



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

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему «Определение возможности образования водонепроницаемого
слоя по профилям температуры и влажности почвы»

Исполнитель Вылиток Алёна Алексеевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель к.т.н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

к.т.н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Екатерина Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

« 1 » июня 2026 г.

Санкт-Петербург
2026

Содержание

Введение	2
1 Физико-географическое описание района исследований	4
1.1 Климатические характеристики	6
1.2 Гидрологический режим	9
1.3 Условия формирования половодья	11
1.4 Исходные данные для расчетов и прогнозов водонепроницаемого слоя	13
2. Математический аппарат	14
2.1 Устойчивый переход через 0	14
2.2 Модель формирования запасов воды в снеге и водоотдача из него	16
2.3 Модель водонепроницаемого слоя	19
2.4 Критерии оценки прогноза	21
3. Математическое моделирование условий формирования водонепроницаемого слоя	22
3.1 Моделирование и прогнозирование снегозапасов и водоотдачи из снега	22
3.2 Моделирование и прогнозирование водонепроницаемого слоя	30
4 Моделирование и прогнозирование водонепроницаемого слоя	36
4.1 Разработка алгоритма прогноза	36
Заключение	37
Список использованных источников	38
Приложения	39

Введение

Актуальность темы.

Изучение процессов формирования водонепроницаемого слоя в почве имеет большое значение для гидрологии, агрономии, мелиорации и экологического мониторинга.

Водонепроницаемый слой (мерзлотный или уплотнённый) существенно влияет на режим поверхностного и грунтового стока, что напрямую связано с интенсивностью весеннего половодья, риском затопления территорий, эффективностью сельскохозяйственного использования земель, процессами эрозии и переноса веществ в ландшафте.

Ключевыми факторами образования такого слоя выступают температура и влажность почвы, их пространственно-временное распределение. Анализ профилей этих параметров позволяет прогнозировать возникновение водонепроницаемых горизонтов и управлять связанными с ними рисками.

Цель работы

Определить возможность образования водонепроницаемого слоя по профилям температуры и влажности почвы на выбранных участках.

Задачи исследования:

1. Изучить теоретические основы формирования водонепроницаемого слоя в почвах различных типов.
2. Собрать и систематизировать данные о температуре и влажности почвы на исследуемых участках (по слоям и во времени).
3. Построить профили температуры и влажности почвы для разных сезонов года.
4. Выявить критические значения температуры и влажности, при которых возможно образование водонепроницаемого слоя.
5. Определить глубину залегания и мощность потенциального водонепроницаемого слоя на основе анализа пересечений фактических и критических профилей.
6. Оценить влияние микрорельефа, типа почвы и снежного покрова на формирование водонепроницаемого слоя.
7. Разработать рекомендации по использованию полученных данных для прогноза поверхностного стока и планирования мелиоративных

мероприятий.

Объект исследования

Почвенный профиль на выбранных участках с различными ландшафтно-климатическими условиями.

Предмет исследования

Взаимосвязь между профилями температуры и влажности почвы и возможностью образования водонепроницаемого слоя.

Практическая значимость:

- результаты работы могут быть использованы для прогноза весеннего половодья и оценки риска затопления территорий;
- данные полезны при планировании мелиоративных и агротехнических мероприятий (дренаж, обработка почвы);
- методика применима в системах мониторинга состояния земель и управления водными ресурсами;
- материалы исследования могут служить основой для разработки региональных рекомендаций по адаптации землепользования к климатическим изменениям.

1 Физико-географическое описание района исследований

Бассейн реки Оять расположен в пределах южной части Карельского перешейка и Вепсовской возвышенности, охватывая восточные районы Ленинградской области и западную окраину Вологодской. Водосборная площадь составляет 5220 км², что позволяет отнести реку к категории средних по классификации Государственного водного реестра. Начало Оять берёт на западных склонах Вепсовской возвышенности, на высоте около 250 метров над уровнем моря, и протекает преимущественно в северо-западном направлении, впадая в Свирь на расстоянии 15 км от её устья.



Рисунок 1. Карта-схема расположения реки Оять.

Рельеф бассейна сформирован деятельностью валдайского ледника и характеризуется чередованием моренных холмов, камовых гряд и зандровых равнин. Преобладают высоты от 120 до 200 метров. Максимальная расчленённость рельефа наблюдается в верхнем течении, где перепады высот достигают 80-100 метров на протяжении первых 60 километров русла. Склоны долины крутые, местами обрывистые, изрезаны оврагами и логами. В среднем течении рельеф выполаживается, уклоны уменьшаются до 0,5-0,8‰. Здесь долина расширяется до 1,5-2,5 километров, появляется развитая пойма с старицами и заболоченными понижениями.

Геологическое строение бассейна определяется кристаллическим фундаментом, перекрытым мощной толщей четвертичных отложений. На поверхности залегают валунные суглинки и супеси мощностью от 5 до 25 метров. В понижениях рельефа распространены озёрно-ледниковые глины, обладающие низкой водопроницаемостью. Подстилающие коренные породы - протерозойские кристаллические сланцы и граниты - залегают на глубине 30-50 метров и практически не участвуют в формировании стока. Важным элементом геологической структуры являются линзы и прослои песчано-гравийных отложений, приуроченные к камам и озам. Эти участки служат естественными резервуарами подземных вод, которые в меженный период питают реку.

Почвенный покров бассейна представлен преимущественно подзолистыми и дерново-подзолистыми почвами, развитыми на моренных суглинках. В понижениях рельефа формируются болотно-подзолистые и торфяно-болотные почвы. Глубина промерзания достигает 80-120 см в зависимости от снежного покрова и характера растительности. Водно-физические свойства почв таковы, что весной при промерзании грунта практически весь талый сток реализуется по поверхности, что обуславливает быстрое формирование паводка и высокие максимальные расходы.

Растительность бассейна относится к южно-таёжной подзоне. Лесистость водосбора составляет около 72%, причём преобладают еловые и смешанные леса с примесью берёзы и осины. В верхнем течении встречаются сосновые боры на песчаных грядках. По речным долинам распространены заболоченные ельники и ольшаники. Открытые пространства занимают луговые угодья и сельскохозяйственные земли, сосредоточенные в среднем течении вблизи населённых пунктов. Залесённость и высокая доля болот способствуют аккумуляции влаги, снижению неравномерности стока и поддержанию устойчивого меженного расхода в летний период.

Гидрографическая сеть бассейна достаточно разветвлена. Основные притоки Ояти - реки Ярма, Тукша, Чагода - относятся к малым и имеют протяжённость от 20 до 60 километров. Густота речной сети в среднем составляет 0,4 км/км², что типично для данного региона. Озёрность бассейна невысока - менее 2%, крупные водоёмы отсутствуют. В то же время на водосборе насчитывается несколько сотен небольших озёр ледникового происхождения, расположенных в верховьях притоков и выполняющих роль естественных регуляторов стока.

Антропогенная освоенность территории умеренная. Плотность населения не превышает 5-7 человек на км². Основные населённые пункты - посёлки городского типа Оять, Алёховщина, село Ефимовский - сосредоточены в нижнем течении. Промышленность представлена лесозаготовкой и деревообработкой, развитие которых в последние 20 лет привело к локальному нарушению гидрологического режима на отдельных притоках. Сельское хозяйство развито слабо и не оказывает существенного влияния на водный баланс.

1.1 Климатические характеристики

Климат бассейна Ояти формируется под влиянием атлантических воздушных масс и относится к умеренно континентальному типу с выраженными чертами морского климата. Характерна высокая изменчивость погодных условий, обусловленная частой сменой циклонов и антициклонов. Средняя годовая температура воздуха в районе устья реки составляет +4,1°C, в верховьях - около +2,9°C. Наиболее холодный месяц - февраль, когда средняя температура опускается до -9...-11°C. Июль - самый тёплый месяц, со средней температурой +16...+18°C. Заморозки на почве возможны с конца сентября до начала мая, продолжительность безморозного периода - около 120-130 дней.

