



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Гидрологии суши

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: **Особенности формирования
годового стока на карстовых
водосборах**

Исполнитель: Абрамов Дмитрий Валерьевич

Руководитель: кандидат географических наук, доцент

Сикан Александр Владимирович

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

канд. геогр. наук., доцент Сикан Александр Владимирович

«7» июня 2018 г.

Санкт-Петербург
2018

Содержание

Введение	3
Глава 1. Характеристика природных условий исследуемой территории.....	6
1.2 Рельеф.....	7
1.3 Геологическое строение.....	8
1.4 Почвенный покров	10
1.5 Растительность	12
1.6 Климат	14
Глава 2. Анализ важных, в контексте данной проблемы, работ и методов	17
2.1. Особенности геолого-морфологического строения Ижорского плато ..	18
2.2 Особенности гидрологии Ижорского плато	23
2.3 Небольшое резюме.....	27
Глава 3. Исходные данные	29
Глава 4. Надстройка-программа «Гидрологический анализ»	32
4.1 Концепция	32
4.2 Особенности формата данных	33
4.3 Меню и принцип работы	34
4.4 Алгоритмы реализованных расчетов	41
4.4.1 Оценка водности года	42
4.4.2 Определение характерных дат весеннего половодья	43
4.4.3 Формирование таблиц расчетных характеристик половодья	46
Заключение	49
Список используемой литературы	54

Введение

При решении той или иной задачи, особенно если эта задача является «Определением особенностей формирования стока на карстовых водосборах», всегда стоит разбивать ее на несколько «задачек» более маленьких по своей сути, но таких же важных по своему содержанию. В данном случае, сама генеральная задача состоит в построении обоснованной гидрологической модели, способной определять следующие характеристики:

- экстремальные расходы (максимальные / минимальные),
- идентификация рисков развития неблагоприятных явлений (экологического толка / паводков и половодий)
- а также различные характеристики ресурсов водопотребления, с учетом особенностей формирования тех или иных явлений в условиях закарстованных водосборов.

При подобной постановке охватить весь карст мира не удастся сразу, описать все и везде не получится. Как писал классик карстоведения: «Явления карстообразования довольно широко развиты во всем мире. Сам по себе Карст – процесс химического и отчасти механического воздействия подземных и поверхностных внеусловых вод на растворимые проницаемые горные породы (карбонаты, гипс и ангидрит, соли, соду и другие). В результате возникают поверхностные, и подземные скульптурные, а при выпадении из раствора, обрушении — и аккумулятивные формы. Образование и разрушение подземных полостей может сопровождаться обвалами, провалами и даже местными землетрясениями. В широком понимании карст — это сами формы и процесс их образования». [1]

Из этого становится ясным, что для достижения какой-либо цели следует устремить свое внимание на такие закарстованные территории, которые находятся в примерно в «одном» месте, территориально не далеки. Поэтому в качестве «полигона» для исследований было выбрано Силурийское (Ижорское пла-

то), что находится на северо-западе Восточно-Европейской платформы и располагается в северной части Балтийской моноклизы, в зоне контакта между основными структурными элементами платформы: Балтийским кристаллическим щитом и Русской плитой. Выбрано оно было еще вот почему: «Особый интерес и актуальность проблемы формирования стока на Ижорском плато обуславливает то, что данная территория является основным объектов водоснабжения многих крупных городов вокруг Санкт-Петербурга, находящихся в благоприятных гидрогеологических условиях (Пушкин, Красное Село, Волосово, Гатчина, Кронштадт), имеющих централизованное водоснабжение подземными водами. Поселки (а их большинство) снабжаются питьевой и хозяйственной водой, главным образом, из одиночных буровых скважин и колодцев. Подземные воды широко используют для водоснабжения частные потребители» [2]

Особенности формирования стока будут проявляться как раз в специфическом поведении тех или иных типовых гидрологических величин и их распределение в пространстве и времени.

Основные цели настоящей работы:

- создание базы данных, посвященной информации на исследуемом объекте
- создание инструмента, позволяющего автоматизировать обработки, способного упростить процесс определения типовых гидрологических характеристик
- оценить тем или иным образом влияние карста на формирование стока на исследуемой территории.

В процессе исследований использовались методы математического анализа, методы географического анализа, результаты дистанционного зондирования.

В силу объемности задачи и ее важности, для обработки и анализа гидрологической информации, совместно с Алексеем Алексеевичем Никифоров-

ским¹, была разработана надстройка для среды Microsoft Office Excel: «Гидрологический анализ», которая позволяет манипулировать базами данных с гидрологической информацией и получения интересующих пользователя результатов (расчет типовых гидрологических характеристик, построение таблиц, рисовка графиков и пр.). Разработка осуществлялась в среде Microsoft Visual Studio на языке C#.

Работа состоит из четырех глав, введения и заключения.

В первой главе представлена краткая природная характеристика района исследования. Приведена основная информация о рельефе местности, ее геологии, почве, ее слагающей, растительности и климату территории.

Во второй главе будет проведен краткий обзор работ и методов, результаты которых не стоит забывать при исследовании данного объекта.

Третья глава посвящена сбору информации, для составления базы данных.

Четвертая глава будет посвящена основным обработкам, включенным в блок «Гидрологического анализа», и самой концепции реализации данной программы.

Заключение будет содержать выводы, полученные на основании результатов расчетов, реализованных в программе, и некоторый план на дальнейшие исследования.

Работа содержит 27 рисунков, 4 таблицы, 0 приложений и список используемых источников из 28 наименований. Общий объем работы 57 страниц.

¹ ООО НПО «Гидротехпроект», Валдай

Глава 1. Характеристика природных условий исследуемой территории

«Познать природу родного края можно либо
своими глазами, либо с помощью книги»

Ломоносов Михаил Васильевич (1711-1765)

1.1 Географическое положение

Рассматриваемая территория расположена на северо-западе Европейской части России между $60^{\circ}00' - 59^{\circ}00'$ с.ш. (протяжение около 110 км) и $28^{\circ}30' - 30^{\circ}40'$ в.д. (протяжение около 120 км) и занимает площадь ~ 5 тыс. км².

На рисунке 1.1 приведена карта-схема района исследования.

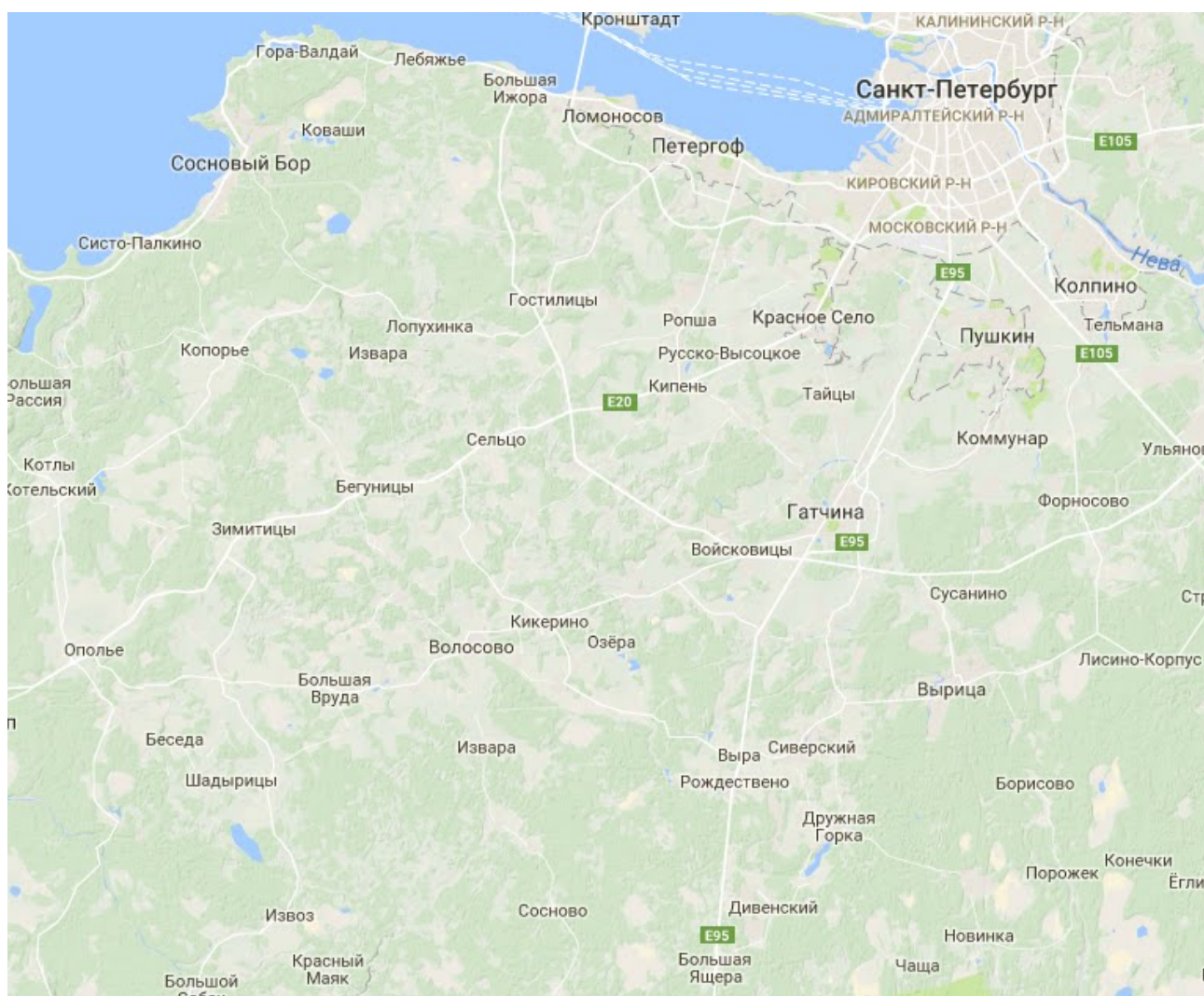


Рисунок 1.1 – схема района исследования

1.2 Рельеф

На рисунке 1.2 приведен высотный план местности исследования. Картинка построена в программной среде ArcGIS с использованием цифровой модели рельефа разрешением 1 арк секунда. [3]

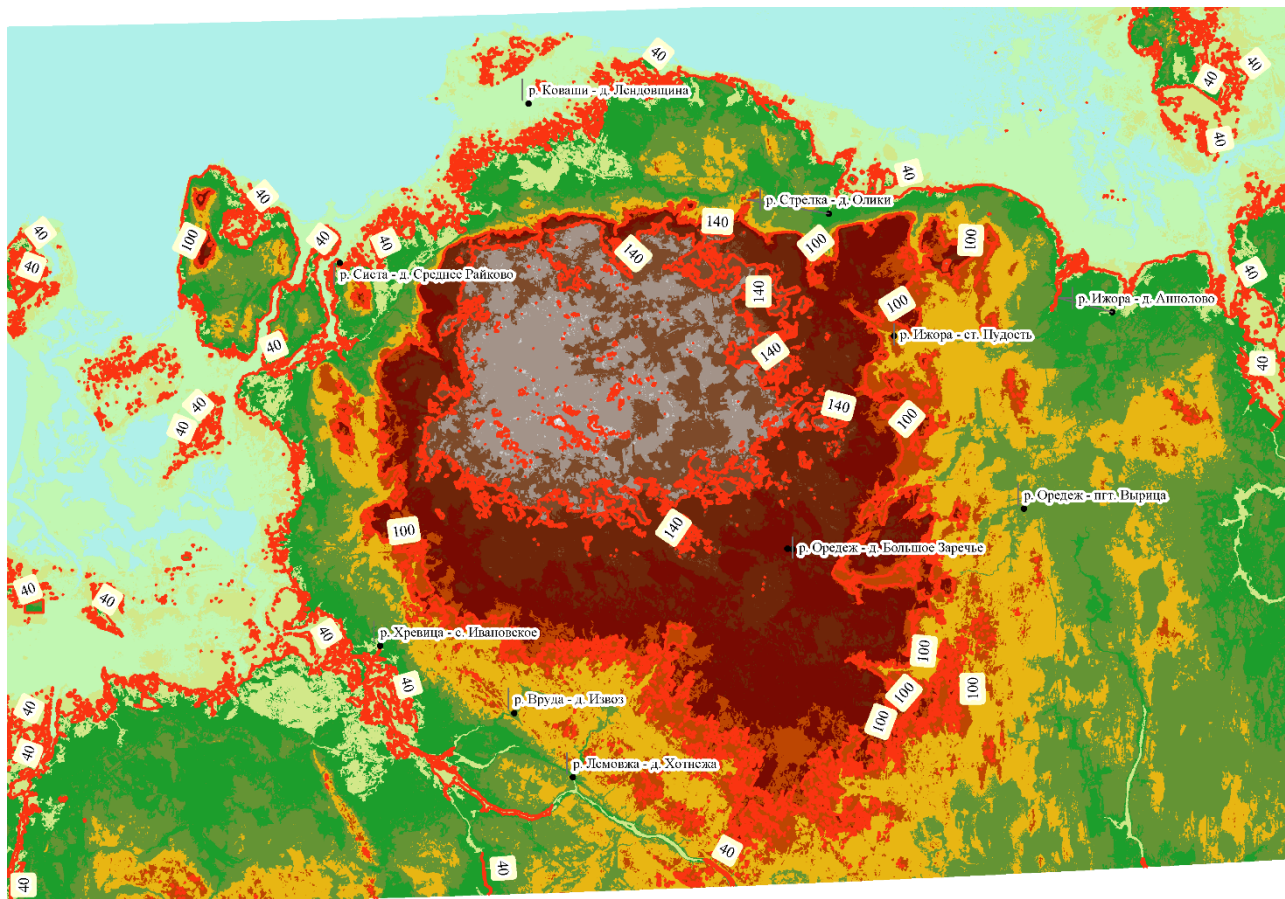


Рисунок 1.2 – План местности

Объект нашего исследования находится на западной части Силурийского (Ордовикского) плато. Он является наиболее обширным и приподнятым на территории Силурийского плато. Отметка «купола» составляет ~186 метров. Затем происходит равномерное уменьшение отметок высот по окружности, с центром в «куполе». Падение отметок до северного края Ижорского плато идет до той поры, пока не начинает прослеживаться крутой уступ (глинт), отделяющий плато от Предглинтовой низменности. В западной части уступ обрывистый, высо-

той до 30-50 м и более, в восточной части он выполаживается и не превышает 15 м.

1.3 Геологическое строение

На рисунке 1.3 приведена геологическая карта Ленинградской области (ЛО)

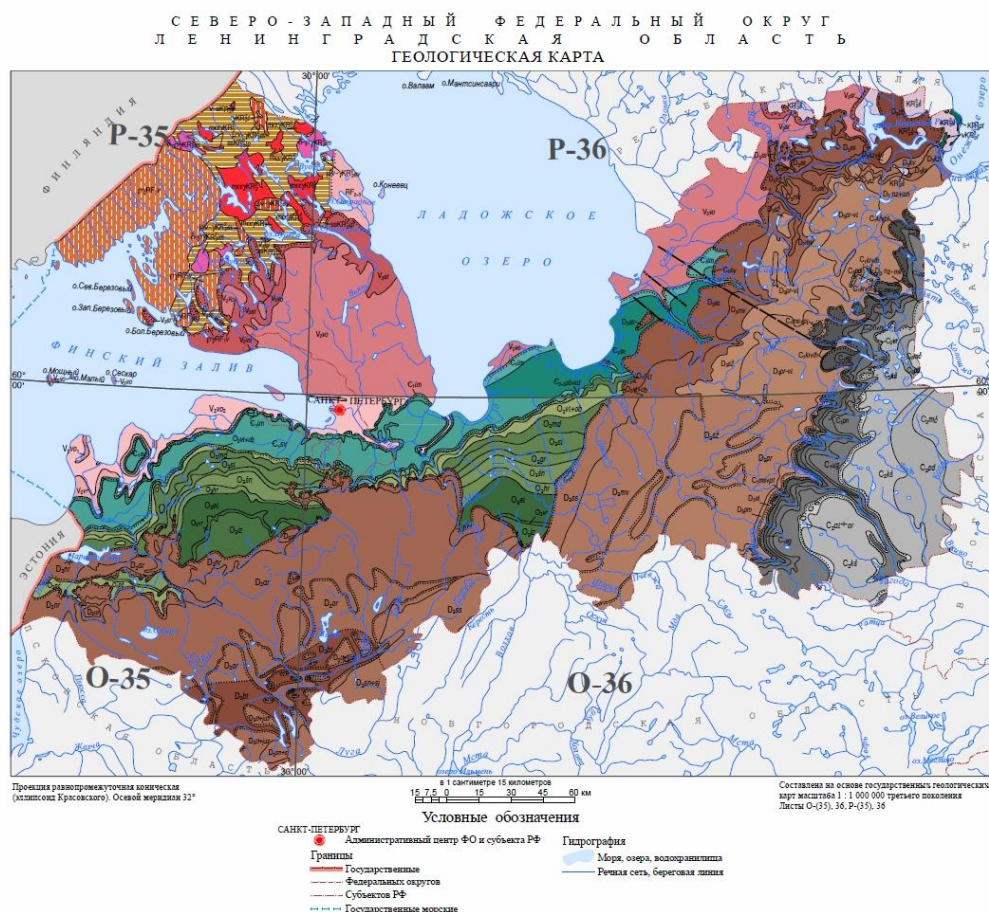


Рисунок 1.3 – Геологическая карта ЛО [4]

