Ф. Сборник научных трудов «Вопросы эффективности гидрометеорологических исследований в целях интенсификации народного хозяйства». Л., изд. ЛПИ, 1987, вып. 96, с. 12—22. (ЛГМИ).

Выполнены исследования электромагнитных полей, генерируемых при возникновении опасных природных явлений (циклонов, землетрясений, снежных вихрей и т. п.). Рассматриваются вопросы их использования для прогностических целей.

Илл. 6. Библ. 10.

---

---

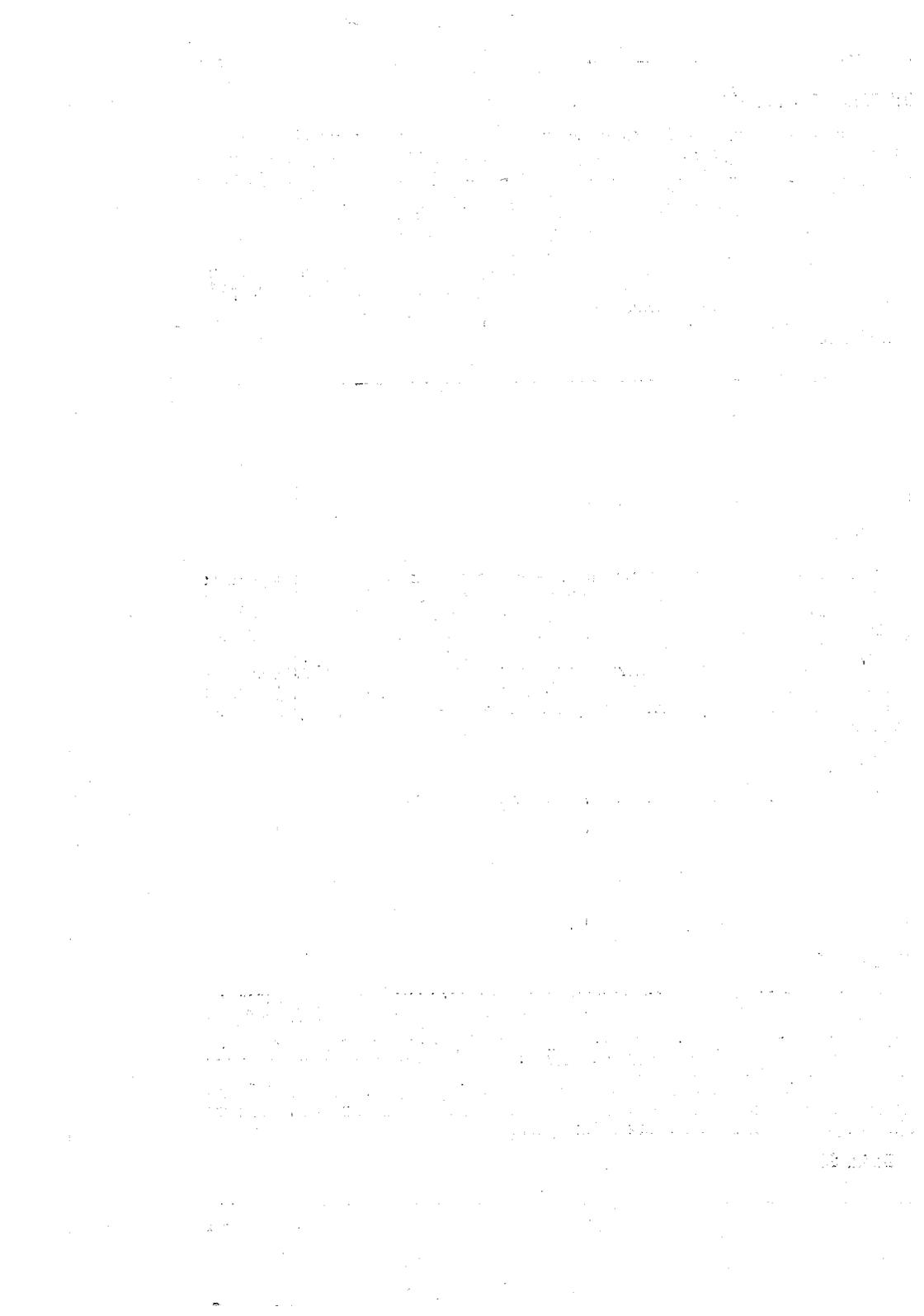
ДК 551.509

Совершенствование методов долгосрочного метеорологического прогноза по океаническим районам — актуальная народнохозяйственная задача. Кондратович К. В. Сборник научных трудов «Вопросы эффективности гидрометеорологических исследований в целях интенсификации народного хозяйства». Л., изд. ЛПИ, 1987, вып. 96, с. 22—31. (ЛГМИ).

Рассматривается система характеристик атмосферных процессов, обеспечивающая исследование метеорологической обстановки в районах океанического промысла и возможности мониторинга.

Библ. 28.

---



---

УДК 551.510.34

Об учете трансформации примесных газов в моделях загрязненности и трансграничного переноса выбросов. Звенигородский С. Г., Смышляев С. П. Сборник научных трудов «Вопросы эффективности гидрометеорологических исследований в целях интенсификации народного хозяйства». Л., изд. ЛПИ, 1987, вып. 96, с. 31—42. (ЛГМИ).

Рассмотрены механизмы, влияющие на поля концентраций примесных газов в тропосфере. В рамках одномерной фотохимической модели выполнены численные эксперименты по оценке интенсивности вымывания растворимых и реактивных в воде газов в облаках и осадках. Приводятся результаты модельных исследований стока химически активных радикалов на тропосферном аэрозоле.

Табл. 3. Илл. 3. Библ. 21.

---

УДК 551.576

Глобальное поле облачности и синоптические вихри (по наблюдениям с метеорологических ИСЗ). Матвеев Л. Т. Сборник научных трудов «Вопросы эффективности гидрометеорологических исследований в целях интенсификации народного хозяйства». Л., изд. ЛПИ, 1987, вып. 96, с. 43—51. (ЛГМИ).

С целью установления вытекающей из уравнения переноса вихря зависимости условий формирования циклонов и антициклонов от термической адвекции (горизонтальной бароклинности) проанализированы статистические данные известные из синоптического опыта закономерности образования, эволюции движения синоптических вихрей. В хорошем согласии с этими данными находятся результаты анализа глобального поля облачности, сведения о котором получены за 1971—1980 гг. с помощью метеорологических искусственных спутников Земли.

Табл. 1. Библ. 12.

---

УДК 551.501

Адвективно-конвективная тенденция поля облачности по спутниковым данным. Подгорски Д., Влчак Л. Сборник научных трудов «Вопросы эффективности гидрометеорологических исследований в целях интенсификации народного хозяйства». Л., изд. ЛПИ, 1987, вып. 96, с. 52—65. (ЛГМИ).

На основании теории распознавания движущихся образов описываются алгоритмы для вычисления адвективно-конвективной тенденции поля облачности в рамках метеотренда — сверхкраткосрочного прогноза погоды до 2 часов.

На основе реальных данных за 05.08.1985 г. показаны результаты предлагаемой методики оценки адвективно-конвективной тенденции для прогноза поля облачности, связанного с мезомасштабной конвективной системой (МКС).

Илл. 4. Библ. 7.

---