Годовая сумма осадков колеблется от 620 до 720 мм в зависимости от высоты местности и удалённости от Ладожского озера. Максимум осадков приходится на летне-осенний период (июль - октябрь), минимум - на февраль - март. Соотношение тёплого и холодного полугодий в распределении осадков составляет примерно 60% к 40%. Впрочем, межгодовая изменчивость осадков велика: в отдельные годы годовая сумма может отклоняться от нормы на 20-25%. Снежный покров устанавливается в середине ноября и сохраняется до конца апреля. Средняя максимальная высота снега к концу зимы достигает 50-70 см на открытых участках и 70-90 см в лесу. Запасы воды в снежном покрове перед началом снеготаяния составляют 120-160 мм.

Температурный режим зимы подвержен колебаниям, связанным с прохождением атлантических циклонов. Оттепели наблюдаются практически ежегодно, причём в последние годы их частота возросла. По данным метеостанции Тихвин за период 2020-2024 годов, в январе - феврале фиксировалось от 3 до 7 дней с положительными температурами. Это приводит к частичному снеготаянию, образованию ледяной корки и изменению структуры снежной толщи, что в итоге влияет на характер весеннего половодья.

Весной переход средней суточной температуры воздуха через 0°C происходит в среднем 10-15 апреля в южной части бассейна и на 5-7 дней позже в северной. Активное снеготаяние начинается в середине апреля и длится от 15 до 25 дней. Интенсивность снеготаяния зависит от характера погоды: в тёплые и солнечные вёсны слой снега может растаять за 10-12 дней, что вызывает резкий подъём уровня воды и формирование высоких пиков половодья. В холодные и затяжные вёсны снеготаяние растягивается до конца апреля - начала мая, половодье проходит более плавно.

Летний период характеризуется умеренным увлажнением. Средняя месячная температура июля составляет +17...+18°C, но возможны периоды с температурой выше +25°C. Осадки выпадают преимущественно

в виде ливневых дождей, что приводит к формированию паводков на малых притоках. Испарение с водной поверхности достигает 350-400 мм за тёплый период, что сопоставимо с осадками, поэтому летом река переходит в фазу устойчивой межени.

Осенний период отличается высокой облачностью и значительным количеством осадков. Переход температуры через 0°C происходит в конце октября - начале ноября. С этого времени начинается образование ледовых явлений на реке. Осенние дожди могут вызывать подъёмы уровня воды, однако они обычно не достигают масштабов весеннего половодья. Осенние паводки в последние годы стали более частыми и интенсивными, что связывают с общим увеличением количества осадков в октябре - ноябре.

Ветровой режим характеризуется преобладанием западных и юго-западных ветров. Средняя скорость ветра составляет 3-4 м/с, максимальные порывы могут достигать 20-25 м/с во время прохождения циклонов. Влияние ветра на водный режим Ояты незначительно, однако в устьевом участке, где река впадает в Свирь, возможны ветровые нагоны и сгонные явления, влияющие на уровень воды.

Климатические условия бассейна определяют режим водности реки. Преобладание осадков в тёплый период и значительные запасы снега обеспечивают высокую водность весной и умеренную - летом. Зимние оттепели и осенние дожди вносят дополнительные коррективы в традиционную схему внутригодового распределения стока, что требует более детального учёта при прогнозировании половодий и паводков.

1.2 Гидрологический режим

Гидрологический режим Ояти определяется климатическими факторами, физико-географическими особенностями бассейна и характером подстилающей поверхности. Река относится к восточноевропейскому типу водного режима с ярко выраженным весенним половодьем, летне-осенней меженью и паводками в переходные периоды. Средний многолетний расход воды в устье составляет около 35 м³/с, что соответствует модулю стока 6,7 л/(с·км²). Годовой объём стока - примерно 1,1 км³.

Питание реки смешанное, с преобладанием снегового. Доля снегового питания оценивается в 55-60%, дождевого – 20-25%, грунтового - 15-20%. Эти соотношения варьируются по годам в зависимости от характера зимы и весны. В многоводные годы, когда запасы воды в снеге превышают норму на 30-40%, доля снегового питания возрастает до 65-70%. В маловодные годы, напротив, увеличивается роль грунтового питания, поддерживающего сток в межень.

Весеннее половодье начинается обычно в первой декаде апреля и продолжается до конца мая. Подъём уровня воды происходит быстро, за 7-12 дней уровень может подняться на 3-5 метров относительно меженного. Максимальные расходы воды наблюдаются в середине - конце апреля. К концу мая уровень воды обычно снижается до межени.

Летне-осенняя межень длится с июня по сентябрь. В этот период река питается преимущественно грунтовыми водами, поступающими из водоносных горизонтов, приуроченных к песчано-гравийным отложениям. Летние паводки формируются после интенсивных дождей и обычно кратковременны. Подъёмы уровня составляют 0,5-1,2 метра, продолжительность паводка – 3-7 дней.

Осенний период характеризуется некоторым увеличением водности за счёт дождевых паводков. В сентябре - октябре на Ояти может наблюдаться несколько паводочных волн, связанных с прохождением циклонов. В отдельные годы осенние паводки по расходу воды приближаются к весеннему половодью, особенно если осень выдаётся дождливой.

Зимняя межень устанавливается с образованием ледостава и продолжается до начала весеннего снеготаяния. Река переходит на грунтовое питание. Впрочем, зимние оттепели могут вызывать кратковременные подъёмы уровня на 20-40 см, связанные с поступлением талых вод. Ледовый режим устойчив: ледостав наступает в середине - конце ноября, вскрытие происходит в середине апреля. Толщина льда к концу зимы достигает 50-70 см. Ледоход обычно проходит спокойно, заторы льда редки и наблюдаются в основном на участках с крутыми излучинами.

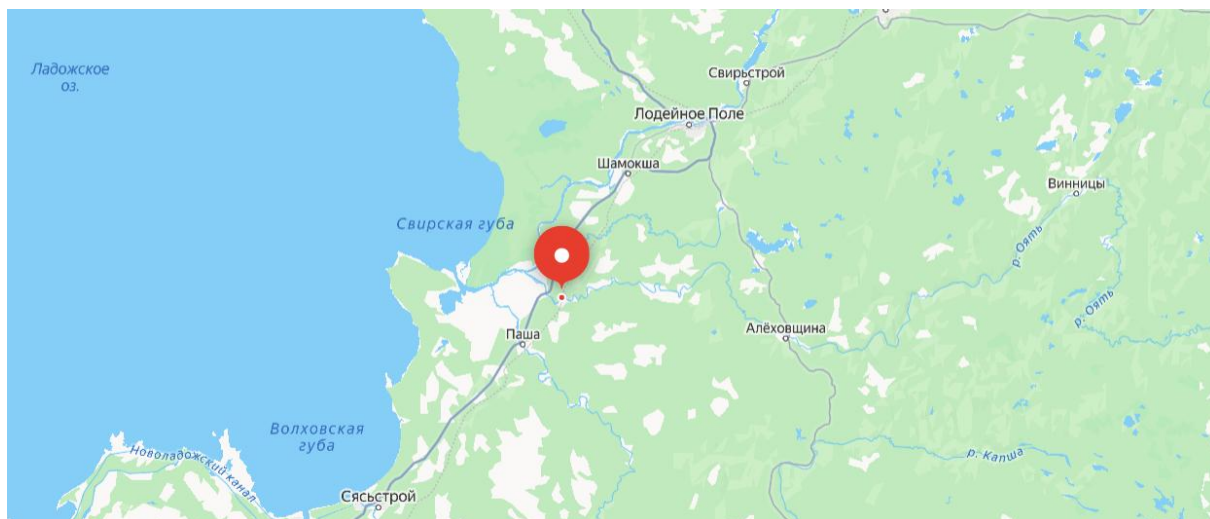


Рисунок 2. Расположение реки Оять относительно Ладожского оз.