Территория, занимаемая Ижорским плато, находится на северо-западе Восточно-Европейской (Русской) платформы и располагается в северной части Балтийской моноклизы, в зоне контакта между основными структурными элементами платформы: Балтийским кристаллическим щитом и Русской плитой. В строении рассматриваемой территории традиционно выделяются два структурных этажа: нижний – кристаллический фундамент и верхний – осадочный че-

хол. Кристаллический фундамент Русской платформы представлен сложно дислоцированными и интенсивно метаморфизованными породами архея – раннего протерозоя, прорванными интрузиями различного состава. [5]

Осадочный чехол Ижорского плато сложен ордовикскими отложениями представленными песчаниками, известняками и доломитами общей мощностью 100 – 150 м. Характерна трещиноватость пород, типичен карст. В границах описываемой территории карстовыми процессами затронуты растворимые отложения от нижнего ордовика до среднего карбона. В состав закарстованных пород входят доломиты, известняки, мергели, гипсы, соленосно – карбонатные породы. По периферии возвышенностей обычно наблюдается обильное выклинивание их, что обуславливает повышенные значения модулей стока (на Силурийском плато — до 6 л/с км² (при зональном модуле — в 2,5 л/с км²). [6]

Плато характеризуется почти полным отсутствием гидрографической сети, так как разнообразные карстовые воронки, слепые долины и суходолы (с понорами в русле) сразу же поглощают дождевые и талые воды, переводя поверхностный сток в подземный. Растекание подземного стока происходит центробежно – во все стороны. Размеры карстовых воронок в поперечнике от 0.5 до 40 м, глубина их от 0.5 до 8 м, иногда до 15 м, средняя – плотность 2 – 3 на 1 км². Подземные формы карста представлены системой хорошо разработанных трещин, всякого рода пустотами и полостями. Наибольшие из них, так же как поверхностные формы, приурочены к тектоническим трещинам. Для областей распространения карста характерно большое изменение стока на небольших площадях, несовпадение поверхностных и подземных водосборов. [7]

1.4 Почвенный покров

На рисунке 1.4 приведена карта почв Ленинградской области

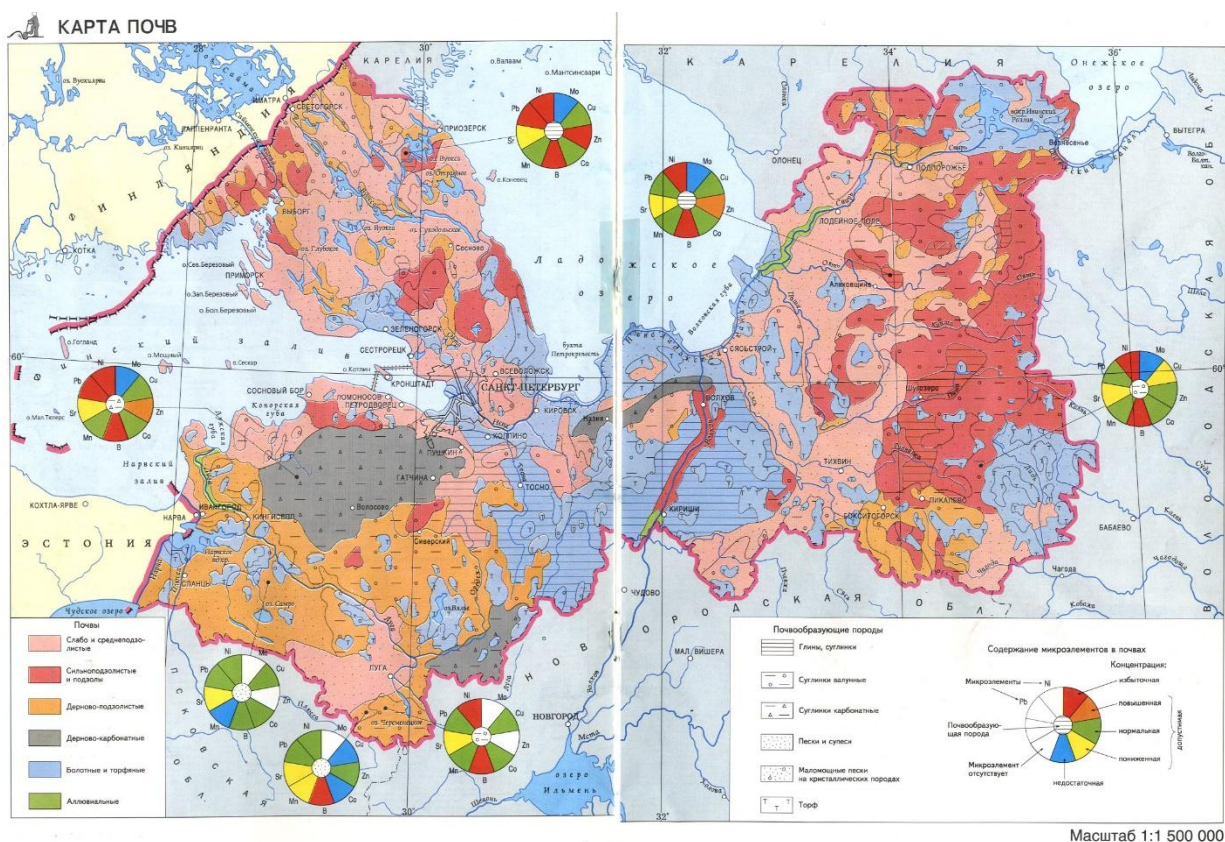


Рисунок 1.4 – Карта почв [8]

Основными процессами почвообразования на территории Северо – Запада являются подзолообразование и заболачивание, что обусловлено положением территории в зоне с холодным, влажным климатом, а также преобладанием лесной, преимущественно хвойной растительности.

Периодическая избыточность увлажнения и связанное с ней нарушение воздушного режима приводят к изменениям в строении почв и появлению в них особенных горизонтов

В связи с большими относительными высотами Ижорского плато, зимы здесь более суровые и многоснежные, вегетационный период короче, чем на окружающих его низменных равнинах. Почвообразующими породами ордовик-

ского плато являются четвертичные ледниковые и водно – ледниковые отложения. Трещиноватое сложение известняков, каменистость и хорошая структурность почв и пород позволяют поверхностным водам легко просачиваются на глубину от 10 до 30 метров до грунтовых вод. Водопроницаемость и скорость фильтрации различны на разных по степени карбонатности почвах и породах. Сильнокарбонатные почвы являются более сухими, менее оподзоленные карбонатные почвы способны удерживать больше влаги. На ордовикском плато в прошлом преобладали широколиственно – хвойные леса с участием дуба, клена и липы, с богатым травяным покровом. Сейчас леса сохранились лишь в виде мелких островков среди пашен, лугов и кустарников. Освоенность этой территории намного превышает среднюю сельскохозяйственную освоенность Ленинградской области.

Влагонасыщенность почв за теплый период сначала уменьшается и в июле – августе (реже в июле) падает до минимума. Затем начинается повышение влажности почвы вследствие увеличения количества осадков и одновременно уменьшение потерь влаги на испарение и транспирацию.

Влагозапасы в почве в зимнее время зависят от промерзания почвы. Влагонасыщенность почвы резко увеличивается за счет капиллярного подсосывания при ледообразовании, а также за счет парообразной воды, поднимающейся из теплых нижних слоев почвы к верхним холодным, где она конденсируется и замерзает.

Промерзание почвы на открытых (полевых) участках в среднем начинается в октябре – ноябре и, постепенно нарастая, достигает максимума в марте. Средняя глубина промерзания колеблется в пределах 30 – 60 см. В отдельные годы под мощным снежным покровом почва всю зиму может оставаться слабо промерзшей, а иногда даже талой.

Полное оттаивание почвы обычно наблюдается в конце апреля. В зависимости от характера зимы и начала весны даты оттаивания в отдельные годы могут значительно отклоняться от средних значений. [7]

1.5 Растительность

На рисунке 1.5 приведена карта растительности Ленинградской области

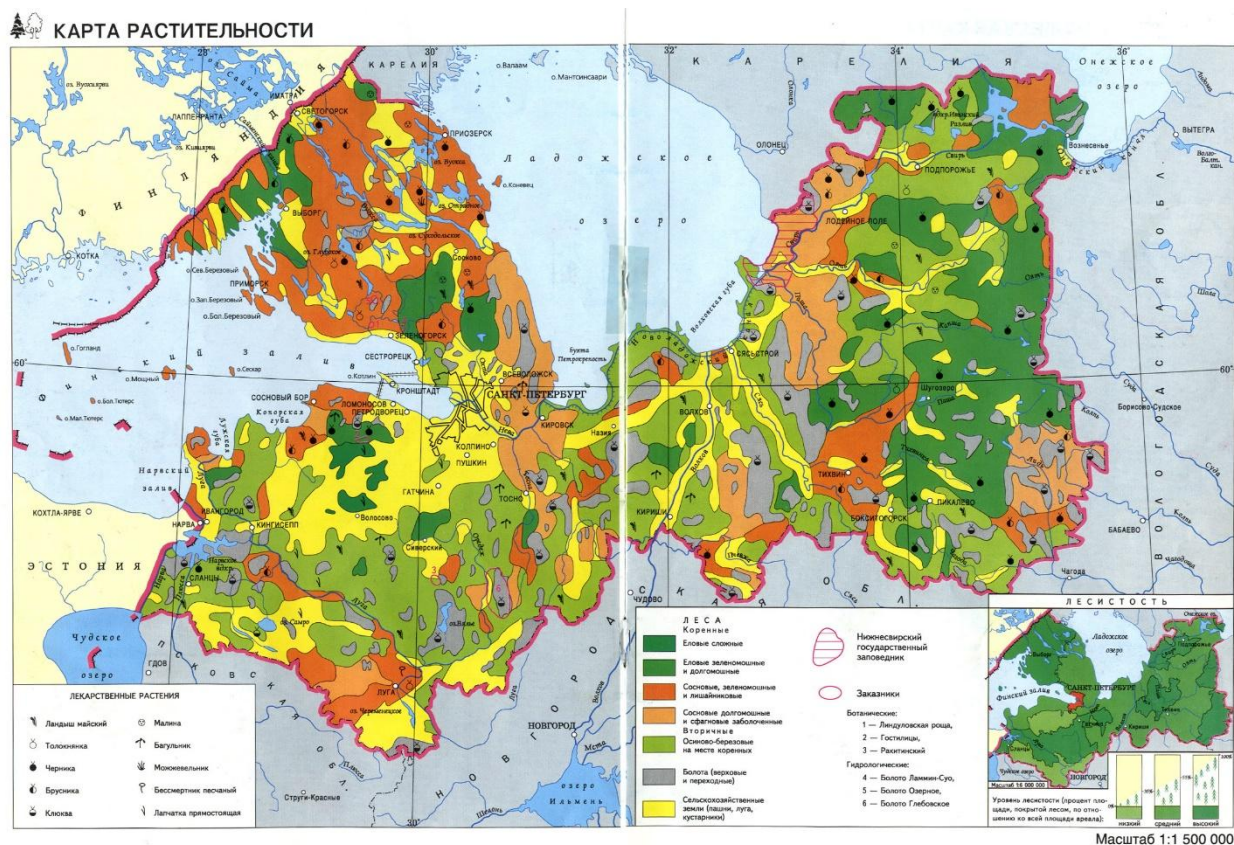


Рисунок 1.5 – Карта растительности Ленинградской области [8]

Большая часть территории Ижорского плато распаханно или превращено в различные сельскохозяйственные угодья. В настоящее время культурной растительностью занято около 75% площади. Оставшуюся территорию покрывают темнохвойные (еловые) леса и сосняк. Они приурочены к водоразделам с супесчаными и частично супесчаными почвами. Основная группа – ельники – зеленомошники – характеризуется хорошо развитым древостоем из ели и обильным напочвенным покровом из мхов. В северной части эта группа представлена в основном типом черничного ельника с моховым покровом и с обильным развитием черники в травяно – кустарниковом ярусе. Широко распространены за-

болоченные еловые леса (сфагновые ельники). На дне долин, на заболоченных почвах встречаются травяные ельники с густым и высоким травяным покровом. В условиях равнинного рельефа на плохо дренированных сильно оподзоленных почвах развиты ельники – долгомошники.

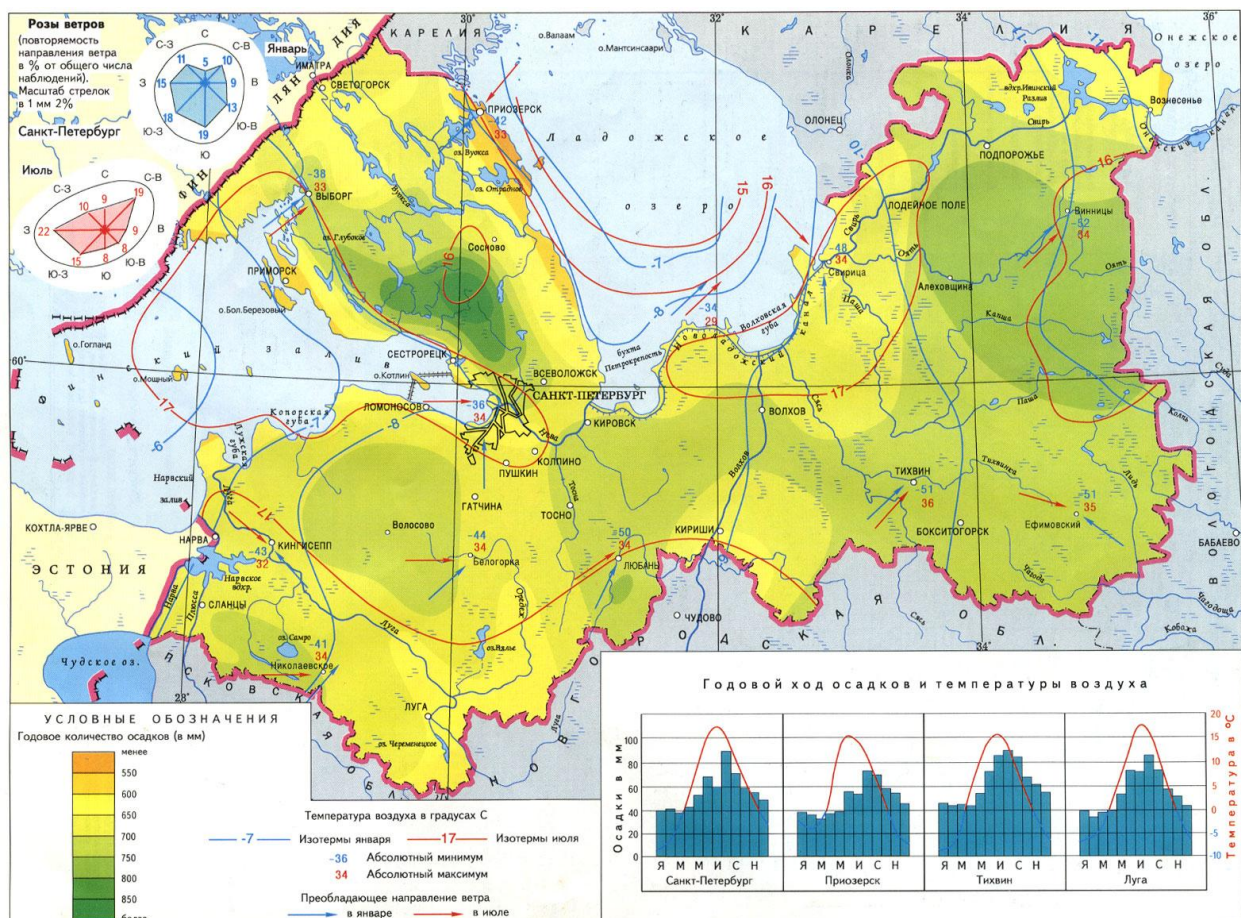
На более легких песчаных и супесчаных почвах широко распространены сосновые леса, образующие такие же сообщества, как и еловые. На песках развиты лишайниковые боры – беломошники с редким травяным покровом с преобладанием брусники и вереска. Нередко лес приобретает характер смешанного елово – соснового, с некоторой примесью березы.

Состав лиственных лесов представлен главным образом мелколиственными породами (березой, осиной, ольхой). На юго-западе значительна примесь широколиственных пород (липы, клена, дуба, ясеня, вяза).

Под влиянием вырубок и пожаров широко распространились производные березовые и осиновые леса, а также сероольховые заросли, в некоторых ландшафтах почти полностью заменившие коренные лесные сообщества. Производными (на месте ельников) являются и многие сосновые леса. [7]

1.6 Климат

На рисунке 1.6 приведена климатическая карта Ленинградской области



Масштаб 1 : 2 000 000

Рисунок 1.6 – Климатическая карта [8]

Значение годового радиационного баланса на Ижорском плато изменяется в пределах $32 - 35$ ккал/см², составляя 40 – 45% суммарной радиации. Период с положительным радиационным балансом длится от третьей декады марта до начала ноября. Наибольших значений радиационный баланс достигает в мае – июле, составляя $7.0 - 8.5$ ккал/см², т.е. 50 – 60% суммарной радиации, наименьших – в декабре – январе – $0.5 - 1.2$ ккал/см². Сумма отрицательного радиационного баланса в среднем равна $2 - 3$ ккал/см².

Средняя годовая температура на территории Ижорского плато колеблется от 2° до 4.5°C . Самыми холодными месяцами в году являются январь и февраль.

Средняя месячная их температура составляет примерно – 9°C. Самым теплым месяцем можно назвать июль, со средней температурой 16 – 17°C.

За начало весны принимается устойчивый переход средней суточной температуры воздуха через нуль. В рассматриваемой области весна начинается в конце первой декады апреля. Весна характеризуется частыми возвратами холодов, а иногда и кратковременными установлениями снежного покрова. К концу апреля вся территория освобождается от снежного покрова.

Лето, за начало которого принимается переход средней суточной температуры воздуха через 10°C, наступает в середине мая. В начале лета еще возможны заморозки.

Осень наступает приблизительно в конце первой – начале второй декады сентября. Продолжительность осени около двух месяцев.

Зима начинается в конце октября. Первая половина зимы характеризуется преобладанием ненастной погоды с выпадением дождя и мокрого снега. Обычно, в конце октября – начале ноября, появляется снежный покров, но он держится недолго. Приблизительно с середины декабря суточная температура воздуха переходит через – 5°C. На большей части территории этот период длится до середины марта.

Наша территория относится к зоне избыточного увлажнения. Это объясняется сравнительно небольшим приходом тепла и хорошо развитой здесь циклонической деятельностью, которая активно проявляется во все сезоны года. В среднем в год выпадает 550 – 750 мм осадков. Внутри года осадки распределяются неравномерно.

В начале зимнего сезона высота снежного покрова невелика – менее 10 см. Максимальной мощности он достигает в третьей декаде февраля – второй декаде марта. Запас воды в снеге распределяется по территории в соответствии с мощностью снежного покрова. Продолжительность устойчивого снежного покрова колеблется от 100 – 110 дней до 130 – 150 дней. Разрушение устойчи-

вого снежного покрова начинается в конце марта. Окончательно снег исчезает в первой – третьей декаде апреля.

Влажность воздуха. Упругость водяного пара наименьших значений достигает в феврале (2.4 – 2.8 мб). Начиная с марта, происходит увеличение влагосодержания воздуха. Максимальное значение упругость водяного пара достигает в июле (12 – 14 мб). В августе влажность начинает понижаться. В сентябре и октябре темпы понижения достигают 3 – 4 мб. Максимальное значение относительной влажности воздуха наблюдается в ноябре – январе. В это время приход солнечного тепла минимальный, испарение мало. Дефицит влажности наименьшие значения имеет в холодное время года. Особенно мал недостаток насыщения в декабре – феврале (менее 0.5 мб). С марта он постепенно увеличивается, достигая максимальных значения (5 – 7 мб).

Ветер. На рассматриваемой территории в течение всего года преобладают ветры южного, юго-западного и западного направлений. Повторяемость этих направлений, как правило, превышает 50%. При этом чаще всего они отмечаются в холодный период года. В летние месяцы повторяемость ветров юго-западной четверти несколько уменьшается, северной – увеличивается. Наибольшие по силе ветры наблюдаются в холодный период года. Максимальные скорости ветра приходятся на октябрь – декабрь (3 – 5 м/с). Наименьшие – июль – август (2 – 4 м/с).

Испарение с суши. Величина испарения на рассматриваемой территории затрачивает на себя 50 – 70% осадков. К сожалению, число пунктов, на которых производятся непосредственные измерения величин испарения с поверхности суши, и продолжительность этих наблюдений еще недостаточны для получения по ним расчетных величин испарения для рассматриваемой территории в целом. Поэтому величина годового испарения была рассчитана по методу А. Р. Константинова. По полученным данным можно заключить, что наибольшее испарение приходится на май – июль. Наименьшие величины наблюдаются в декабре – январе. [7]

«Природа так обо всем позаботилась, что
повсюду ты находишь чему учиться»

Леонардо да Винчи (1452-1519)

В силу значимости объекта вокруг него всегда был ажиотаж не только со стороны водопользователей, но и со стороны научного мира. Изучение подземных вод карстовых районов представляет собой особенно сложную задачу вследствие резкой неоднородности фильтрационных свойств водовмещающих карстующихся пород. Эта неоднородность еще более усиливается при наличии в районе зон тектонических нарушений, для которых характерны повышенная трещиноватость и закарстованность пород. При этом на локальных участках водопроницаемость пород может возрастать в десятки раз и более по сравнению с окружающим фоном. Расположение зон тектонической трещиноватости и развитие подземных карстовых форм определяют наличие в карстовых районах зон повышенной водопроницаемости, оказывающих значительное влияние на структуру подземных потоков и режим уровня карстовых вод. В этой главе речь как раз-таки и пойдет о работах, о результатах которых нельзя забывать при дальнейшем исследовании.

Все работы можно разделить на несколько ветвей:

- работы по классификации плато на различные зоны, обусловленные особенностями его геолого-морфологического строения
- работы, посвященные особенностям оценки подземного стока и его взаимодействию с поверхностными водами
- и работы, на опыт которых следовало бы обратить внимание при дальнейшем исследовании.

Помимо этой карты, в той же работе была представлена еще одна: схема формирования стока карстовых вод на Ижорском плато (рисунок 2.2)

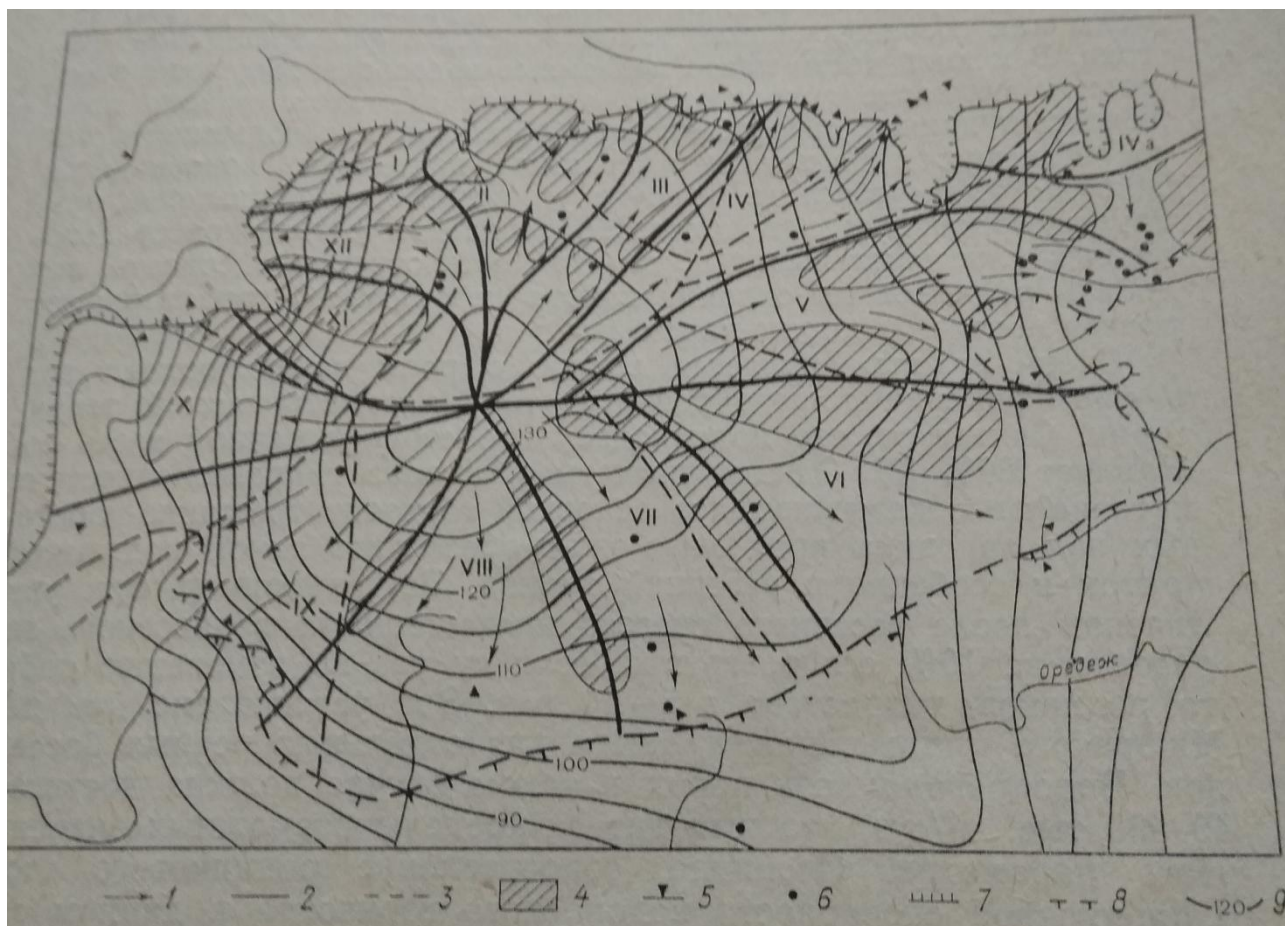


Рисунок 2.2 – Схема формирования стока карстовых вод на Ижорском плато [9]

Где: 1 – направление движения подземных вод; 2 – граница подземного бассейна по данным моделирования с указанием его номера; 3 – то же, по данным Северо-Западной гидрогеологической партии; 4 – участок относительно низкой проницаемости пород; 5 – гидрологический пост Северо-Западной гидрогеологической партии; 6 – наблюдательная скважина; 7 – Балтийско-Ладожский уступ (глинт); 8 – граница распространения девонских отложений; 9 – гидроизогипса.

Так же не стоит забывать о работе М.Ю. Никитина [10], в рамках которой командой исследователей для выявления особенностей грядового рельефа на Ижорском плато проводилась структурная съёмка в течение 2007 – 2011 годов,

на основании которой была построена карта Расположение грядовых систем и их соотношение с дизъюнктивами и залежами травертинов, рисунок 2.3

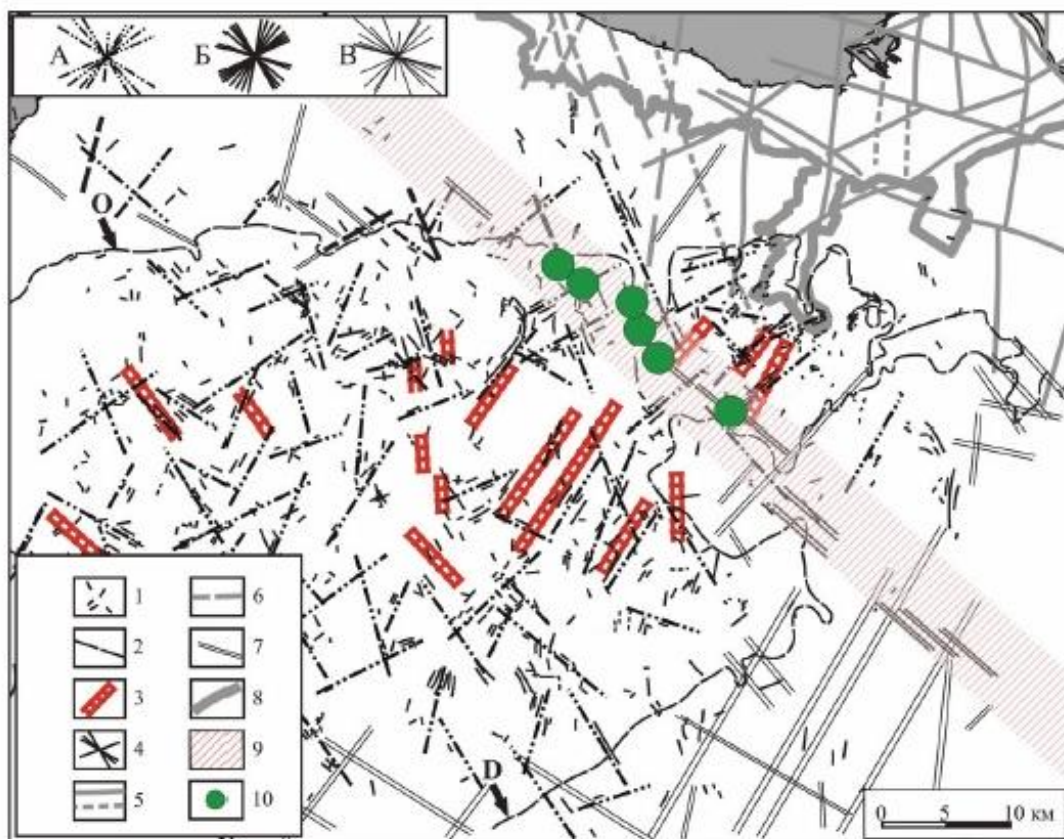


Рисунок 2.3 – Расположение грядовых систем [10]

На рисунке 2.3: 1 – Оси гряд; 2 – Северные границы выходов ордовика (О) и девона (D); 3 – Линейные зоны трещиноватости по Л. Г. Кабакову; 4 – Ориентировки линейных структур: гряд (А), разломов (Б), трещин (В); 5 – Разломы, выделенные по эманациям радона: достоверные и предполагаемые; 6 – Разломы, выделенные по элементам денудационного рельефа; 7 – Разломы, отраженные в рисунке гидросети; 8 – Административные границы Санкт-Петербурга; 9 – Зона генерации травертинов; 10 – Залежи травертинов.[10]

Еще в работе [11] путем анализа цифровых моделей рельефа были выделены речные структуры, которые можно отнести к структурам линейных трещиноватых разломов (рисунок 2.4), по направлениям которых можно предпо-

ложить о наличии нескольких генеральных разломов, по которым формируется основная разгрузка грунтового стока

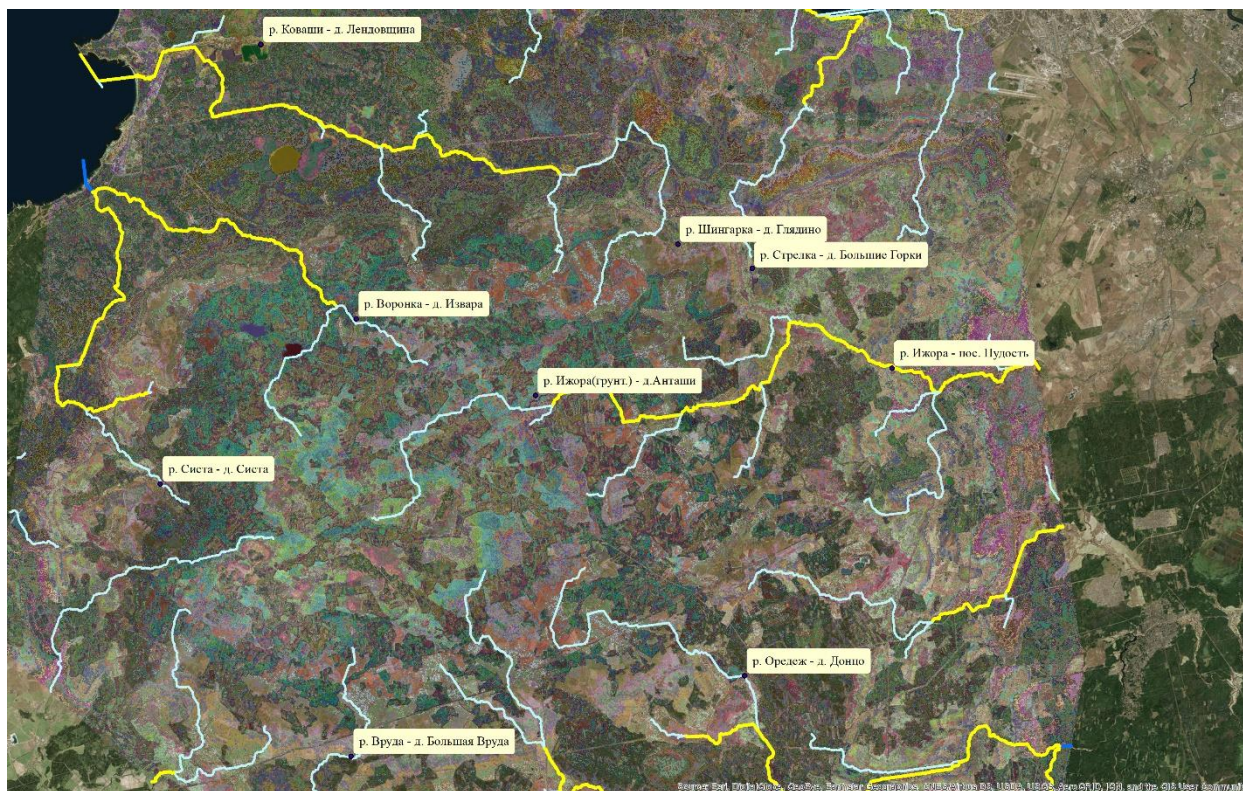


Рисунок 2.4 – стоковые структуры на Ижорском плато [11]

Подводя некоторый итог вышесказанному, напрашивается следующий вывод:

Предварительно Ижорское плато можно разбить на как минимум три участка: северо-восточный (голубая граница), окружной (зеленая граница) и центральный (желтая граница) (рисунок 2.5), сделанный с помощью программы Google Earth [12]

модели рельефа, как основу для каких-либо идентификаций, связанных с рельефом местности.