1.3 Условия формирования половодья

Весеннее половодье на реке Оять - результат совокупного действия климатических и физико-географических факторов. Основным источником половодья является снеготаяние, интенсивность которого определяется температурой воздуха, солнечной радиацией и характером подстилающей поверхности. Запасы воды в снежном покрове перед началом таяния варьируются от 100 до 180 мм, при этом межгодовая изменчивость достигает 40%. Снежный покров формируется постепенно в течение ноября - марта, а его максимальная мощность достигается к концу марта.

Начало снеготаяния на водосборе Ояти обычно приходится на вторую декаду апреля. Первыми освобождаются от снега южные склоны и открытые участки, где инсоляция выше. Лесные массивы удерживают снег дольше, что приводит к растянутости периода снеготаяния на 10-15 дней. В тёплые вёсны, когда температура воздуха в апреле превышает норму на 3-5°C, снег может сойти за 8-10 дней. Это вызывает резкий подъём уровня воды в реке и формирование высоких пиков половодья. Напротив, в холодные вёсны снеготаяние растягивается до конца апреля, половодье проходит более плавно, но с меньшими максимальными расходами.

Промерзание почвы играет ключевую роль в формировании поверхностного стока. К концу зимы глубина промерзания составляет 60-120 см в зависимости от характера зимы и мощности снежного покрова. Промёрзшие суглинистые почвы практически водонепроницаемы, поэтому талые воды стекают по поверхности, быстро формируя склоновый сток. На песчаных участках, где промерзание меньше и водопроницаемость выше, часть талых вод инфильтруется в грунт, пополняя запасы грунтовых вод.

Растительный покров, особенно лес, оказывает регулирующее влияние на ход половодья. Лесные массивы задерживают снеготаяние, снижают интенсивность стока и способствуют более равномерному

поступлению воды в реку. Вырубки, напротив, приводят к ускорению снеготаяния и увеличению пиковых расходов. В последние годы на отдельных притоках Ояти наблюдается рост максимальных расходов, что связывают с активной лесозаготовкой в верхнем течении.

Заболоченность бассейна также влияет на формирование половодья. Болота, особенно верховые, аккумулируют значительную часть талых вод, выполняя роль естественных регуляторов стока. По оценкам, до 15-20% талых вод задерживается в болотных массивах, что снижает общий объём половодного стока на реке. Впрочем, после насыщения болот влагой их регулирующая роль уменьшается, и в последующие фазы половодья они могут дополнительно подпитывать реку.

Характер погоды в период снеготаяния - решающий фактор. Солнечная и тёплая погода способствует интенсивному таянию в дневные часы и образованию мощных волн стока. Пасмурная погода с невысокими температурами замедляет процесс. Дождевые осадки в период снеготаяния усиливают половодье, так как дополнительный приток воды накладывается на талый сток.

Особенности рельефа также сказываются на процессе формирования половодья. В верхнем течении, где уклоны велики, талые воды быстро стекают в реку, обеспечивая оперативный подъём уровня. В среднем и нижнем течении, где уклоны меньше, волна половодья растягивается и проходит более плавно. Время добегания воды от верховьев до устья составляет 3-5 суток, что необходимо учитывать при краткосрочном прогнозировании уровней.

Антропогенные факторы пока не оказывают определяющего влияния на половодье. На Ояти отсутствуют крупные водохранилища, способные регулировать сток. Локальное воздействие может быть связано с мелиоративными работами и изменением залесённости бассейна. В

перспективе эти факторы могут стать более значимыми, если темпы хозяйственной деятельности возрастут.

Таким образом, половодье на Ояти формируется в результате сложного взаимодействия климатических условий, характера подстилающей поверхности, степени промерзания почвы и особенностей растительного покрова. Высокая изменчивость этих факторов обуславливает значительную межгодовую вариацию параметров половодья, что создаёт трудности для долгосрочного прогнозирования.

1.4 Исходные данные для расчетов и прогнозов водонепроницаемого слоя

В работе использовались среднесуточные данные о расходах реки Оять. Для расчета модели запасов воды в снеге и прогнозирования стока необходимы данные об атмосферных осадках, высоте снежного покрова и данные снегомерных съемок.

Исследуемый период с 2008 года по 2021 год. Модель формирования водонепроницаемого слоя была рассчитана для реки Оять по данным 3 метеостанций: г. Винницы, г. Тихвин и г. Вытегра, а также по данным гидрологических постов д. Мининская и д. Акулова гора - (рисунок 1).

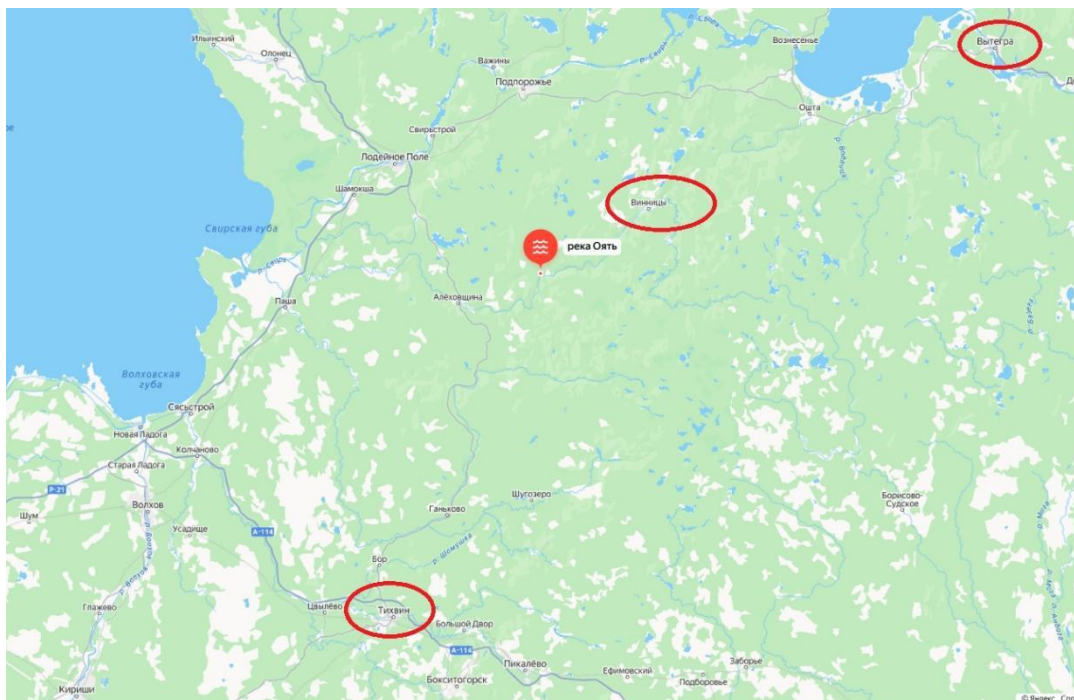


Рисунок 3. Схема расположения метеостанций.

2. Математический аппарат

Комплексное моделирование водонепроницаемого слоя реки Оять, требует выявления устойчивого перехода через ноль.

Также в главе последовательно изложены физические и математические основы моделирования снегозапасов и водоотдачи.. Формулы и расчётные зависимости представлены в виде, удобном для их численной реализации и программной аппроксимации.

2.1 Устойчивый переход через 0

Определение данного момента критично для идентификации начала формирования водонепроницаемого слоя. В условиях неустойчивой зимы с чередованием морозных периодов и оттепелей температура на границе почвы и атмосферы может многократно переходить через нулевую

отметку, что затрудняет однозначную идентификацию момента начала промерзания.