2.2 Особенности гидрологии Ижорского плато

Из-за особенностей геологического строения и гидрогеологических условий территории, а также ее орографии, на Ижорском плато формируется напорное питание рек. Так же для карстовых районов характерно различие инфильтрационных свойств пород по площади и в разрезе, что приводит к большой пространственной изменчивости инфильтрационного питания и уровня режима подземных вод, что ограничивает применение гидрогеологических способов оценки подземного стока. В таких условиях существенно возрастает значимость гидрометрической информации, как непосредственно для определения комплексного гидролого-гидрогеологического метода, так и для различных гидрогеологических расчетов по оценке и обоснованию эксплуатационных запасов воды. Принципиальная возможность оценки подземного стока карстовых районов комплексным гидролого-гидрогеологическим методом определяется их структурно-морфологическими особенностями, а также характером взаимодействия речных и подземных вод. [13]

В данной работе рассматривался лишь небольшой объем информации: данные стационарных наблюдений на постах Госкомгидромета, а также результаты экспедиционных гидрографических обследований отдельных рек в 1966-1972 гг. и др. По ним строились различного рода зависимости речного и родникового стока от уровней подземных вод (рисунок 2.6 (а, б))

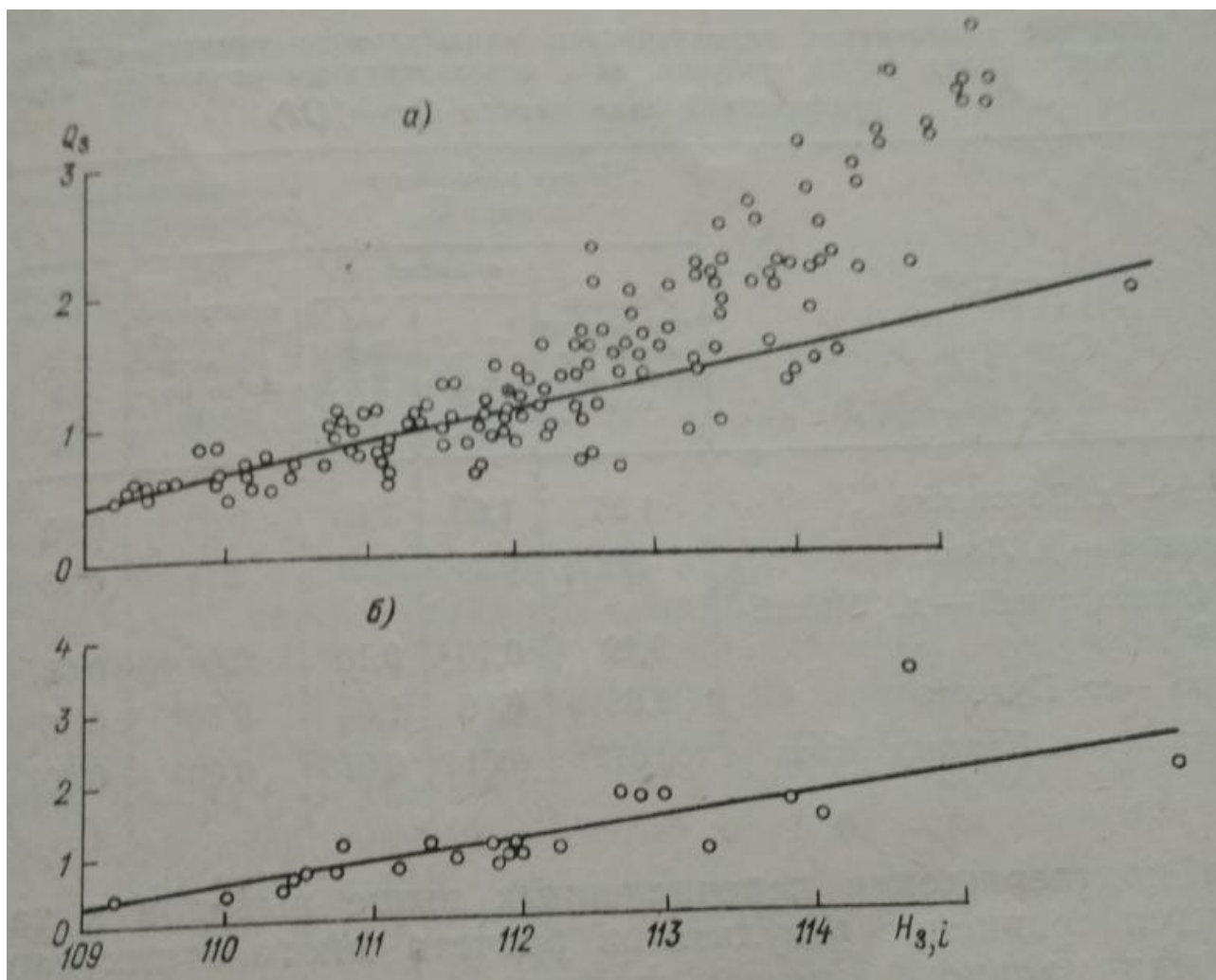


Рисунок 2.6 – Обобщенная зависимость минимального зимнего стока р. Ижоры у ст. Пудость от уровней подземных вод [13]

На рисунке 2.6 зависимость – а зависимость по всей совокупности зимних расходов воды за период наблюдений, б – по опорному ряду.

Анализ графиков, аналогичных построенным на рисунке 2.6 для объектов с различной водностью, позволил сделать следующие выводы:

- все графики имели расчетный характер только для крупнодебитовых родников и карстовых рек. Для малodeбитовых родников разброс точек очень велик, а в ряде случаев трудно выявить даже тенденцию связи.

- использование всей совокупности зимних расходов воды для построения графиков трудоемко, может обусловить разброс точек и частотно-нелинейность связи, особенно в области больших значений за счет включения

информации на начало сработки запасов подземных вод, когда участвует сток из более динамичной части разреза.

Основными выводами же той работы было то, что приемы характеристик подземного стока, основанные на построении графических зависимостей по совокупности данных за многолетний период с применением различных аналогов, в значительной степени снизили случайные погрешности исходной информации. Однако в целом оценка значений подземного стока для отдельных объектов и участков территории имела более низкую точность, чем при гидрологических расчетах по стандартной программе по данным стационарных наблюдений. При определении подземного стока для отдельных участков и в целом по территории возможно возникновение систематической погрешности в сторону занижения значений вследствие недоучета отдельных водопроявлений: мелких родников, пластовых выходов, высачиваний подземных вод.

В качестве финального заключения было сказано о необходимости привлечения большего количества информации о режимах родников, уровнях подземных вод с привлечением более полного объема гидролого-гидрогеологической информации, чем имело на тот момент.

В работе французских ученых [14], было произведено моделирование стока карстовой системы Ларошфуко-Тувр. Авторами отмечался особенный интерес к данной системе непосредственно с точки зрения модельера, так как процессы потерь и добавки в сток на карстовых водосборах могут быть учтены в модельном подходе.

Моделирование было осуществлено на французской модели типа «черный ящик», GR4J. Для получения результатов внутри модели был добавлен дополнительный блок, учитывающий потери стокообразования, связанные с процессами карстовых явления.

В качестве вывода авторы отметили положение о том, что лучшим способом описать карстовый резервуар является линейная модель накопления / сбрасывания карстового резервуара.

$$Q = -\frac{dK}{dt} = \alpha \cdot K^p \quad (2.1)$$

Где α – константа истощения резервуара, p – степень истощения резервуара, K – заданный уровень резервуара

Также в работе [11] был представлен на рассмотрение вопрос, который позволяет взглянуть на механизм движения вод в пористой среде в ином свете. Основным фактором, согласно изложенной там позиции, является определение закона сопротивления в системе уравнений сохранения движения, приведенной ниже в тензорной нотации:

$$\frac{\partial h_c v_k}{\partial t} = -\frac{h_c}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial x_k} p - \delta_{3k} \cdot g \cdot h_c + F(v_k) \quad (2.2)$$

Тут v_k – компоненты скорости массового движения в пористой среде, δ_{3k} – символ Кронекера, g – ускорение свободного падения, p – давление сплошной влаги, включая влияние всасывающего давления почвогрунтов, ρ – плотность жидкости, $F(v_k)$ – объемная сила, характеризующая сопротивление движению, выраженная как закон сопротивления. Для пористой среды, соответствующей строению макротрещиноватым структурам, например карста, получался следующий закон сопротивления:

$$F(v_k) = -f(m, v_k) v_k = -f(m) \cdot v_k^\alpha \quad (2.3)$$

Где m – мощность «фильтрационного» потока в карровой структуре или в разломе карста, α – некоторая степень, характеризующая нелинейность потока.

Также хотелось бы упомянуть в этом разделе о работе М. Л. Маркова, посвященной вопросу взаимосвязи поверхностных и подземных вод в речных бассейнах [15]. Основные положения, которые можно оттуда подчерпнуть, это возможность сопоставления приращения расходов воды с приращением длины элементов гидрографической сети при увеличении площади водосбора (или длины реки) замыкающего створа в однородном гидрогеологическом районе.

«Приращение расхода воды по длине рек изменяется в течение года. На одной и той же реке с ростом площади водосбора в одну фазу водности оно

возрастает с большей интенсивностью, а в другую - с меньшей. Влияние времени добегания и трансформация гидрографа стока по длине рек не оказывают на это существенного влияния, если за расчетный интервал времени принять декаду или месяц. Поэтому правомерно предположить, что при одинаковых (синхронных) водоотдаче снега на водосборе или выпадении дождя несинхронное изменение речного стока в разных звеньях речной сети происходит за счет различного участия в нем подземных вод, т.е. подземного питания рек.» [15]

2.3 Небольшое резюме

Данные работы нельзя было не упомянуть при начале исследования особенностей формирования стока на карстовых водосборах. Результаты, приведенные в данных работах, дают понять, что стандартными методами не удастся описать ровным счетом практически ничего. Требуется свежий подход, как в осознание физических процессов стокоформирования, так и в вопросе, который касается непосредственно аккумуляции данных.

Для подобной сложной реализации единственное верное решение представляется в виде программы, обладающей элементами ГИС с интерфейсом математического моделирования. В работе [16] были отмечены основные проблемы, которые закрываются проектом, имеющим архитектуру базы данных, а именно:

- каждая команда исследователей должна иметь свой уникальный набор данных
- эти данные должны быть доступны для любого участника в любой момент времени
- у всех участников проекта должен иметься одинаковый набор данных

К этому списку можно добавить также возможность расширения базы данных и возможность сразу произвести какие-либо типовые расчеты гидрологических характеристик.

Нельзя упускать из внимания и насыщенность данных, вкупе с их достоверностью и адекватностью. О сборе информации для исследования и пойдет речь в следующей главе.

“Если тебе не нравится то,
что ты получаешь, измени то,
что ты даёшь”

Карлос Кастанеда (1925 – 1998)

Для определения особенностей влияния карста на сток в регионе Ижорского плато были выбраны данные по 10 постам на восьми реках, берущих свое начало на территории Ижорского плато. Для попытки охватить всю территорию были выбраны посты, которые зонально покрывают всю территорию объекта исследования. Схема расположения постов представлена на рисунке 3.1. Рисунок выполнен с помощью программы Google Earth [12]



Рисунок 3.1 – Схема расположения постов

По данным постам были получены данные о среднесуточных расходах за период лет наблюдений. Для этого использовалась информация, приведенная в Ежегодных данных о режиме и ресурсах поверхностных вод суши по соответ-

ствующим годам, а именно: 1969 [17], 1972 [18], 1973 [19], 1982 [20], 1984 [21], 1987 [22].

К сожалению, подобный способ получения информации занимает очень много времени. Для увеличения объема базы данных по этой территории, с помощью интернет ресурса АИС ГМВО [23], были полученные дополнительные сведения за период с 2008 по 2015 года. В сводной таблице 3.1 приведен полный список постов и лет наблюдений, по которым удалось получить информацию на данный момент.

Таблица 3.1 – сводная таблица гидрологической информации

Объект	WGS 84		L _{устье} , км	F, км ²	F _{карст} , км ²	Использованный период наблюдений
	З.Д.	С.Ш.				
р. Коваши.д. Лендовщина	29.244866	59.897900	16.0	505	88.0	1969, 1972, 1973, 1982, 1984, 1987, 2008-2015
р. Стрелка - д. Олики	29.913477	59.759667	19.4	94	23.2	1972, 1973, 1982, 1984, 1987
р. Систа - д. Среднее Райково	28.806138	59.735691	14.0	573	-	1969, 1972, 1973, 1982, 1984, 1987, 2008-2015
р. Оредеж - пгт. Вырица	30.319691	59.414084	124	920	236	1969, 1972, 1973, 1982, 1984, 1987, 2008-2015
р. Оредеж - д. Большое Заречье	29.799420	59.380627	186	-	-	1969, 1972, 1973, 1982, 1984, 1987, 2008-2013
р. Старая Оредеж - д. Большое Заречье	29.787948	59.381114	1	-	-	1969, 1972, 1973, 1982, 1984, 1987, 2008-2013
р. Лемовжа - д. Хотнежа	29.292288	59.130549	3	948	164	1969, 1972, 1973, 1982, 1984, 1987
р. Хревица - с. Ивановское	28.873901	59.286691	3	316	-	1969, 1972, 1973, 1982, 1984, 1987, 2008-2015
р. Вруда - д. Извоз	29.167749	59.206100	17	544	77	1969, 1972, 1973, 1982, 1984, 1987, 2008-2015
р. Ижора - ст. Пудость	30.047379	59.617637	-	103	-	1972
р. Ижора - д. Аннолово	30.539931	59.632185	29	784	144	1982, 1984, 1987, 2008-2015

В таблице приведены следующие величины: в столбиках З.Д. и С.Ш. – координаты постов, L_{устье} – расстояние от устья до поста, км, F – площадь водосбора в этом посту, км², F_{карст} – площадь водосбора, находящаяся на карстующемся пространстве, с которой не происходит поверхностный сток, км². Информация о площади водосбора взята из гидрологических ежегодников.

Так как подход, используемый при построении логики работы программы, подразумевает определенную структуру данных, подаваемых на вход, ин-

FileHomeInsertPage LayoutFormulasDataReviewViewDeveloperAdd-insHelpTeamUniversal Document ConverterSearch

CutCopyFormat Painter

B I U | **AB** | | | | | | | | | | | | |

ClipboardFontAlignmentNumberStylesCellsEditing

AA69

Book1 - Excel

NormalBadGoodNeutralCalculat...
Check CellExplain...InputLinked CellNote

AutoSumFillSort & FindFilterSelect

1972												
Range	Frequency	Major	Angers	Mail	Items	Items	Average	Corrected	Overlaps	Hodges	Devil	
1	1.08	0.76	0.82	1.71	10	2.12	1.37	0.87	0.83	1.01	1.28	2.39
2	1.02	0.76	0.76	1.66	8.62	4.69	1.4	0.84	0.76	1.24	2.22	2
3	1.12	0.8	0.8	1.6	9.22	4.8	1.44	0.84	0.83	0.88	1.05	4.7
4	1.24	0.82	0.81	1.68	4.43	2.44	0.84	0.84	0.83	0.88	1.16	3.31
5	1.02	0.82	0.89	1.84	1.84	1.84	0.85	0.85	0.85	1.40	2.21	5
6	1.17	0.82	0.93	1.92	4.84	3.22	1.71	0.87	0.92	0.98	1.27	3.28
7	1.03	0.84	0.81	1.52	2.49	1.37	0.87	0.87	0.89	2.06	4.81	8
8	1.28	0.84	0.92	2.05	5.93	2.61	1.6	0.87	0.87	1	1.25	4.65
9	1.31	0.84	0.94	2.38	11	2.11	1.45	0.82	0.87	1.02	1.28	4.39
10	1.02	0.86	0.91	2.1	9.93	5.27	1.6	0.82	0.89	1.02	1.28	4.39
11	1.27	0.82	0.84	1.79	8.54	2.17	1.36	0.91	0.89	1.02	2.09	4.28
12	1.23	0.84	0.86	1.52	7.66	2.49	1.37	0.87	0.89	1.02	2.09	4.28
13	1.05	0.8	0.76	2.64	6.81	2.23	1.3	0.91	0.84	1.1	2.74	5.02
14	1	0.84	0.84	4.7	6.13	2.39	1.24	0.87	0.86	1.04	2.74	5.17
15	1.08	0.86	0.84	1.74	2.29	1.27	0.87	0.86	1.1	2.39	5.17	
16	1.07	0.84	0.87	1.19	2.98	2.59	1.21	0.82	0.86	1.18	2.59	5.17
17	1.03	0.84	0.83	1.67	2.89	1.27	0.78	0.86	1.18	2.59	5.17	
18	0.86	0.81	0.7	1.5	1.42	3.9	1.18	0.84	0.98	1.18	2.18	5.18
19	0.89	0.73	0.88	0.63	7.24	3.27	1.11	0.81	0.88	1.14	1.89	4.83
20	1.02	0.82	1.04	44.2	4.42	3.47	1.08	0.81	0.93	1.14	1.39	4.53
21	1.03	0.8	1.24	1.23	5.88	2.37	1.08	0.81	0.95	1.14	1.08	4.93
22	1.03	0.73	1.48	36.1	5.58	2.19	1.11	0.81	0.95	1.08	1.11	4.33
23	1.02	0.85	1.69	22	4.86	1.09	0.83	0.9	1.08	1.27	4.41	23
24	1.03	0.72	1.66	19	4.41	1.87	0.98	0.83	0.92	1.2	1.18	4.88
25	1.04	0.79	1.58	16.1	4.21	1.89	1.01	0.83	0.92	1.28	1.69	4.21
26	0.95	0.72	1.34	14.4	4.35	1.89	0.89	0.83	0.92	1.42	1.62	3.99
27	0.98	0.68	1.23	13.1	4.68	1.52	0.96	0.85	0.94	1.75	0.98	3.71
28	0.84	0.57	1.23	13.2	3.51	1.22	1.03	0.83	0.99	1.18	0.88	3.84
29	0.79	0.67	1.42	12.1	2.39	1.42	0.84	0.89	0.89	1.61	1.31	3.19
30	0.79	0.79	1.84	11	2.35	1.34	0.87	0.89	0.89	1.81	2.84	3.84
31	0.81	1.88	1.23	5.23	0.82	0.87	1.39					2.68

1984											
Range	Frequency	Major	Angers	Mail	Items	Items	Average	Corrected	Overlaps	Hodges	Devil
1											

Такое расположение является одним из главных условий корректной работы программы. Об этом речь пойдет далее, в четвертой главе.

Глава 4. Надстройка-программа «Гидрологический анализ»

«Мы строили, строили
и, наконец, построили»

Эдуард Успенский, повесть-сказка: «Крокодил Гена и его друзья» 1966

Данная надстройка является фрагментом проекта, создающегося в ООО НПО «Гидротехпроект» и разрабатывается совместно с А. А. Никифоровским

4.1 Концепция

К 2018 году технологии вычислительных машин шагнули далеко вперед. Еще в относительно недавнем, по меркам гидрологии, прошлом: 1940-1950-х годах, вершиной производительности был компьютер под названием Марк-I, способности которого по сегодняшним меркам просто невозможно представить, в силу их скромности.

Сейчас же каждый рядовой пользователь имеет в своем распоряжении персональный компьютер, обладающий таким функционалом, что зачастую полностью не задействуется.

Для примера не раскрытого функционала возьмем одно приложение, разработанное компанией Microsoft. Я говорю о пакете продуктов Microsoft Office, в частности, Microsoft Office Excel.

Первично разрабатываясь, как программа для работы в офисе, Excel даже и не мог представить того, что станет неотъемлемой частью в исполнении заданий в областях, совершенно отличных от офисной жизни (Гидрология, привет!).

Все это потому, что функционал, к которому позволяет обратиться данная программа, практически снимает любые ограничения при выборе круга задач,

которые в нем можно решать. Вкупе со специальными приемами программирования ограничения исчезают совсем.

Не сложно догадаться, как по выше сказанному, так и по введению данной работы, что речь идет о возможностях реализации надстроек в среде Microsoft Office Excel.

Но почему именно Excel, почему не отдельное приложение? Ответ на этот вопрос весьма прост: большинство гидрологической информации хранится как раз в файлах формата .xls (.xlsx) (Excel). Да, существуют специфические архивы NetCDF, но они с помощью приемов программирования легко конвертируются в заведомый Excel.

Именно из-за популярности, из-за универсальности и функциональности, и в конце концов из-за общей осведомленности о том, как нажимать кнопки в Excel, был выбран формат создания надстройки для этой среды.

4.2 Особенности формата данных

По сути своей надстройка будет представлять собой инструмент, предназначенный для реализации заранее прописанных алгоритмов к различным массивам данных, представленных в определенной форме.

Для анализа была составлена база данных в файле Excel. В дальнейшем планируется вынос базы данных на отдельный сервер, поэтому реализация получения данных с сервера прописывается в надстройке уже сейчас

Особая форма представления является обязательным условием потому, что, например, при анализе среднесуточных расходов воды, чтобы принять к обработке один год, программа будет проверять наличие данных относительно ячейки-якоря – красной ячейки, вычисляемой для каждого листа с определенным шагом по вертикали и горизонтали, относительно нее, в клеточках синего цвета, будет проверяться наличие данных. В противном случае заноситься информация не будет. Схема выделения с листа приведена на рисунке 4.3

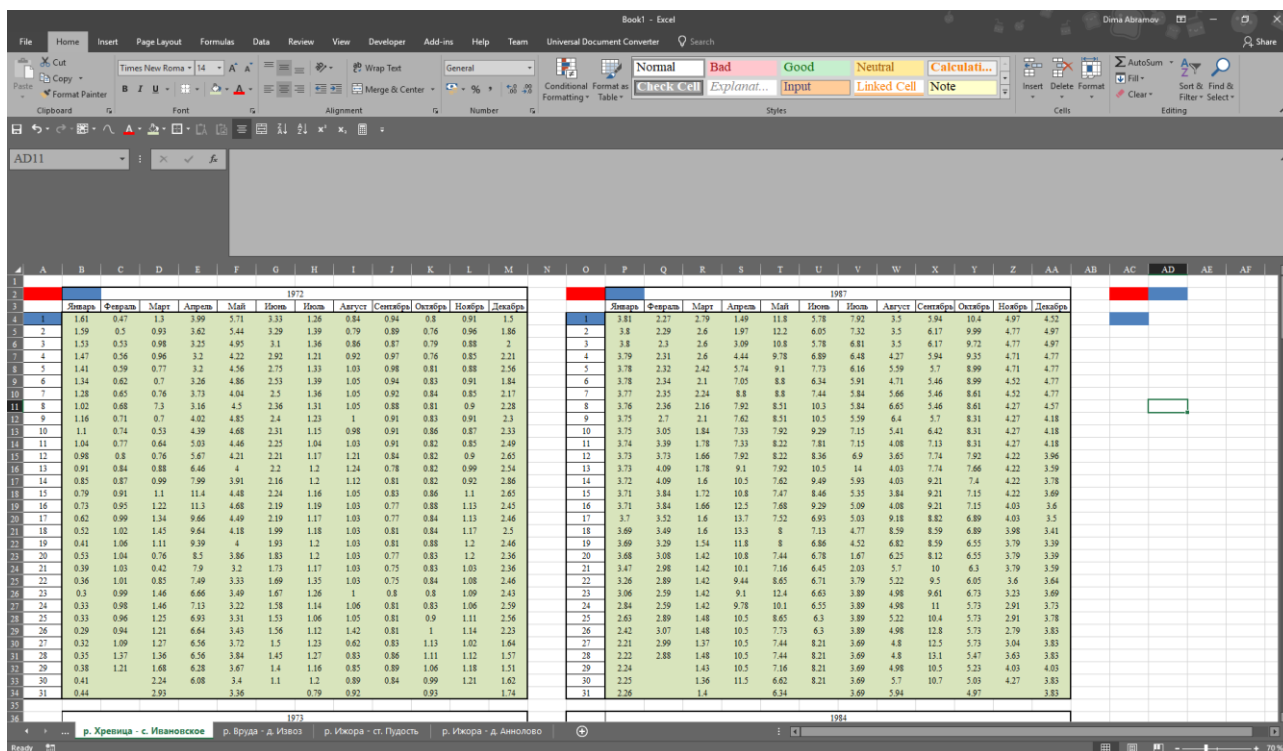


Рисунок 4.3 – выделение данных на листе

После этого удовлетворяющий условию квадрат (зеленоватый цвет) записывается в память в качестве массива, к которому в дальнейшем уже можно обращаться.

К сожалению, возможность реализации кросс-платформенности и совместимости с разными версиями Excel непосредственно самой надстройки не доведено до состояния релиза, поэтому дальнейшие рисунки с меню программы будут приведены в среде Microsoft Office Excel 2007

4.3 Меню и принцип работы

Само меню надстройки «Гидрологический анализ» было реализовано в программе XML Ribbon Editor [24]. Программирование меню и взаимодействие с пользователем было реализовано в среде Microsoft Visual Studio с помощью надстройки Excel DNA [Copyright (C) 2005-2017 Govert van Drimmelen]. Само меню представляет собой привычный вид раздела на панели Excel, поэтому у

пользователя не будет возникать никаких противоречий с тем, что он привык делать в нем. Вид меню представлен на рисунке 4.4

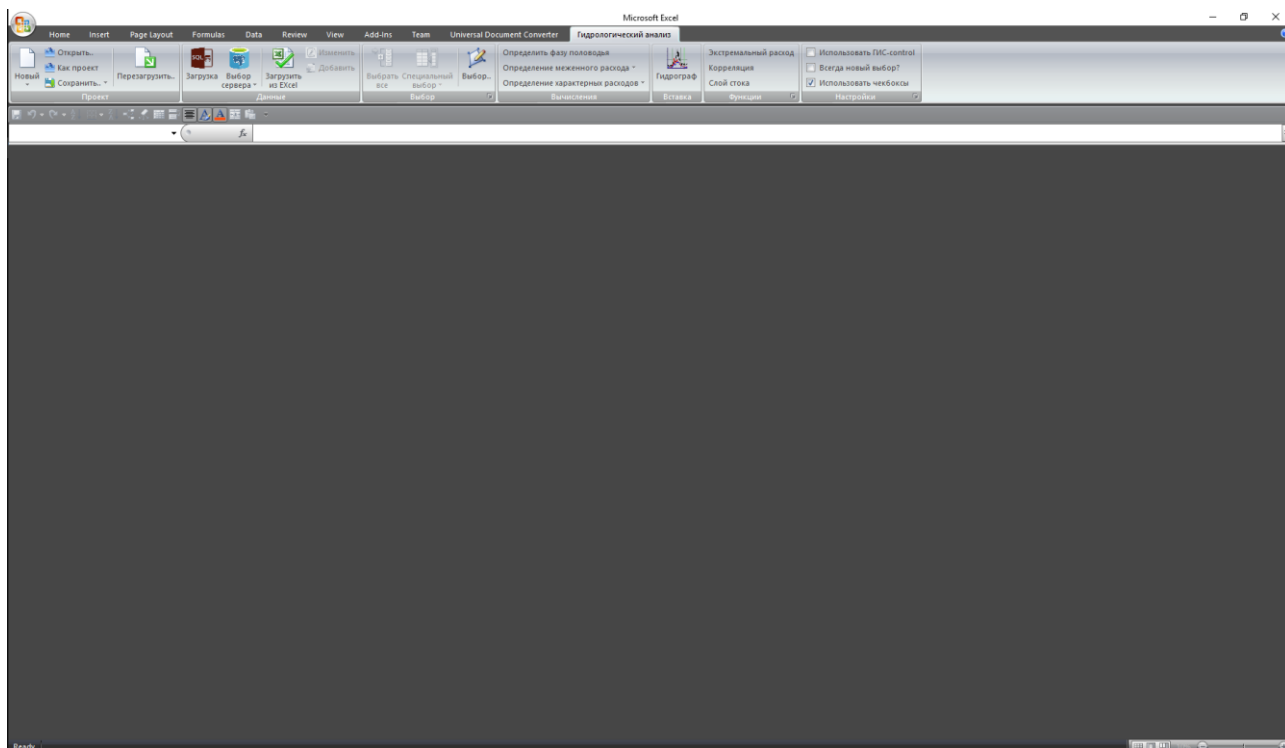


Рисунок 4.4 – меню надстройки «Гидрологический анализ»

Меню содержит в себе 7 вкладок: «Проект» – вкладка, отвечающая за открытие / создание / сохранения проекта; «Данные» – вкладка, отвечающая за подключение к базам данных и получения информации непосредственно с сервера, так же за редакцию и добавление данных в исследуемые массивы; «Выбор» – вкладка, связывающая пользователя с массивом данных. В ней осуществляется выбор исследуемых объектов; «Вычисления» – вкладка, содержащая в себе вычисления типовых гидрологических характеристик; «Вставка» – вкладка, содержащая в себе кнопку отрисовки гидрографа; «Функции» – вкладка, содержащая в себе вычисление функциональных зависимостей рядов и расчет комплексных параметров; «Настройки» – вкладка с настройками, включенными в проект.

На данный момент реализована работа только некоторых функций и кнопок, включенных в проект. Вызвано это сложностью реализации абстрактного

подхода, который заключается в том, что позволяет строить универсальные таблицы и картинки, при получении новых данных.

Для работы с данными пользователю необходимо нажать кнопку «Новый» и выбрать либо «Проект», либо «Проект по умолчанию». При нажатии на «Проект» откроется контекстуальное меню, позволяющее создать новый файл проекта, который в дальнейшем можно будет открывать из надстройки. Все изменения, внесенные в файл, будут записываться. Отличаться от стандартного файла Excel проект будет отличаться как раз возможностью открытия из надстройки и внесения в него изменений.

Дальше, после создания проекта, пользователю будет необходимо загрузить данные, представленные в определенной форме, описанной в разделе 4.2. В противном случае расчет дальше производиться не будет, а будет выдаваться ошибка – «Данные не загружены». Для загрузки данных следует нажать на кнопку «Загрузить из Excel». По умолчанию будет загружаться файл с именем «Base.xlsx», находящийся в той же папке, где и сам файл надстройки. За неимением следующего будет предложен выбор иного файла Excel, в котором будет храниться исходная информация. На данный момент после загрузки пользователь имеет возможность, произвести следующие операции: определить водность каждого года, определить фазу половодья, построить гидрограф для выбранных постов за соответствующие годы.

Касательно сути операций речь пойдет в следующем разделе.

Для манипуляции базой данных была создана клавиша «Выбор», при нажатии на которую (рисунок 4.5), появляется меню в котором есть возможность выбрать интересующий нас пост и соответствующий период наблюдений.

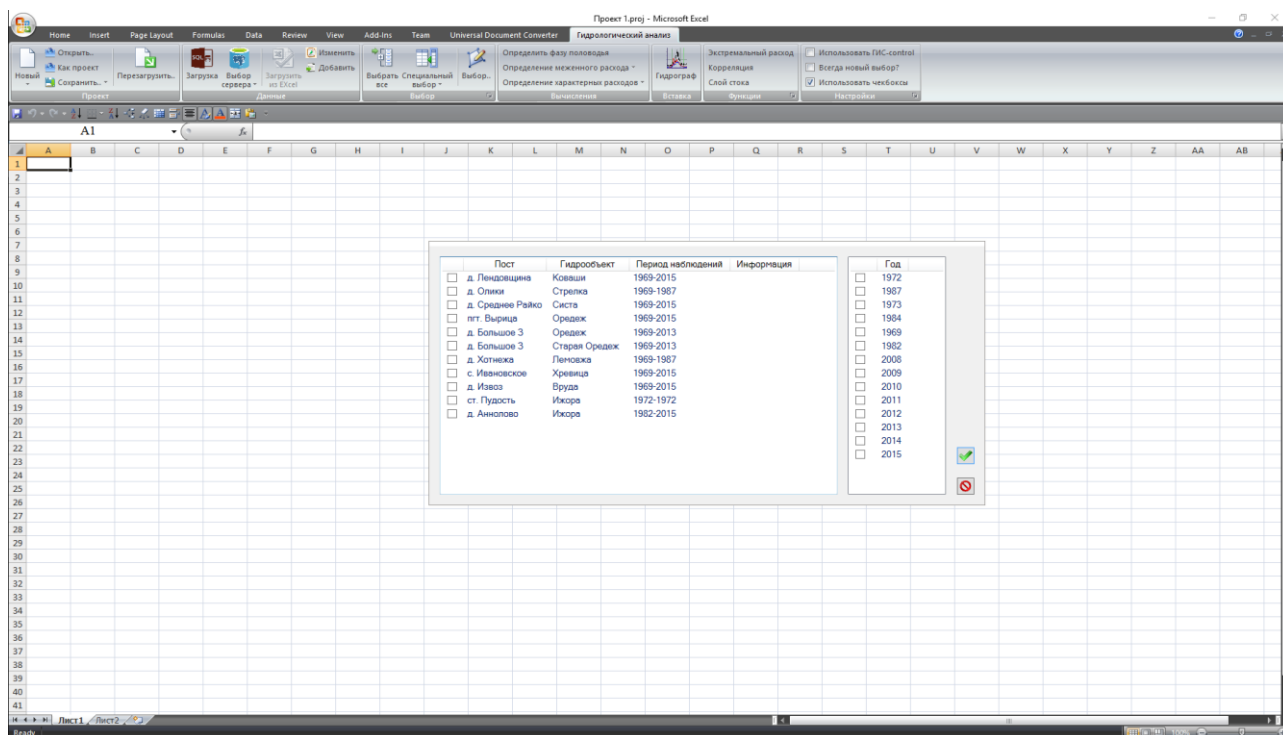


Рисунок 4.5 – меню кнопки «Выбор»

Для определения водности года и внесения его в общую таблицу выбора необходимо нажать сноску вкладки «Выбор» и добавить дополнительный критерий «Водность» рисунок 4.6

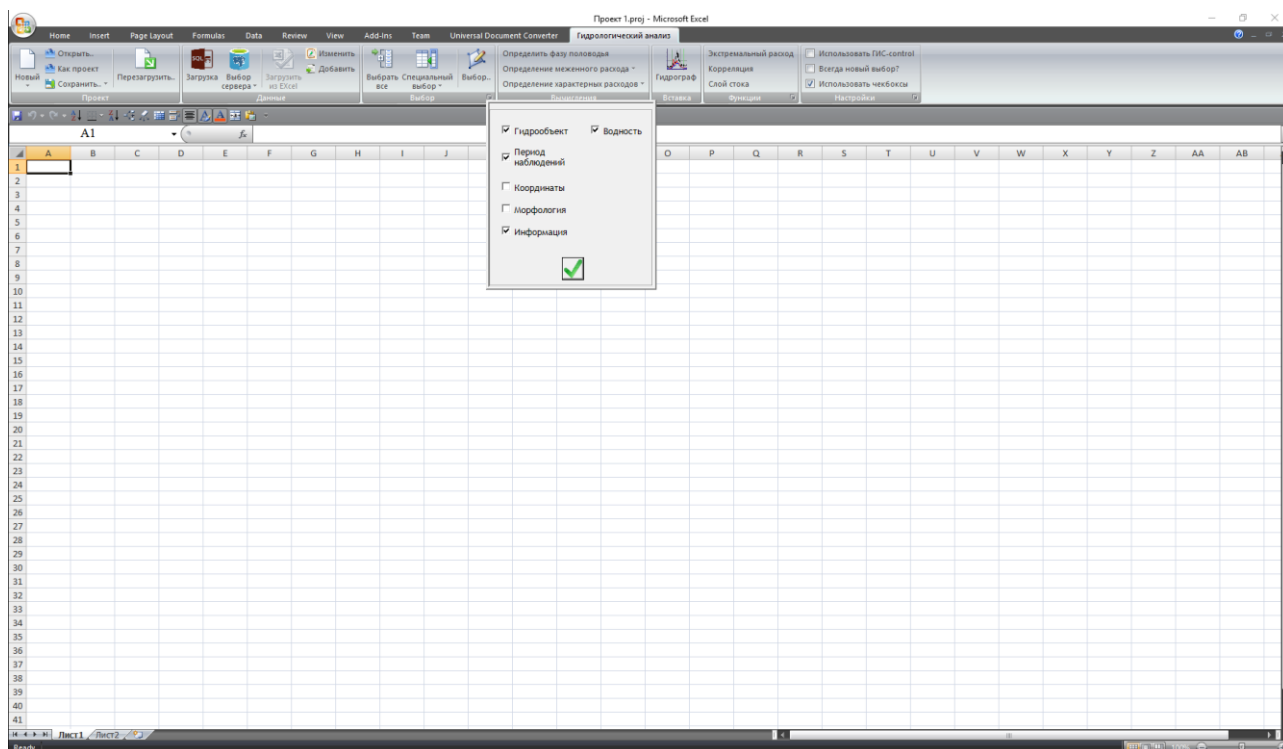


Рисунок 4.6 – отображение водности

Нажав кнопку «Выбрать все», тем самым активировав все имеющиеся данные, нажать на кнопку «Специальный выбор» и в выпадающем меню выбрать «Определить водность» (рисунок 4.7).