Под устойчивым переходом температуры через 0°C понимается такой момент, после которого на протяжении определённого периода (обычно 5–7 суток) не наблюдается возврата температуры к положительным значениям. Эта концепция применима как к температуре воздуха, так и к температуре поверхности почвы. Критерий устойчивости может быть уточнён с учётом региональных климатических особенностей.

Для формализации критерия устойчивого перехода используется анализ кумулятивных сумм отрицательных температур. Дата устойчивого перехода определяется как день, начиная с которого кумулятивная сумма отрицательных среднесуточных температур монотонно возрастает и достигает порогового значения, обеспечивающего начало промерзания на заданную глубину.

Альтернативный подход основан на анализе продолжительности непрерывных периодов с отрицательными температурами. Устойчивый переход фиксируется, когда длительность морозного периода превышает критическую продолжительность, определяемую теплофизическими свойствами почвы и наличием снежного покрова. Для условий Центральной России эта продолжительность составляет 3–5 суток при отсутствии снега и 7–10 суток при наличии снежного покрова толщиной более 10 см.

Наличие снежного покрова существенно влияет на динамику промерзания почвы. Снег обладает низкой теплопроводностью и высокой отражательной способностью, что замедляет промерзание и может полностью предотвратить образование глубокого мёрзлого слоя при раннем установлении устойчивого снежного покрова. В практике моделирования используется пороговое значение толщины снега 15–20 см, при превышении которого интенсивность промерзания снижается в 2–3

раза. Определение момента устойчивого перехода осложняется пространственной неоднородностью температурного режима, связанной с различиями в рельефе, растительном покрове и экспозиции склонов. На южных склонах и открытых участках устойчивый переход может наступать на 1–2 недели позже, чем на северных склонах и защищённых понижениях. Это требует учёта ландшафтной дифференциации при разработке региональных прогностических методик.

2.2 Модель формирования запасов воды в снеге и водоотдача из него

Процесс весеннего половодья в бассейне реки Оять, определяется преимущественно снеговым питанием. Формирование стока в этот период невозможно без учета аккумуляции твердых осадков в зимний период и их последующей водоотдачи при весеннем снеготаянии. Снежный покров в гидрологическом моделировании рассматривается как специфический природный резервуар, обладающий емкостью, теплоемкостью и способностью задерживать талые воды.

Согласно физическим представлениям, изложенным в фундаментальных курсах гидрологических прогнозов, процесс снеготаяния и водоотдачи делится на две основные фазы:

1. Фаза прогрева снежной толщи (влагонакопление и прогрев до 0°C). В этот период поступающее тепло расходуется на повышение температуры снега и его уплотнение. Поверхностный сток талых вод практически отсутствует, так как вся вода задерживается в порах снега, на его поверхности, а также впитывается в мерзлый или талый почвогрунт.

2. Фаза интенсивного снеготаяния (водоотдача). Начинается в момент, когда снежная толща прогрета до 0°C по всей глубине, а ее влагоемкость исчерпана. Избыток талой воды начинает поступать на поверхность водосбора и формировать склоновый сток.

Математически запасы воды в снеге (S , мм вод. ст.) в течение зимнего периода накапливаются и описываются балансовым уравнением:

$$S = \Sigma(X_{\text{сн}} - E_{\text{зим}}),$$

где $X_{\text{сн}}$ – сумма твердых осадков за период;

$E_{\text{зим}}$ – потери на испарение со снежной поверхности.

В зимний период потерями на испарение в силу их малости часто пренебрегают, принимая $S \approx \Sigma X_{\text{сн}}$.

Водоотдача со снежного покрова (M , мм/сут) в период весеннего снеготаяния определяется теплообменом снежной поверхности с атмосферой. Упрощенная концептуальная модель водоотдачи базируется на уравнении теплового баланса и принципе температурного индекса. Интенсивность таяния M выражается через сумму среднесуточных положительных температур воздуха:

$$M = \alpha \cdot (t_{\text{возд}} - t_0),$$

где α – коэффициент снеготаяния (мм/°С в сутки), зависящий от экспозиции, наличия леса и болот на водосборе;

$t_{\text{возд}}$ – среднесуточная температура воздуха;

t_0 – температура начала интенсивного таяния (принимается равной 0°С).

Для бассейна реки Оять значение коэффициента α имеет значительную пространственную неоднородность. Заболоченные территории (заболоченность участка от посёлка Лукинского до Котел-порога, а на участке от истока до деревни Алёховщина дренирует обширные лесные) обладают собственной теплоемкостью и альбедо, что требует дополнительной параметризации коэффициента снеготаяния для разных типов подстилающей поверхности.

Однако не вся образовавшаяся талая вода поступает в русловую сеть. Часть влаги ($W_{\text{задерж}}$) аккумулируется в микрорельефах, заболоченных участках и порах оттаивающего грунта.

Таким образом, объем водоотдачи, формирующий поверхностный сток ($q_{\text{пов}}$), рассчитывается с учетом коэффициента водоотдачи η :

$$q_{\text{пов}} = \eta \cdot M,$$

где η – коэффициент, учитывающий потери талых вод на заполнение депрессий, инфильтрацию и испарение. Для заболоченных участков реки значение η варьируется в широких пределах и является одним из ключевых параметров, подлежащих оптимизации при калибровке модели.

Представленная модель позволяет перейти от метеорологических данных (температура, осадки) к гидродинамическому входному воздействию – объему воды, поступающему на склоны водосбора, который далее используется в модели формирования стока.

Динамика изменения запаса воды в снеге S (в мм водного эквивалента) для каждого i -го дня описывается линейным уравнением водного баланса:

$$S_i = \sum_{j=1}^m (k_f \cdot X_j) - k_t \cdot t_i^+,$$

где:

S_i – запас воды в снежном покрове на i -й день (мм);

X_i – количество твердых осадков, выпавших в i -й день (мм водного эквивалента);

t_i^+ – положительная среднесуточная температура воздуха в i -й день ($t_i^+ = t_i$ при $t_i > 0$, и 0 при $t_i \leq 0$), °C;

k_f – безразмерный коэффициент, учитывающий потери при снегонакоплении (учитывает испарение, выдувание, сублимацию; $0 < k_f \leq 1$);

k_t – температурный коэффициент снеготаяния (водоотдачи), мм/°C (показывает, сколько миллиметров водного эквивалента тает при повышении температуры на 1°C за сутки).

Физический смысл уравнения заключается в следующем: текущий снегозапас представляет собой разность между суммарным объемом твердых осадков, выпавших за холодный период (скорректированным на коэффициент потерь), и суммарным объемом водоотдачи, сформировавшимся в результате оттепелей.

Численная аппроксимация (дискретная форма для расчетов). При суточном шаге моделирования, необходимом для пошагового отслеживания динамики снегозапасов, уравнение целесообразно представить в рекуррентной (итерационной) форме. S_{i-1} — запас воды в снеге на конец предыдущего ($i-1$) дня. В этом случае расчетное значение снегозапаса для i -го дня определяется путем добавления к предыдущему значению выпавших твердых осадков (с учетом коэффициента потерь) и вычитания объема талых вод (при условии положительной температуры):

$$S_i = S_{i-1} + k_f \cdot X_i - k_t \cdot t_i^+$$

2.3 Модель водонепроницаемого слоя

Водонепроницаемость определяется как способность почвы задерживать или ограничивать инфильтрацию воды через слои, особенно в период промерзания и оттепелей.

Формирующим фактором служит сочетание глубины промерзания, влажности почвы и структуры почвогрунтов: тонкодисперсные почвы (глины, суглинки) обеспечивают более активную миграцию пленочной воды и формирование водонепроницаемого слоя; крупнозернистые почвы (пески, супеси) — инфильтрация через них менее интенсивна.

Водонепроницаемый слой образуется в начале зимы из-за быстрого промерзания переувлажненной осенью почвы и может сохраняться всю зиму; таяние снега и оттепели во взаимодействии с этим слоем может восстанавливать или разрушать слой водонепроницаемости.