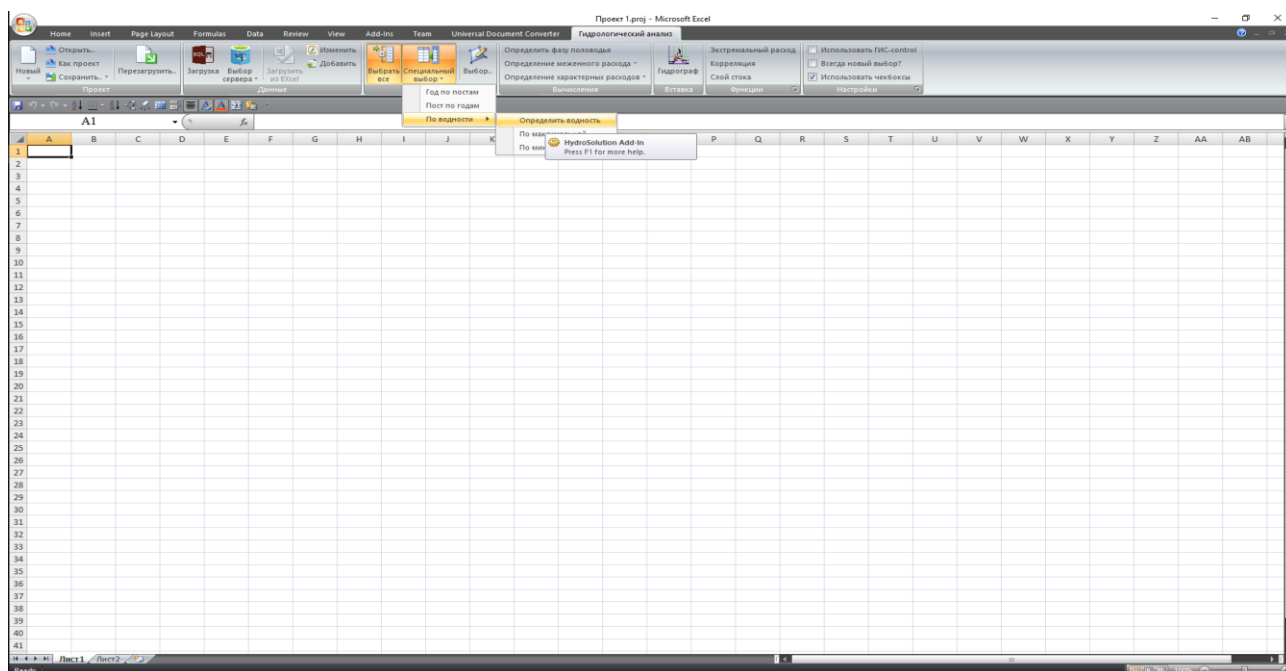


Рисунок 4.7 – определение водности

После этих операций соответствующая рассчитанная водность года будет добавлена в таблицу выбора (рисунок 4.8)

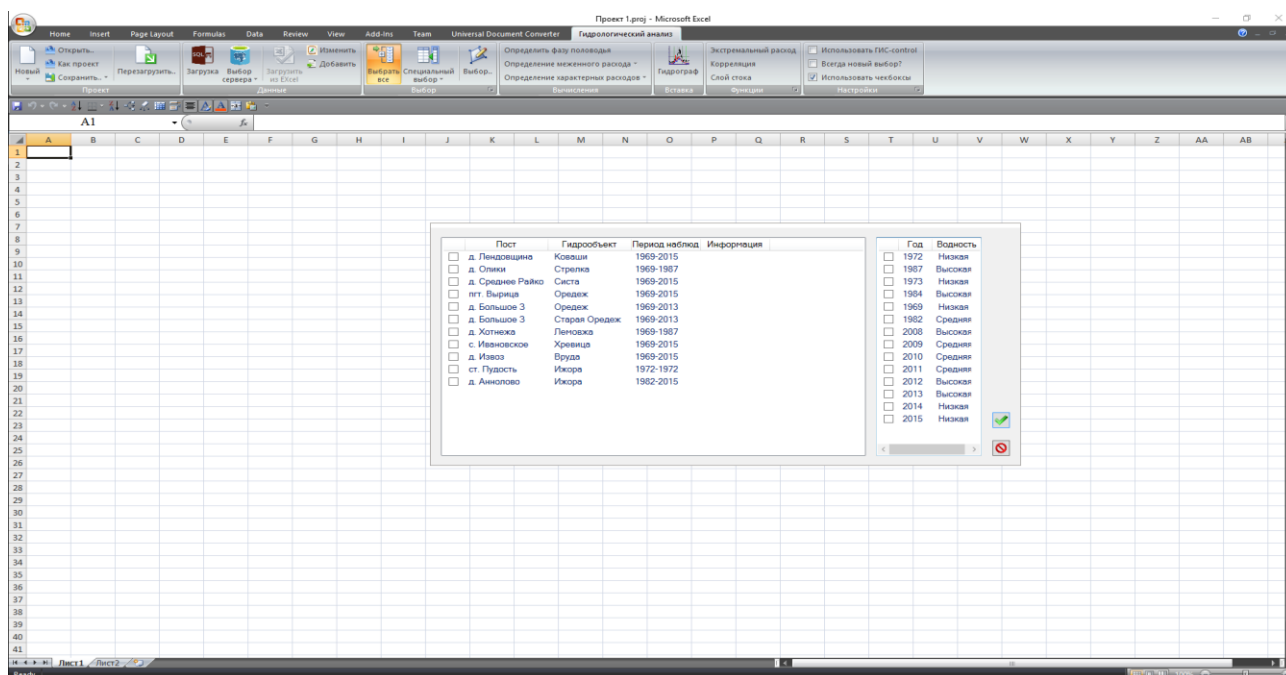


Рисунок 4.8 – водность в таблице выбора

Для построения гидрографа в таблице выбора следует выбрать любое количество постов и любой промежуток лет. Пример выбора представлен на рисунке 4.9

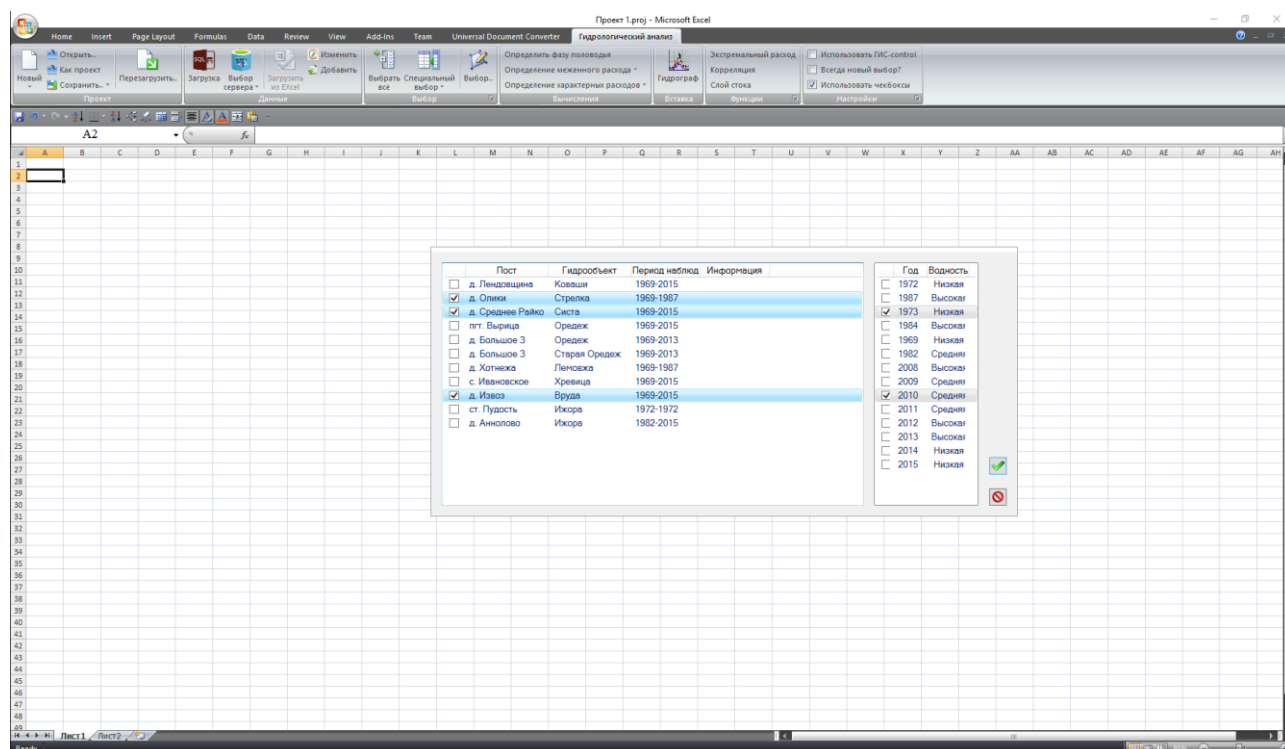


Рисунок 4.9 – выбор для построения гидрографа

После выбора, подтвердив его, нажать на кнопку гидрограф. Он будет построен в том месте на листе, где находится выбора ячейки. При отсутствии данных за тот или иной год они не будут выведены на итоговый график. Построенный гидрограф приведен на рисунке 4.10.

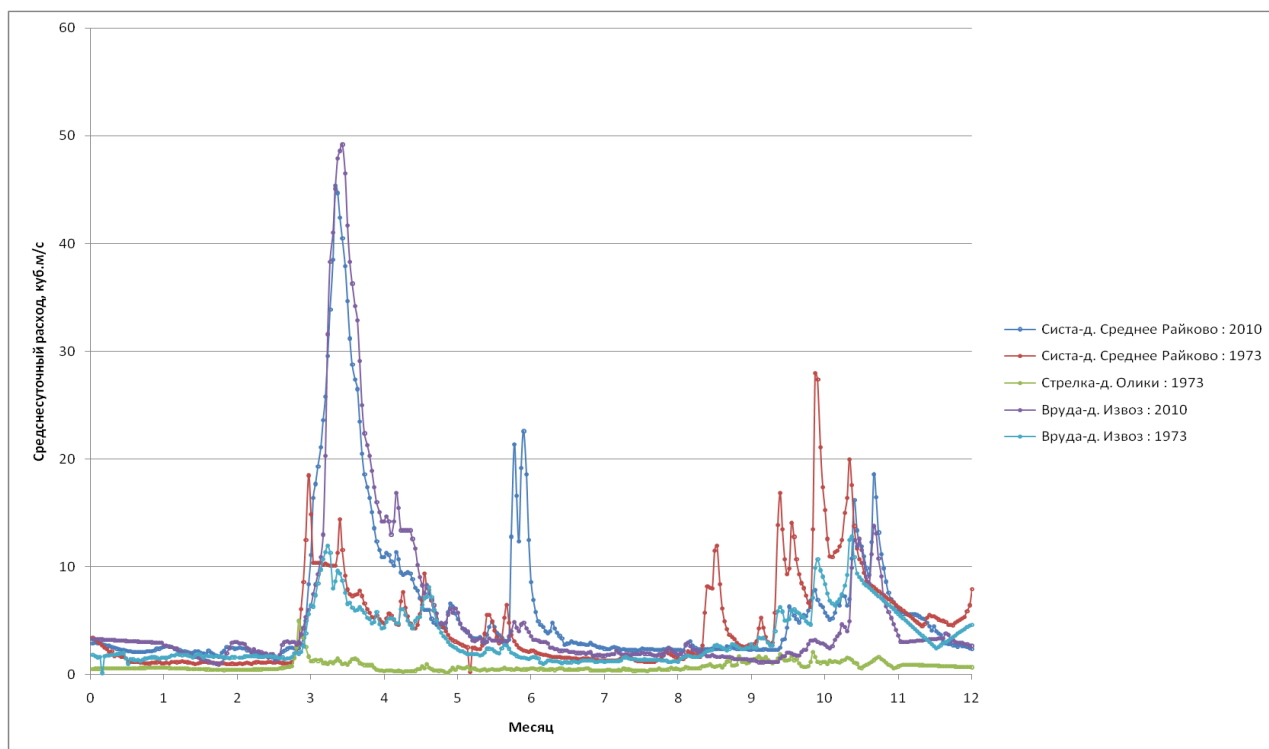


Рисунок 4.10 – Гидрограф по соответственному выбору

Для определения фазы половодья следует осуществить какой-либо выбор. Будь то нажатие кнопки «Выбрать все» или селективный выбор через меню «Выбор..». После нажатия клавиши «Определить фазу половодья» рисуется таблица, верхним левым углом начинающаяся в ячейке выбора. На рисунке 4.11 изображена таблица по той же селекции, что представлена на рисунке 4.9.

		Начало и конец весеннего половодья			
		2010		1973	
		Начало	Конец	Начало	Конец
д. Среднее Райково- Систа		26 март	18 июль	23 март	9 июнь
д. Олики- Стрелка		нет данных		17 март	30 май
д. Извоз- Вруда		22 фев.	27 июль	26 март	9 июль

Рисунок 4.11 – таблица определения фазы половодья

4.4 Алгоритмы реализованных расчетов

До сих пор мне не встречались программы, позволяющие автоматически определять гидрологические характеристики, более сложные, нежели среднее, максимальное, минимальное и т.п. значение расхода. Далее речь пойдет об алгоритмах, которые были использованы при написании программы и определении характеристик водности и фазы половодья.

4.4.1 Оценка водности года

В практике гидрорасчетов для определения водности на отдельной реке сток каждого сезона, определяемый как сумма месячных расходов воды, располагается в убывающем порядке за весь период наблюдений, и полученный ряд значений разбивается на три группы по водности: многоводную (включает обеспеченность до 33%), среднюю (обеспеченность от 33 до 66 %) и маловодную (обеспеченность более 66%). При периоде наблюдений менее 15 лет деление сезонов на группы обычно не целесообразно. [25]

Построенный алгоритм оценивает водность на отдельной реке внутри процедуры, не выводя ее пользователю. Выводимая в таблице водность является водностью территории за тот или иной год.

Перейдем к определению водности на отдельном посту.

В нашем случае максимальная длина ряда представляет собой $n = 14$, но не на всех постах имелись данные, в двух точках наблюдений $n = 6$, а в четырех $n = 12$. Эти значения не входят в нижний предел методики. Несмотря на это, алгоритм расчёта, утвержденный нормативами, был осуществлен, но с некоторыми допущениями для упрощения процесса реализации его автоматического воплощения. Допущения, которые были совершены, по моему мнению, правомерны.

Алгоритм на отдельном посту: за каждый год, в который были наблюдения, было посчитано среднее значение стока в этом году. Данная характеристика является индикатором водности. Затем была осуществлена проверка условия принадлежности к той или иной группе водности. Вся совокупность полученных средних расходов была разделена на три группы, границами которых являлись значения следующего толка: первая группа (высокой водности) выделялась на основании выполнения условия «средний расход за год $> 1.25 \cdot$ средний расход за период на данном посту», вторая группа (средней водности) принадлежала диапазону значений « $1.25 \cdot$ средний расход за период $\geq$ средний

расход за год $\geq 0.85 \cdot$ средний расход за период, и последняя, третья группа (низкой водности), соответствует критерию «средний расход за год $< 0.85 \cdot$ средний расход за период».

Для того, чтобы определить водность территории исследования, каждому значению водности на отдельном посту был присвоен своей соответствующий индекс: высокая – 3; средняя – 2, низкая – 1. Далее, за каждый год суммировались индексы на каждом посту, считалось среднее по сумме за период наблюдений, которое служит реперной отметкой относительно оценки водности на территории. Соблюдая ту же градацию, за тем лишь исключением, что вместо «среднего расхода за год» сравнивался «средний индекс» за год, осуществлялось определение водности в каждый год.

4.4.2 Определение характерных дат весеннего половодья

Согласно пункту 5.38 СП-33-101-2003 [26] «Общую продолжительность весеннего половодья для больших и средних рек, включая дождевые паводки на спаде половодья, принимают одинаковой для всех лет и створов, как на основной реке, так и на притоках при условии включения в ее пределы продолжительности всех половодий. Назначение периода общей продолжительности весеннего половодья допускается принимать переменным для разных лет, но одинаковым по длине реки. Продолжительность основной волны, включающей максимальную ординату, следует принимать постоянной в подвижных границах для всех лет исходя из условия наибольшего объема стока (притока) за принятый период»

Стоит отметить, что обычно фаза определяется попросту волюнтаристски: при визуальном анализе гидрографа. Автоматизированных способов оценки начала и конца половодья, а далее расчета объема стока за этот период, попросту нет.

Ниже будет изложен алгоритм, который используется в этой версии программы для определения начала и конца половодья.

Для определения начала половодья вводится шесть критериев: $Q[0]$ – длина окна выборки на подъем – характеризует среднее время становления половодья в конкретном регионе; в данном случае принимается равным 4-м суткам, $Q[1]$ – доля среднего расхода на подъем – представление о средней интенсивности роста расхода в период снеготаяния; принимается равным за 0.05, $Q[2]$ – доля амплитуды на обратный ход – представление о средней интенсивности уменьшения расхода в период спада; равняется 0.20, $Q[3]$ – день от начала года, который характеризует начало условно-теплого периода, в который температура не опустится ниже 4°C ; здесь выбран 120 день от начала года, $Q[4]$ – день условного конца теплого периода – граница, характеризующая конец условно-теплого периода в промежуток малой вероятности выпадения осадков; тут за конец был принят 204 день от начала года, $Q[5]$ – длина окна выборки на спад – характеризует среднее время тенденции на полное погашение половодья; длина выборки на спад равняется 6 суткам.

Рассмотрим идеологию расчета даты начала половодья. Основным условием, которое должно выполняться, превышение каждого следующего значения в $Q[0]$, на величину произведения $Q[1]$ на средний расход за наблюдаемый год над предыдущим значением. Таким образом, устанавливается тенденция, которая характеризуется постоянным ростом. За дату начала половодья принимается первое число в выборке, удовлетворяющей поставленному условию.

Для определения конца половодья был построен иной алгоритм. Идея его в общем похожа на ту, что использовалась при идентификации даты начала половодья, но сама концепция разительно отличается. Для того, чтобы определить дату конца половодья определяется дата, в которую наблюдается минимальный расход за период от $Q[3]$ до $Q[4]$, от этой даты идет анализ окон длиной $Q[5]$ на предмет превышения каждого следующего значения над предыдущим на критерий $Q[2]$, умноженный на средний расход за наблюдаемый период. За дату

конца половодья принимается первая дата в окне выборки, удовлетворяющей данному критерию. Анализ полученных расчетов приведен в разделе 4.5.

При невозможности определить критерий начала половодья в таблице возникает запись «оШиБкАА!». Возникает она потому, что на некоторых объектах рост половодья происходит таким образом, что каждое следующее значение превосходит предыдущее на величину, которая меньше заданного критерия $Q[1]$, умноженного на среднее значение расхода. Иными словами, рост происходит слишком плавно, что не позволяет выделить окно, в которое будет происходить уверенный скачок, так как скачок в таком случае происходит резко и быстро и не дает возможности выделить его в окне 4х суток. Пример такого объекта приведен на рисунке 4.12

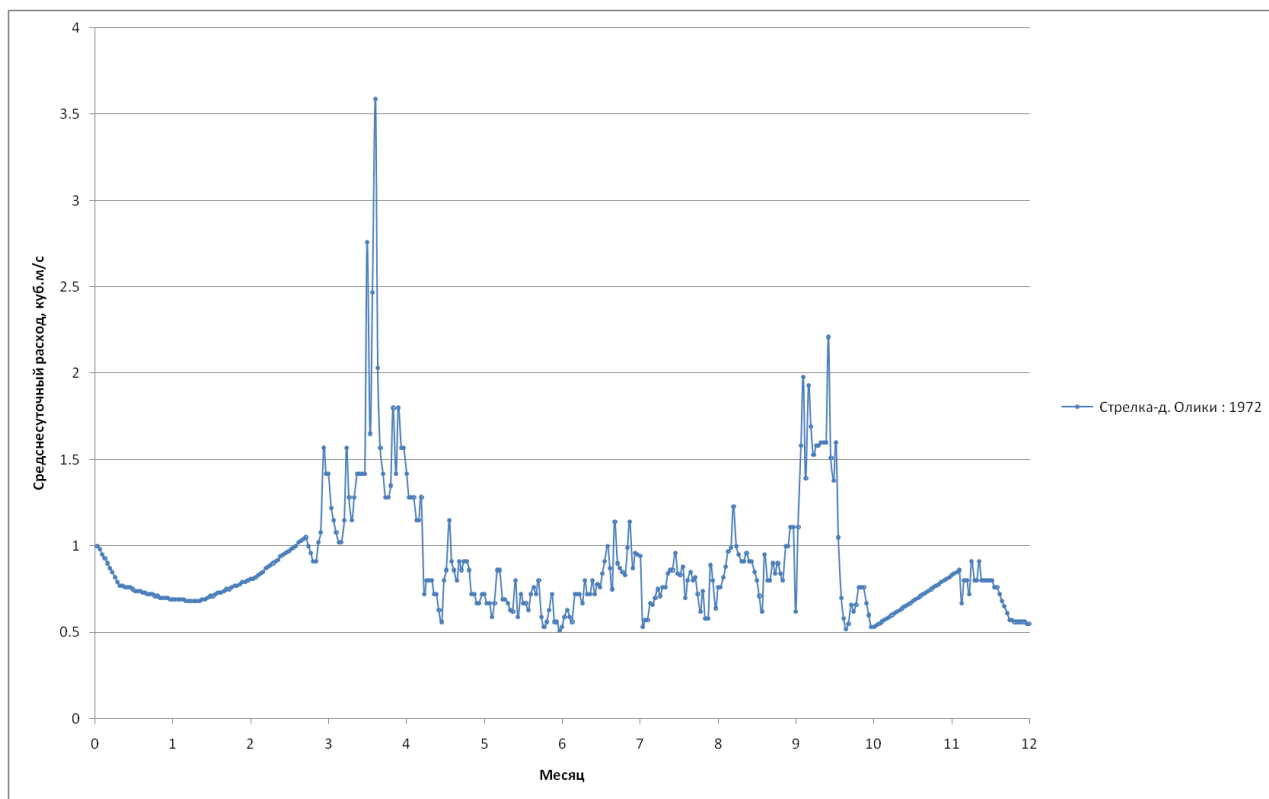


Рисунок 4.12 – Гидрограф р. Стрелка – д. Олики за 1972 год

4.4.3 Формирование таблиц расчетных характеристик половодья

Далее будут представлены результаты определения дат начала и конца половодья по алгоритму, изложенному выше для всех объектов исследования за весь имеющийся информационный период. По градации водности, которую можно видеть на рисунке 4.8, были выделены годы высокой, средней и низкой водности. Для них были построены таблицы с датами начала и конца половодья.

Небольшой анализ каждой из полученных таблиц определения фазы половодья для лет разной водности будет приводиться под ними же.

В таблице 4.1 приведены данные о начале и конце половодья на всех постах наблюдений за годы высокой водности

Таблица 4.1 – Начало и конец весеннего половодья в годы высокой водности

*	Начало и конец весеннего половодья в годы высокой водности									
	1987		1984		2008		2012		2013	
	Начало	Конец	Начало	Конец	Начало	Конец	Начало	Конец	Начало	Конец
д. Лендовщина- Коваши	31 март	27 июль	1 апр.	23 июль	23 фев.	22 июль	8 апр.	26 июль	10 апр.	19 июль
д. Олики- Стрелка	2 янв.	12 июль	30 март	12 июль	нет данных		нет данных		нет данных	
д. Среднее Райково- Систа	29 март	26 июль	31 март	19 июль	7 фев.	22 июль	11 апр.	16 июль	11 апр.	23 июль
пгт. Вырица- Оредеж	30 март	27 июль	31 март	18 июль	25 фев.	5 июнь	11 апр.	18 май	14 апр.	17 июнь
д. Большое 3- Оредеж	12 апр.	27 июль	3 апр.	24 июнь	30 март	25 июль	оШИБкАА!		11 апр.	2 июль
д. Большое 3- Старая Оредеж	оШИБкАА!		30 март	26 июль	оШИБкАА!		оШИБкАА!		10 апр.	16 май
д. Хотнежа- Лемовжа	29 март	27 июль	1 апр.	15 июль	нет данных		нет данных		нет данных	
с. Ивановское- Хревица	8 фев.	24 июль	31 март	16 июль	7 фев.	25 июль	10 апр.	24 июль	11 апр.	23 июль
д. Извоз- Вруда	3 апр.	27 июль	30 март	16 июль	24 фев.	6 июль	10 апр.	16 июль	10 апр.	19 июль
ст. Пудость- Ижора	нет данных		нет данных		нет данных		нет данных		нет данных	
д. Аннолово- Ижора	3 март	6 июнь	29 март	26 июль	23 фев.	3 июль	6 апр.	31 май	11 апр.	11 июнь

Можно отметить, что в разные годы половодье начиналось в разные промежутки года. Обуславливается это специфическими **климатическим** проявлениями на водосборах. Но все же основная черта заключается в том, что за разные периоды наблюдений, «ретро» (1980-е) и «наши дни» (2000-е), произошла заметная сдвигка и компоновка дат ближе к лету, и, если раньше про-

межуток, в который начиналось половодье, мог варьироваться, то ближе к 2000-ным, даты начали тяготеть к апрелю. Средняя продолжительность за период «ретро» – 107 дней, в «наши дни» он сократился до 100 дней. Также можно отметить, что начиная с 2010х, фаза половодья сократилась до 82 в среднем по постам.

В таблице 4.2 приведены данные о начале и конце половодья на всех постах наблюдений за годы средней водности

Таблица 4.2 – Начало и конец весеннего половодья в годы средней водности

*	Начало и конец весеннего половодья в годы средней водности							
	1982		2009		2010		2011	
	Начало	Конец	Начало	Конец	Начало	Конец	Начало	Конец
д. Лендовщина- Коваши	25 март	26 июль	10 апр.	23 июль	28 март	27 июль	3 апр.	16 июль
д. Олики- Стрелка	оШИБкАА!		нет данных		нет данных		нет данных	
д. Среднее Райково- Систа	23 март	22 июль	31 март	8 июль	26 март	18 июль	1 апр.	10 июль
пгт. Вырица- Оредеж	нет данных		28 янв.	6 июнь	27 март	22 май	5 апр.	30 май
д. Большое 3- Оредеж	5 апр.	27 июль	7 апр.	25 июль	оШИБкАА!		13 апр.	27 июль
д. Большое 3- Старая Оредеж	26 март	27 июль	оШИБкАА!		оШИБкАА!		5 апр.	27 июль
д. Хотнежа- Лемовжа	26 март	27 июль	нет данных		нет данных		нет данных	
с. Ивановское- Хревица	3 янв.	8 июль	3 апр.	22 июль	27 март	27 июль	4 апр.	27 июль
д. Извоз- Вруда	26 март	27 июль	4 фев.	8 июль	22 фев.	27 июль	3 апр.	13 июль
ст. Пудость- Ижора	нет данных		нет данных		нет данных		нет данных	
д. Аннолово- Ижора	22 фев.	27 июль	10 март	31 май	25 март	19 июль	оШИБкАА!	

При годах средней водности можно заметить, что практически никакой сдвиги ни начала, ни конца половодья не наблюдается. Средняя продолжительность за приведенные годы 114 дней.

В таблице 4.3 приведены данные о начале и конце половодья на всех постах наблюдений за годы низкой водности

Таблица 4.3 – Начало и конец весеннего половодья в годы низкой водности

*	Начало и конец весеннего половодья в годы низкой водности									
	1972		1973		1969		2014		2015	
	Начало	Конец	Начало	Конец	Начало	Конец	Начало	Конец	Начало	Конец
д. Лендовщина- Ковашаи	21 март	6 июль	26 март	11 июль	8 апр.	25 июль	7 янв.	26 июль	2 янв.	18 июль
д. Олики- Стрелка	оШИБкАА!		17 март	30 май	нет данных		нет данных		нет данных	
д. Среднее Райково- Систа	5 апр.	25 июль	23 март	9 июнь	9 апр.	25 июль	7 янв.	27 июль	16 янв.	9 июль
пгт. Вырица- Оредеж	10 апр.	20 июль	23 март	15 июль	оШИБкАА!		9 янв.	9 май	4 март	29 май
д. Большое 3- Оредеж	10 апр.	17 июль	23 март	12 июль	10 апр.	26 июль	нет данных		нет данных	
д. Большое 3- Старая Оредеж	6 апр.	26 июль	23 март	27 июль	8 апр.	21 июль	нет данных		нет данных	
д. Хотнежа- Лемовжа	6 апр.	25 июль	23 март	24 июль	10 апр.	5 июль	нет данных		нет данных	
с. Ивановское- Хревица	10 март	15 июль	24 март	14 июнь	9 апр.	25 июль	6 янв.	26 июль	7 март	8 июль
д. Извоз- Вруда	28 март	22 июль	26 март	9 июль	9 апр.	27 июль	7 янв.	25 июль	23 фев.	27 июль
ст. Пудость- Ижора	оШИБкАА!		нет данных		нет данных		нет данных		нет данных	
д. Аннолово- Ижора	нет данных		нет данных		нет данных		оШИБкАА!		оШИБкАА!	

В половодьях маловодных лет следующая картина: очевидно можно разделять на «ретро» данные и данные «наших дней». Маловодные годы «ретро» характеризуются дружным началом половодья и дружным его концом. Средняя продолжительность за половодья 107 суток. В период «наших дней», изменения климата в сторону повышения температур, влекут за собой аномально-теплые зимы, что видно в поведении дат начала половодья. Из-за этого фаза половодья растягивается, и средняя ее длительность достигает 160 суток. Также это влечет за собой уменьшение объема талого стока, регистрируемого непосредственно весной.

По итогу можно заключить, что в силу общего потепления климата, могут наблюдаться в нашем регионе снежные паводки в зимнее время. Остается непонятным: следует ли их относить к началу половодья или нет.

Закключение

Процессы карстовых явлений на изучаемой территории довольно сильно влияют на сток. Достаточно обратиться к графику, на котором изображены гидрографы 3х рек с приблизительно равными площадями водосборов: р. Ко-
ваши – д. Лендовщина, р. Вруда – д. Извоз и р. Систа – д. Среднее Райково. Площади водосборов соответственно равны: 505, 544, 573 км². На рисунке 5.1 приведены гидрографы в этих постах за 1987 год, год с высокой водностью. На рисунке 5.2 гидрографы за год низкой водности –1973 год.