Основное условие возникновения водонепроницаемого слоя в почвах с низкой пористостью связано с критическим сочетанием влажности и температуры, при которых образуется закрытая воздухонепроницаемая сеть пор.

В почвах с большим количеством связанной воды процесс таяния и повторного замерзания влияет на возможность образования водонепроницаемого слоя: для некоторых типов почв критическое температура и влажность рассчитываются по формулам:

$$T_k = \frac{\rho_l \left(P_{об} - \frac{W_{н.к.}}{\rho_l} \right) (L + c_v T_n)}{c_n \rho_{с.п.} c_l W_n}$$

$$W_{н.к.} = \frac{(L + c_v T_n) [P_{об} \rho_l + \rho_{с.л.} W_{нз}(0) (1 - \rho_l / \rho_v)] +}{\rho_{с.п.} (L + c_v T_n - c_l T_k)} + \frac{[c_n + W_{нз}(T_k) (c_v - c_l)] \rho_{с.п.} T_k - L \rho_{с.п.} [W_{нз}(0) - W_{нз}(T_k)]}{\rho_{с.п.} (L + c_v T_n - c_l T_k)}$$

Теплофизический метод учитывает тепловые взаимодействия талой воды с мерзлой почвой и позволяет оценить инфильтрацию через водонепроницаемый слой.

Мощность водонепроницаемого слоя связана с глубиной промерзания и суммой суточных отрицательных температур, равных и ниже -4°C , на глубине $\sim 0,1$ м, для более тонких грунтов (глины, суглинки) взаимодействие тепла и воды существенно влияет на образование и устойчивость слоя.

Практическое применение

Для оценки наличия и параметров водонепроницаемого слоя необходимы, профиль температуры почвы (20, 40, 80, 160, 320 см) и статистика влажности на конец зимы, влагово-физические свойства почв (плотность пористости, коэффициенты теплоёмкости и плавления), мониторинг глубины промерзания

2.4 Критерии оценки прогноза

В качестве критерия эффективности и точности методики моделирования принимается отношение средней квадратической погрешности поверочных расчетов (S) к среднему квадратическому отклонению изменения уровня воды от нормы (S/σ).

Средняя квадратическая погрешность S вычисляется по формуле:

$$S = \sqrt{[\Sigma(H_{\text{факт}} - H_{\text{расч}})^2 / (n - m)]},$$

где n – число членов ряда;

m – число параметров в модели.

Когда разработана методика прогнозов, то необходимо оценить ее точность и эффективность. Точность методики оценивается по распределению величин погрешностей поверочных прогнозов или по их обеспеченности, т. е. по величинам вероятности того, что погрешности прогнозов не превысят заданных предельных значений. Эта оценка точности методики исходит из предпосылки, что распределения погрешностей прогнозов, которые будут выпускаться в будущем, являются такими же, как и для поверочных прогнозов. Под поверочными прогнозами понимается совокупность прогнозов, составленных по разработанной методике по данным наблюдений за прошлые годы. Методика может использоваться на практике, если она достаточно точна. Мерой ее точности служит среднеквадратическая погрешность поверочных прогнозов S :

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{\text{ф}} - Y_{\text{пр}})^2}{n - m}},$$

где $Y_{\text{ф}}$ – фактическое значение величины; $Y_{\text{пр}}$ (4) – предсказанное значение; n – число членов ряда; m – число параметров в прогностическом

уравнении, при использовании линейной зависимости (вида $y = ax + b$) $m=2$. За критерий применимости и качества методики принимается отношение S/σ или $S/\sigma \Delta$, т. е. отношение среднеквадратической погрешности поверочных прогнозов к среднеквадратическому отклонению предсказываемой величины от среднего значения либо к ее изменению за период заблаговременности. Методика прогноза считается практически приемлемой, если обеспеченность допустимой погрешности поверочных прогнозов не менее чем на 10 % превышает обеспеченность вероятного отклонения предсказываемой величины от среднего. Это означает, что:

при $n \leq 15$ должно быть $S/\sigma \Delta \leq 0,70$;

при $15 < n \leq 25$ должно быть $S/\sigma \Delta \leq 0,75$;

при $n > 25$ должно быть $S/\sigma \Delta \leq 0,80$.

Считается, что распределения гидрологических явлений и распределения погрешностей поверочных прогнозов подчиняется нормальному закону. Тогда, между величиной обеспеченности погрешностей прогнозов и корреляционным отношением зависимости предсказываемого явления от его факторов, будет иметься функциональная зависимость. Чем выше корреляционное отношение, тем выше обеспеченность величины погрешности прогнозов.

3. Математическое моделирование условий формирования водонепроницаемого слоя

3.1 Моделирование и прогнозирование снегозапасов и водоотдачи из снега

Бассейн реки Оять характеризуется высокой степенью заболоченности и залесенности, что оказывает определяющее влияние на процессы аккумуляции твёрдых осадков в зимний период и их последующей трансформации в поверхностный сток. Как указано в первой главе данной работы, для моделирования использовались данные

метеостанций г. Винницы, г. Тихвин и г. Вытегра, а также гидрологических постов д. Мининская и д. Акулова гора за исследуемый период (в частности, за 2009 год, как репрезентативный для калибровки модели).

Исходными данными для построения модели снегонакопления и водоотдачи послужили:

1. Ряды среднесуточных температур воздуха, определяющие интенсивность таяния.
2. Ряды суточных осадков, идентифицированных как твердые (при $t_{\text{возд}} < 0^{\circ}\text{C}$ или с учетом синоптических условий).

В основе моделирования лежит концепция снежного покрова как природного резервуара с конечной влагоемкостью, процесс формирования стока от таяния снега разделяется на фазу влагонакопления и фазу водоотдачи.

Важным этапом является учет влагоудерживающей способности снежной толщи и подстилающей поверхности. Не вся растаявшая вода сразу поступает в русло. Часть ее идет на восполнение дефицита влажности снега и заполнение микропонижений рельефа. Водоотдача, формирующая поверхностный сток, начинается только после достижения снегом предельной влагоемкости. Необходимо определить устойчивый переход температуры воздуха через 0°C к отрицательным температурам. Именно с этого момента выпадающие осадки формируют снежный покров. Начало периода водоотдачи и снеготаяния характеризуется переходом к положительным температурам. Пример расчета водоотдачи и снегозапасов представлен в таблице 1 и на рисунке 4.

Таблица 1 – Часть расчета водоотдачи по 2009 году по станции Вытегра в приложении *MS Excel*

Дата	Год	Месяц	День	h,см	t, °C	X,мм	Sф,мм	Sp,мм	W,мм
10.01.2009	2009	1	10	18	-21,6	0	38	45,5	0
11.01.2009	2009	1	11	18	-5,6	0		45,5	0
12.01.2009	2009	1	12	16	1,4	1,1		43,2	2,3
13.01.2009	2009	1	13	9	3	1,9		37,9	5,3
14.01.2009	2009	1	14	4	2,2	0,3		33,1	4,8
15.01.2009	2009	1	15	2	1,2	0,8		31	2,1
16.01.2009	2009	1	16	2	-4,8	0,3		31,2	0
17.01.2009	2009	1	17	2	-12	0		31,2	0
18.01.2009	2009	1	18	2	-11,9	0		31,2	0
19.01.2009	2009	1	19	2	-11,5	0,3		31,5	0
20.01.2009	2009	1	20	2	-7,1	0	18	31,5	0