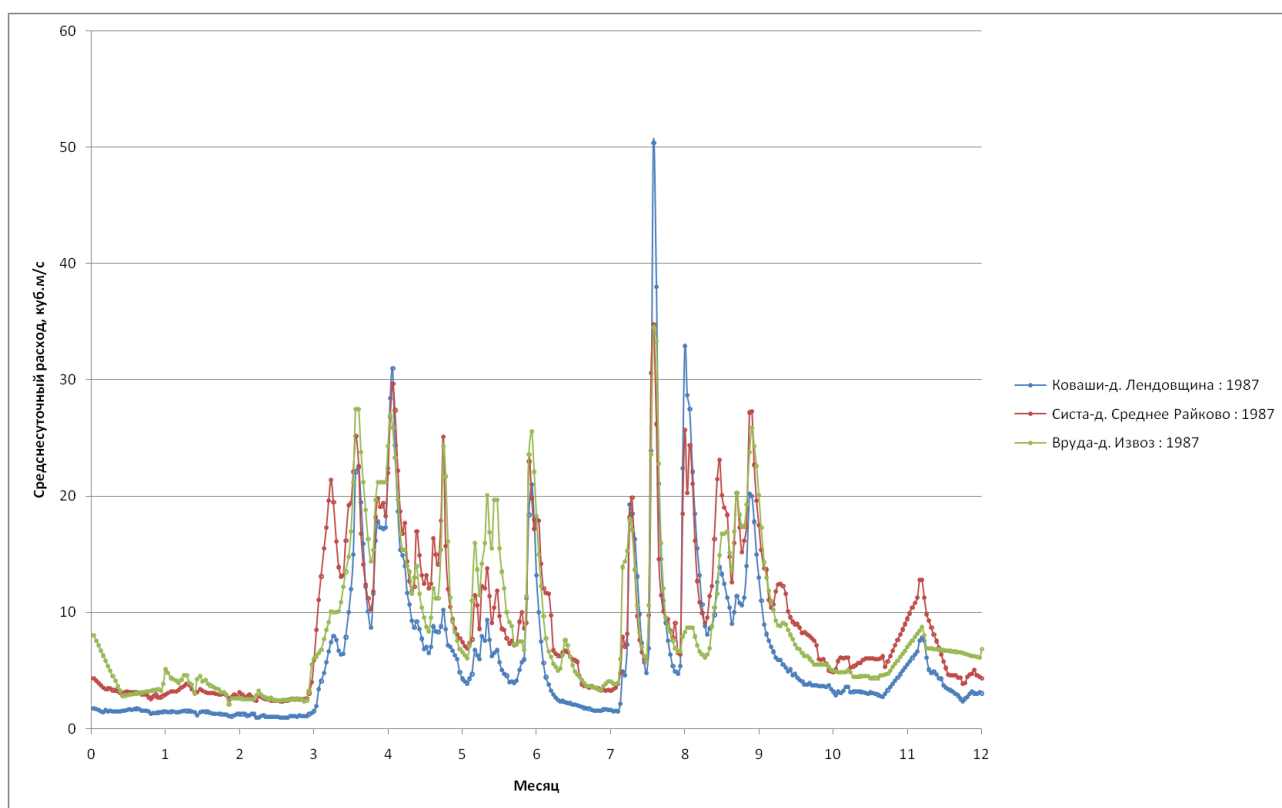


Рисунок 5.1 – гидрографы за 1987 год

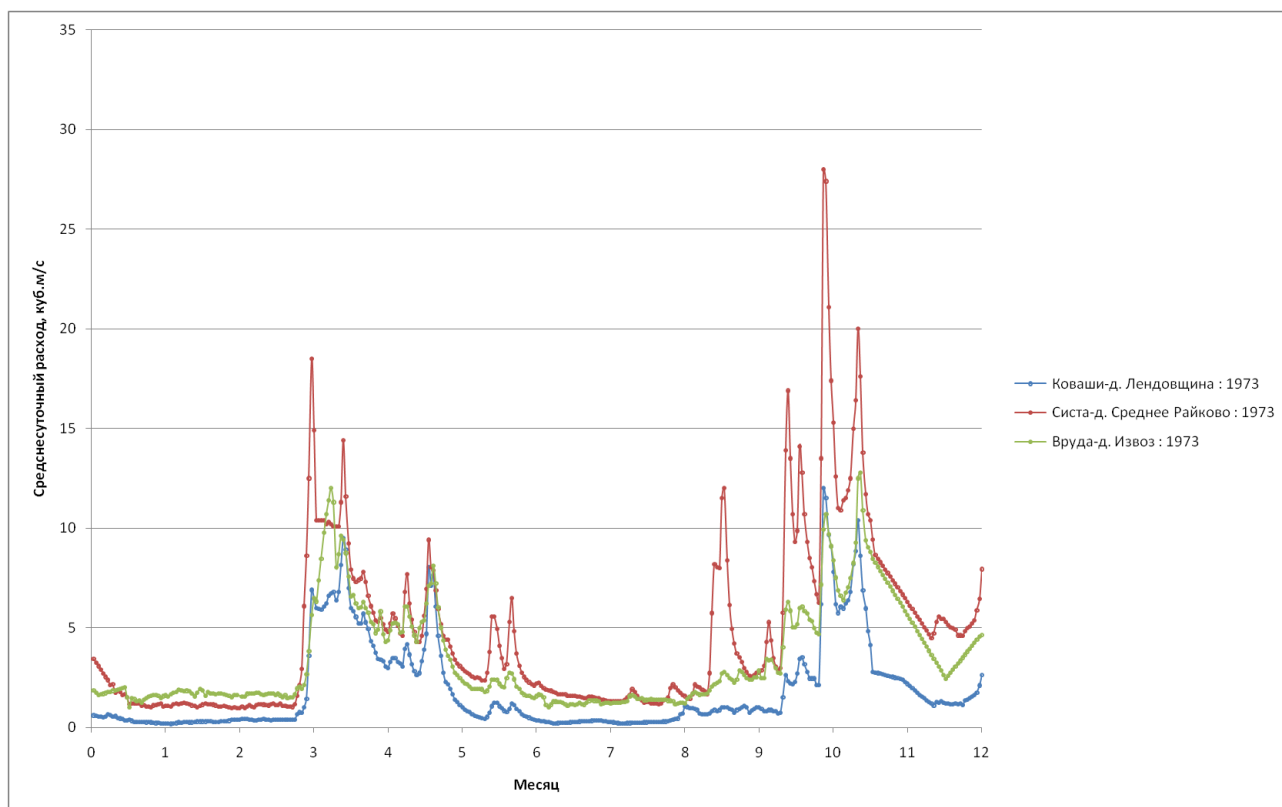


Рисунок 5.2 – гидрографы за 1973 год

Из них видно, как специфически реагируют довольно схожие по морфометрическим характеристикам реки, на летне-осенние осадки.

На р. Сиса, очень ярко выделяются пики паводков, в то время как на реках, подверженных влиянию карста, эти пики «съедаются». Из этого можно заключить, что происходит дренирование подземных горизонтов. Обусловленное возможным различием поверхностных и подземных водосборов.

Анализируя полученные рисунки, возникает вопрос о разделении гидрографа. Но каким образом его выполнять; что брать за подземный, а что за поверхностный сток. В работах [27] и [28] посвященным анализу стока методом изотопного анализа, оценивались составляющие стока гидрографов, формируемых дождевыми паводками. Для того чтобы было ясно, следует немного рассказать о самом принципе изотопного анализа.

Изотопное фракционирование происходит естественным путем: испарения или конденсации. Более легкие изотопы предпочтительно испаряются, то-

гда, как более тяжелые изотопы конденсируются. Это положение позволяет нам отследить путь, которым вода пришла в наше в. Это говорит о том, что путешествие молекулы воды можно проследить от ее источника до определенного водосбора, основанного на соотношениях фракционирования.

Фракции различного генезиса в воде позволяют разделить гидрограф и выделить в нем «новую» воду, которая пришла вместе с осадками и «старую», которая является аккумулятами из грунтовых запасов. При таком подходе разделение гидрографов представляется совершенно иным образом рисунок 5.3.

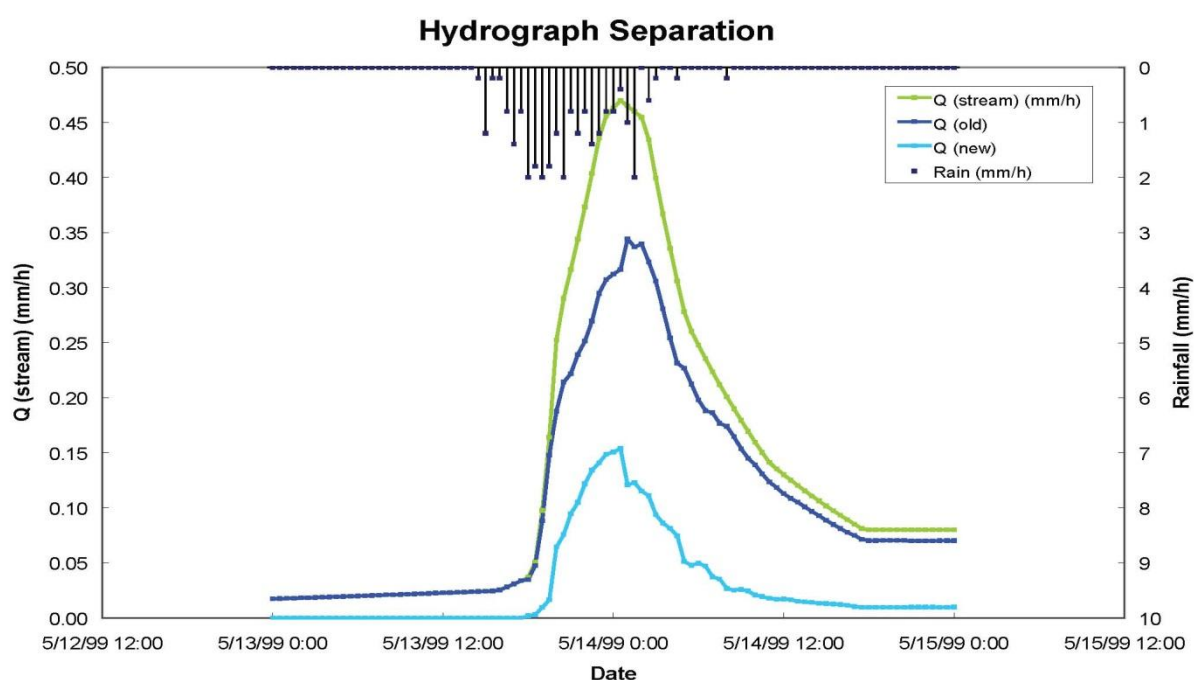


Рисунок 5.3 – разделение гидрографа [29]

На рисунке видно, что при дождевом паводке, большая часть стока реки составляет его грунтовая составляющая («старая» воды).

Зная о наличии «новой» и «старой» воды, вкупе с пористостью карста и сложной его системой, можно понять следующие положения:

– при моделировании стока на карстовых водосборах следует разделять воду по темпам водообмена

– также следует учитывать географическое деление и саму структуру (интенсивность закарстованности)

Подводя некоторый итог проделанной работе, можно отметить следующие позиции, которые удалось выполнить:

– положено начало в составлении собственной базы данных, содержащей в себе гидрологическую информацию

– создана программа-надстройка для Excel «Гидрологический анализ»

– реализовано несколько алгоритмов по определению гидрологических характеристик

– реализовано автоматическое построение гидрографа, по имеющимся данным

– проведен анализ материалов, посвященных проблемам карстоведения

– осуществлено предварительное разбиение Ижорского плато на три зоны, отличающиеся друг от друга интенсивностью водообмена

– определена водность соответствующих лет наблюдений

– определены фазы половодья на выбранных гидрообъектах

– проведен анализ изменения фаз половодья

– проведен анализ влияния карста на поведение гидрографа

– проведен качественный анализ влияния карста на годовой сток

К сожалению, не все цели были реализованы до той кондиции, которую можно назвать нужной. В дальнейшем планируется:

– расширение базы данных (добавление метеорологической информации, данных об объектах, увеличение числа объектов исследования)

– доработка алгоритма определения фазы половодья

– создание модуля, позволяющего осуществлять расчет типовых гидрологических характеристик (модуль стока, объем стока, слой стока и пр.)

– реализация ГИС-контроля в программе

– вынос базы данных на сервер

- проведение полевых экспедиций, с целью выявления особенностей стока на карстовых водосборах в натурных условиях
- создание математического аппарата, позволяющего учитывать особенности формирования, при моделировании различных процессов
- получение оценок воздействия карста на годовой сток, не качественного характера

Также стоит отметить, что автоматизированные решения, реализованные на языках программирования, позволяют выйти совершенно на новые возможности анализа. Скорость выполнения процедур, которые могут являться одинаковыми по своей сути, а разными лишь по значениям, записываются в элегантные абстрактные формы циклов, практически моментально считающие результаты.

Список используемой литературы

- 1 Максимович, Г.А. Основы карстоведения. (Том 1) [Текст]: Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста; ПЕРМЬ: ПЕРМСКОЕ КНИЖНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО, 1963
- 2 Куриленко, В.В. ПРОБЛЕМЫ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ ИЖОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД [Текст] / Жданов, С.В. // Записки Горного института. Т. 200: сб. науч. тр. / Санкт-Петербург, 2013
- 3 Earth Explorer [Электронный ресурс]. – earthexplorer.usgs.gov. – U.S. Department of the Interior / U.S. Geological Survey
- 4 Актуализированные ГИС-пакеты оперативной геологической информации (ГИС-Атлас «Недра России») [Электронный ресурс]. – atlaspacket.vsegei.ru. – ВСЕГЕИ
- 5 Геология СССР. [Текст]: Том 1. Геологическое описание. Ленинградская, Псковская и Новгородская области; МОСКВА: Недра, 1971
- 6 Водные ресурсы России и их использование [Текст]: под редакцией проф. Шикломанова, И.А.; Санкт-Петербург: Государственный гидрологический институт, 2008
- 7 Ресурсы поверхностных вод СССР [Текст]: Том 2. Карелия и Северо-Запад. Часть 1. Под редакцией канд. техн. Наук Водогрецкого, В.Е.; Ленинград: Гидрометеиздат, 1972
- 8 Геологический портал geokniga [Электронный ресурс]. – geokniga.org – Горно-геологическое общество
- 9 Грейсер, Е.Л. [Текст] / Завилейский, С.В. / Колесов, Г.П. / Попов, О.В. // Труды ГГИ . вып. 286: Ленинград: Гидрометеиздат, 1982
- 10 Никитин, М.Л. Травертиногенез Ижорского плато в Голоцене [Текст]: дис. канд. геогр. Наук: 25.00.25 / Санкт-Петербург, 2015
- 11 Абрамов, Д.В. К вопросу о формировании фильтрационных потоков в зоне активного водообмена [Текст] / Никифоровский, А.А. // Третьи Виногра-

- довские Чтения. Грани Гидрологии: сб. науч. докладов / Санкт-Петербургский государственный университет: Россия, 28-31 марта 2018
- 12 Google Earth [Электронный ресурс]. – earth.google.com – Google
 - 13 Ратнер, Н.С. К оценке подземного стока карстовых районов по гидрометрическим данным (на примере северной части Ижорского плато) [Текст] // Труды ГГИ . вып. 286: Ленинград: Гидрометеиздат, 1982
 - 14 Nicolas Le Moine. Confronting surface- and groundwater balances on the La Rochefoucauld-Touvre karstic system (Charente, France) [Текст] / Vazken Andre´assian / Thibault Mathevet // WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 44, W03403, doi:10.1029/2007WR005984, 2008
 - 15 Марков, М.Л. О взаимосвязи поверхностных и подземных вод в речных бассейнах [Текст] // Государственный гидрологический институт: Санкт-Петербург, Россия
 - 16 Гончуков, Л.В. Опыт создания архива режимной гидрометеорологической информации на основе технологии CUAHSI ODM [Текст] / Макарьева О.М. // Третьи Виноградовские Чтения. Грани Гидрологии: сб. науч. докладов / Санкт-Петербургский государственный университет: Россия, 28-31 марта 2018
 - 17 Государственный водный кадастр [Текст] Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 1969. Часть 1. Реки и Каналы. Том 1. РСФСР. Выпуск 5. Бассейны рек Балтийского моря, Ладожского и Онежского озера: Ленинград, 1970
 - 18 Государственный водный кадастр [Текст] Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 1972. Часть 1. Реки и Каналы. Том 1. РСФСР. Выпуск 5. Бассейны рек Балтийского моря, Ладожского и Онежского озера: Ленинград, 1973
 - 19 Государственный водный кадастр [Текст] Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 1973. Часть 1. Реки и Каналы. Том 1. РСФСР. Выпуск 5. Бассейны рек Балтийского моря, Ладожского и Онежского озера: Ленинград, 1973

- ского озера: Ленинград, 1974
- 20 Государственный водный кадастр [Текст] Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 1982. Часть 1. Реки и Каналы. Том 1. РСФСР. Выпуск 5. Бассейны рек Балтийского моря, Ладожского и Онежского озера: Ленинград, 1983
- 21 Государственный водный кадастр [Текст] Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 1984. Часть 1. Реки и Каналы. Том 1. РСФСР. Выпуск 5. Бассейны рек Балтийского моря, Ладожского и Онежского озера: Ленинград, 1985
- 22 Государственный водный кадастр [Текст] Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 1987. Часть 1. Реки и Каналы. Том 1. РСФСР. Выпуск 5. Бассейны рек Балтийского моря, Ладожского и Онежского озера: Ленинград, 1989
- 23 Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов [Электронный ресурс] – gmvo.skniivh.ru – Федеральное Агентство Водных Ресурсов
- 24 Максим Новиков. Слесарь, Техник, Программист [Электронный ресурс] – novikov.gq – Максим Новиков
- 25 Владимиров, А.М. Гидрологические расчеты [Текст] // Ленинград: Гидрометеиздат, 1990
- 26 СП 33-101-2003. Определение основных гидрологических характеристик [Текст] – Взамен СНиП 2.01.14-83; введ. 26.12.2003. – Госстрой России
- 28 Власова, Л.С. Изучение формирования речного и грунтового стока в условиях Северо-Запада России с помощью природного трития [Текст] / Романов, В.В., Колесов, Г.П., Никифоровский, А.А. // Водные ресурсы. вып 6: Москва, 1992

- 29 A Primer on Stable Isotopes and some common Uses in Hydrology. [Электронный ресурс] – [serc.carleton.edu/microbelife/research_methods/](http://serc.carleton.edu/microbelife/research_methods/environ_sampling/stableisotopes.html)
[environ_sampling/stableisotopes.html](http://serc.carleton.edu/microbelife/research_methods/environ_sampling/stableisotopes.html) – Monica Z. Bruckner, Montana State University, Bozeman