=ЕСЛИ(K1111<K1110;K1110-K1111;"0 ")									
С	Е	F	G	Н	I	J	К	L	М
Дата	Месяц	День	Температура	Осадки	Пех	Запасы воды в снеге	Водоотдача	Высота снежного	
			2 м		од	фактические	расчетные	W	покрова на
29.12.2008	12	29	-3,3	0,9			29,2		11
30.12.2008	12	30	-1,3	0,2		27	29,4		11
31.12.2008	12	31	0,4	0			28,4	1	10
01.01.2009	1	1	-3,2	4,3			32,2	0	9
02.01.2009	1	2	-10,5	4,2			35,9	0	10
03.01.2009	1	3	-16,8	2,8			38,4	0	26
04.01.2009	1	4	-16,7	0,7			39	0	26
05.01.2009	1	5	-16,7	0,8			39,7	0	21
06.01.2009	1	6	-7,4	1,6			41,1	0	18
07.01.2009	1	7	-7,6	4,3			44,9	0	23
08.01.2009	1	8	-18,9	0,3			45,2	0	19
09.01.2009	1	9	-18	0,4			45,5	0	19
10.01.2009	1	10	-21,6	0		38	45,5	0	18
11.01.2009	1	11	-5,6	0			45,5	0	18
12.01.2009	1	12	1,4	1,1			43,2	5,3	16
13.01.2009	1	13	3	1,9			37,9	5,3	9
14.01.2009	1	14	2,2	0,3			33,1	4,8	4
15.01.2009	1	15	1,2	0,8			31	2,1	2
16.01.2009	1	16	-4,8	0,3			31,2	0	2
17.01.2009	1	17	-12	0			31,2	0	2
18.01.2009	1	18	-11,9	0			31,2	0	2
19.01.2009	1	19	-11,5	0,3			31,5	0	2
20.01.2009	1	20	-7,1	0		18	31,5	0	2
21.01.2009	1	21	-5,9	0			31,5	0	2
22.01.2009	1	22	-5,3	4,3			35,3	0	5
23.01.2009	1	23	-1,1	10,9			44,9	0	7

Рисунок 4. Определение водоотдачи на ст. Вытегра за 2009 год с помощью функции «ЕСЛИ» в приложении *MS Excel*.

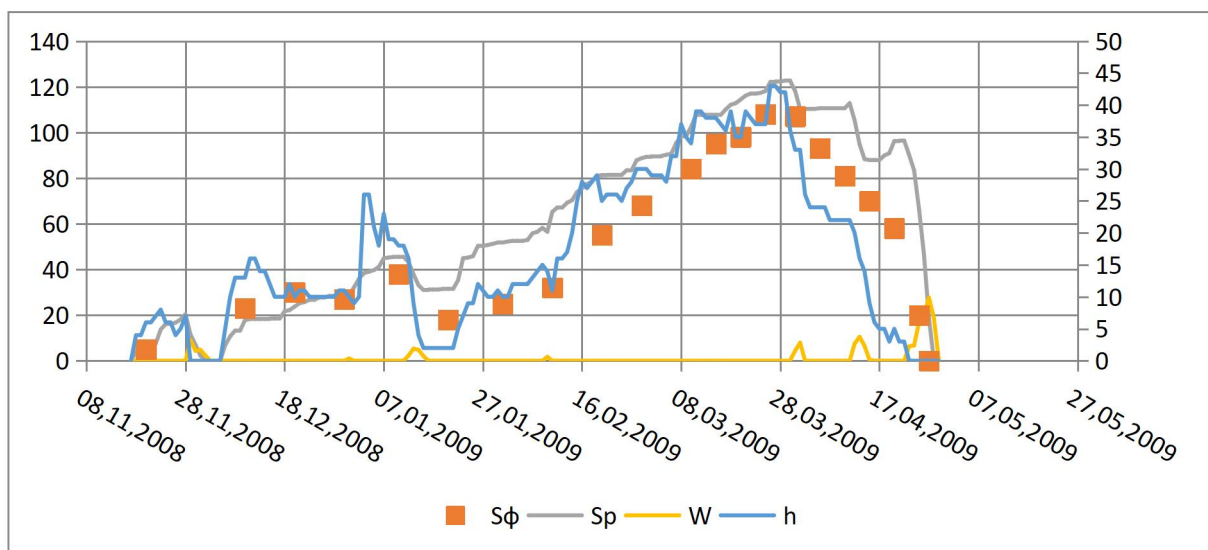


Рисунок 5. График фактических и расчетных снегозапасов по ст. Вытегра за 2009 год.

На рисунке 5 представлены фактические снегозапасы в миллиметрах, расчетные снегозапасы, высота снежного покрова в сантиметрах и водоотдача в миллиметрах. Процесс снегонакопления начался осенью 2008 года, с увеличением количества твердых осадков растет кривая снежного покрова, также происходит ступенчатое увеличение фактических снегозапасов. Расчетная кривая снегозапасов плавно растет, описывая тренд накопления снега в течение зимнего периода.

Пик снегонакопления приходится на начало весны 2009 года, конкретно на март. В этот период высота снежного покрова достигает своих максимальных значений около 40-45 сантиметров. При этом расчетные снегозапасы достигают пика в 120 миллиметров, тогда как фактические значения оказываются несколько ниже, составляя порядка 110 миллиметров. Это небольшое расхождение указывает на то, что используемая математическая модель незначительно завышает максимальный объем накопленной влаги по сравнению с реальными замерами.

Начиная с апреля на графике наблюдается фаза интенсивного весеннего снеготаяния. К концу апреля показатели практически обнуляются, что свидетельствует о полном сходе снежного покрова.

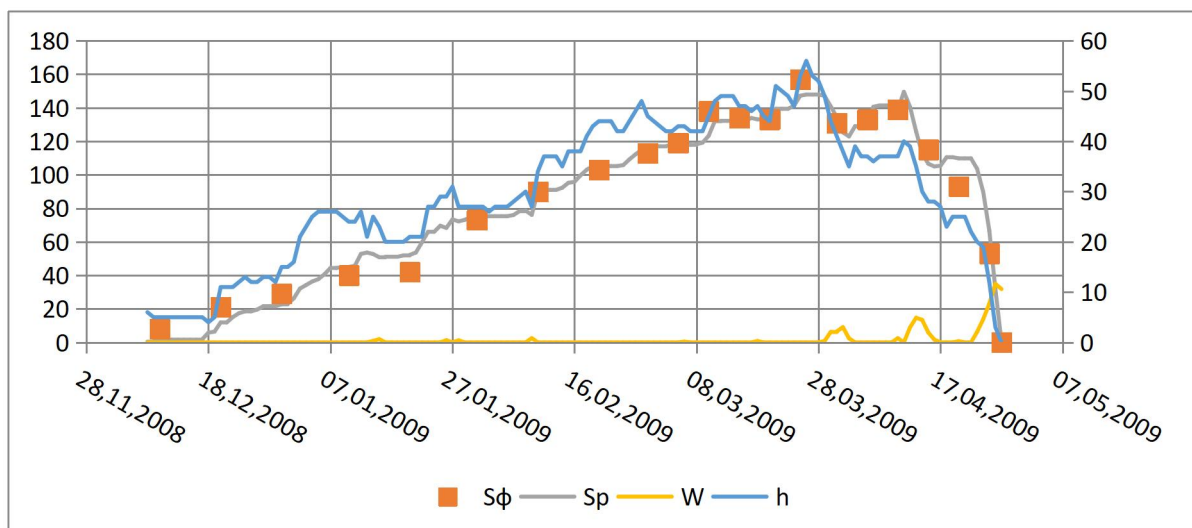


Рисунок 6. График фактических и расчетных снегозапасов по ст. Тихвин за 2009 год.

График (рисунок 6) демонстрирует динамику снегонакопления и снеготаяния по станции Тихвин за зимний сезон 2008–2009 годов.

На графике отображены четыре параметра: фактические снегозапасы, расчетные снегозапасы, высота снежного покрова и водоотдача. Наблюдается та же тенденция роста и уменьшения показателей, как и в предыдущем графике.

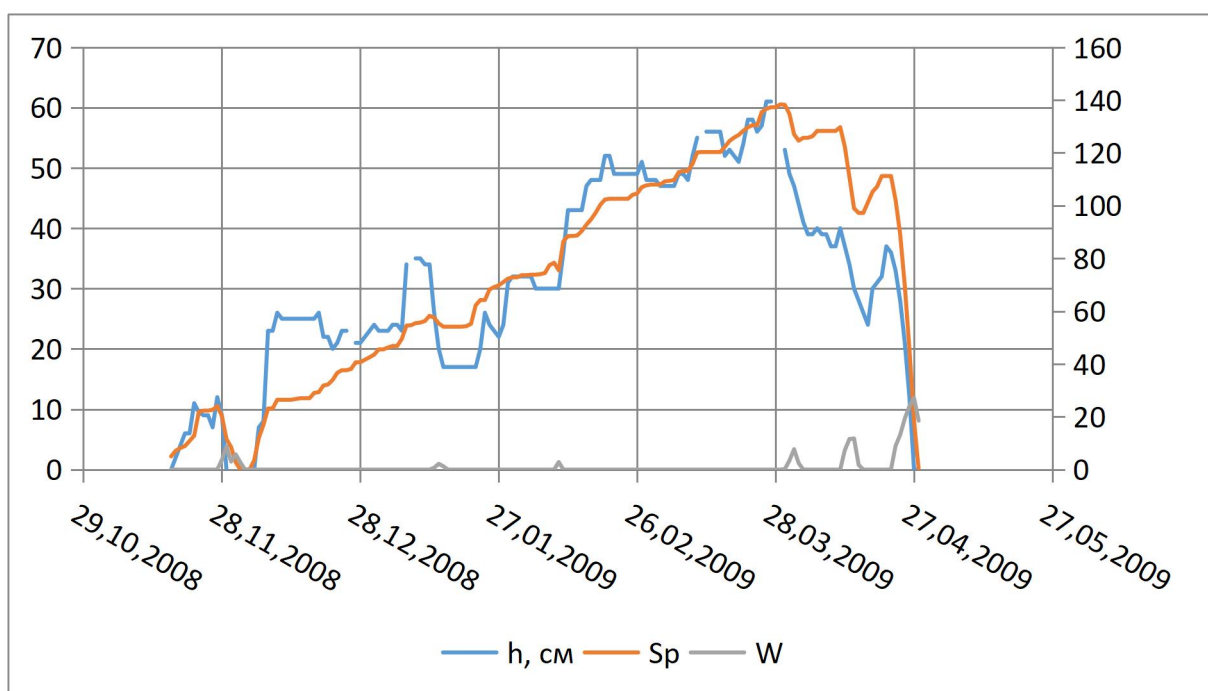


Рисунок 7. График расчетных снегозапасов по ст. Винницы за 2009 год.

График (рисунок 7) демонстрирует динамику снегонакопления и снеготаяния по станции Винницы за зимний сезон 2008–2009 годов.

На графике отображены три параметра: расчетные снегозапасы, высота снежного покрова и водоотдача. На данной станции не было фактических данных снегозапасов, описание проводилось только по расчётным.

Наблюдается та же тенденция роста и уменьшения показателей, как и в предыдущем графике.

Также сравнивались снегозапасы по трех метеостанциях, для определения сходства максимальных запасов воды в снеге и дат, когда это было зафиксировано. Результаты приведены на графике (рисунок 8) и в таблице 2 за 2009 год.

Таблица 2. Характерные даты снегозапасов по трём метеостанциям ст. Винницы, ст. Тихвин, ст. Вытегра

№	год	устойчивого переход через 0 по станции Винница		максимальных снегозапасов					окончания водоотдачи из снега			
		осенью предыдущего года	весной текущего года	26094 Тихвин	S, мм	22925 Винницы	S, мм	22837 Вытегра	S, мм	26094 Тихвин	22925 Винницы	22837 Вытегра
1	2008	03.11.2007	26.03.2008	10.03.2008	71,00	07.03.2008	166	28.02.2007	73	07.04.2008	16.04.2008	07.04.2008
2	2009	17.11.2008	11.04.2009	10.03.2009	138,00	29.03.2009	138	10.03.2008	155	27.04.2009	11.04.2009	28.04.2009
3	2010	03.12.2009	27.03.2010	20.03.2010	187,00	22.03.2010	137	25.03.2009	108	07.04.2010	27.03.2010	08.04.2010
4	2011	17.11.2010	02.04.2011	05.03.2011	234,00	30.03.2011	186	25.03.2010	161	18.04.2011	02.04.2011	09.04.2011
5	2012	15.11.2011	11.04.2012	05.04.2012	147,00	01.04.2012	123	31.03.2011	175	17.04.2012	11.04.2012	15.04.2012
6	2013	26.11.2012	11.04.2013	10.03.2013	140,00	10.04.2013	281	05.04.2012	99	19.04.2013	11.04.2013	19.04.2013
7	2014	25.11.2013	11.04.2014	05.03.2014	42,00	23.02.2014	109	10.04.2013	162	08.04.2014	11.04.2014	23.03.2014
8	2015	15.10.2014	28.03.2015	20.02.2015	106,00	21.02.2015	210	20.02.2014	49	04.04.2015	28.03.2015	02.04.2015
9	2016	06.11.2015	26.03.2016	10.02.2016	73,00	06.03.2016	185	14.02.2015	65	03.04.2016	26.03.2016	01.04.2016
10	2017	30.10.2016	02.04.2017	05.03.2017	105,00	03.04.2017	293	07.02.2016	82	19.04.2017	02.04.2017	24.04.2017
11	2018	20.11.2017	02.04.2018	31.03.2018	81,00	26.03.2018	243	06.03.2017	143	12.04.2018	02.04.2018	09.04.2018
12	2019	19.11.2018	15.03.2019	15.03.2019	215,00	13.03.2019	267	26.03.2018	80	17.04.2019	15.03.2019	09.04.2019
13	2020	28.10.2019	25.03.2020	10.02.2020	34,00	17.02.2020	62	14.03.2019	148	20.03.2020	25.03.2020	04.03.2020
14	2021	25.11.2020	24.03.2021	15.03.2021	87,00	22.03.2021	248	07.02.2020	46	14.04.2021	24.03.2021	04.04.2021

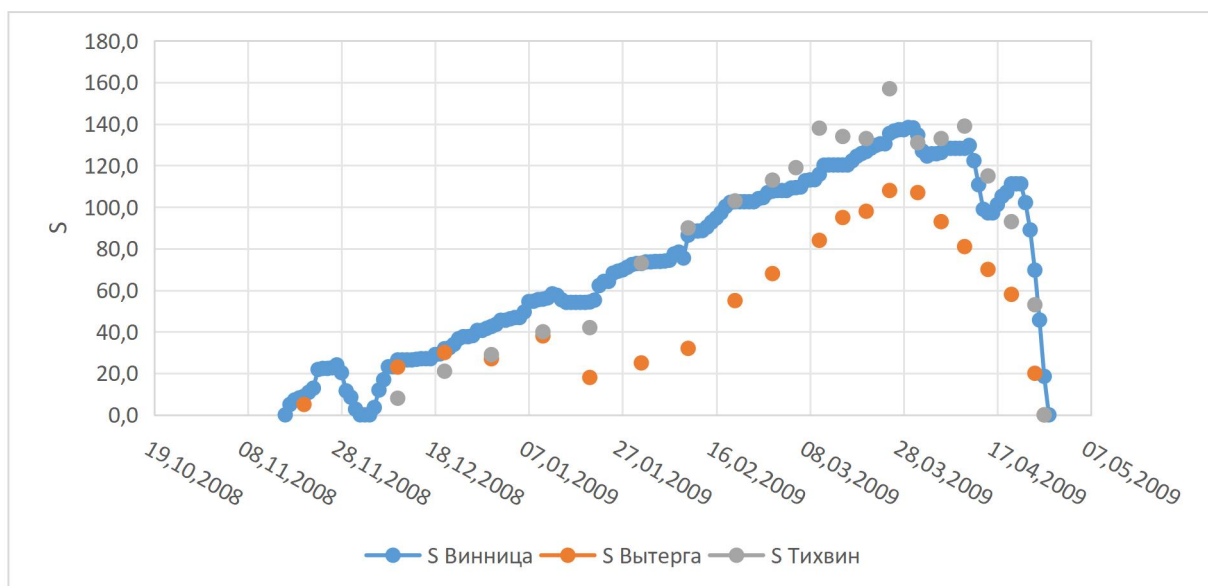


Рисунок 8. График снеговязпасов по 2009 году по трем метеостанциям ст. Винницы, ст. Тихвин, ст. Вытегра

График (рисунок 8) показывает динамику снеговязпасов по трем метеостанциям ст. Винницы, ст. Тихвин, ст. Вытегра в период с 17 ноября 2008 года по 27 апреля 2009 года.

Все три кривые демонстрируют с начала наблюдений и до середины зимы постепенный рост снеговязпасов, что соответствует периоду снегонакопления. Во второй половине марта - начало апреля фиксируется достижение максимального уровня. После достижения максимума происходит стремительное снижение запасов, свидетельствующее о фазе активного снеготаяния. Расчитанные значения по ст. Винница лидирует по объемам и скорости таяния, а на двух других станциях по измеренным данным ситуация более медленная. Также в приложение 1, 2, 3, 4 посчитаны и построены графики снеговязпасов еще по нескольким годам.

Построен график визуализации таблицы 2 с датами по снеговязпасам на трех метеостанциях ст. Винницы, ст. Тихвин, ст. Вытегра, с устойчивым переходом через 0 и расходами в период половодья по гидрологическим постам Мининская и Акулова Гора за 2009 год.

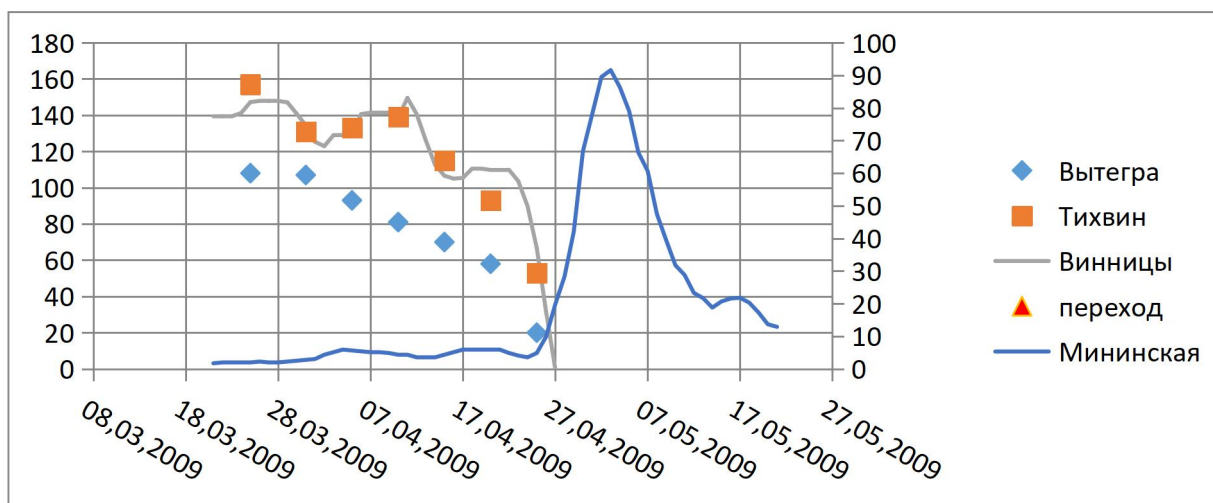


Рисунок 9. Визализация максимальных снегозапасов и половодья по посту Мининская и по трем метеостанциям Винницы, ст. Тихвин, ст. Вытегра

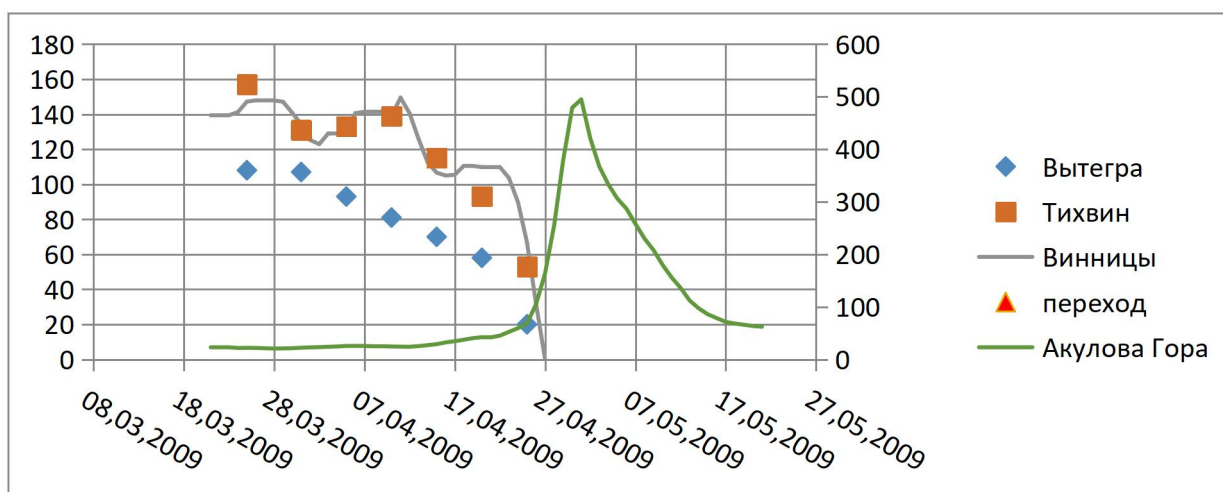


Рисунок 10. Визализация максимальных снегозапасов и половодья по посту Акулова Гора и по трем метеостанциям Винницы, ст. Тихвин, ст. Вытегра

На графиках (рисунки 9, 10) видно, что запасы снега на всех метеостанциях начинают стремительно таять в период середины апреля, примерно в это же время происходит подъём уровня воды. Половодье наступает после полного схода снегозапасов.

3.2 Моделирование и прогнозирование водонепроницаемого слоя

Для моделирования были взяты данные по двум метеостанциям г. Тихвин и г. Вытегра и по двум гидрологическим постам д. Мининская и д. Акулова гора

Исходными данными для построения модели водонепроницаемого слоя послужили:

1. Ряды суточных температур воздуха и почвы на разных глубинах (40, 60, 80, 160, 320)
2. Суточные расходы воды

Таблица 3 - Часть данных температур по 2009 году по станции Вытегра в приложении *MS Excel*

Температура почвы на глубине					t
20	40	80	160	320	
2,1	3	4	5,2	7	-3
1,6	2,7	4	5,2	6,8	-4,4
1,2	2,3	3,9	5,2	6,9	-4,7
1,1	2	3,7	5	6,8	-5,1
0,9	1,9	3,7	5	6,8	-3,9
0,9	1,8	3,5	5	6,8	-3,9
0,8	1,7	3,5	5	6,8	-3,4
0,7	1,5	3,2	5	6,6	-3,5
0,7	1,5	3,2	4,8	6,6	-2,9
0,7	1,5	3	4,7	6,6	-8,8
0,6	1,4	3	4,7	6,6	-21,7
0,5	1,3	3	4,6	6,4	-21,7
0,4	1,3	2,8	4,6	6,4	-18,4
0,4	1,3	2,8	4,5	6,4	-13,2
0,3	1,2	2,8	4,5	6,4	-9,6
0,3	1,1	2,7	4,4	6,4	-11,4
0,2	1,1	2,7	4,4	6,4	-13

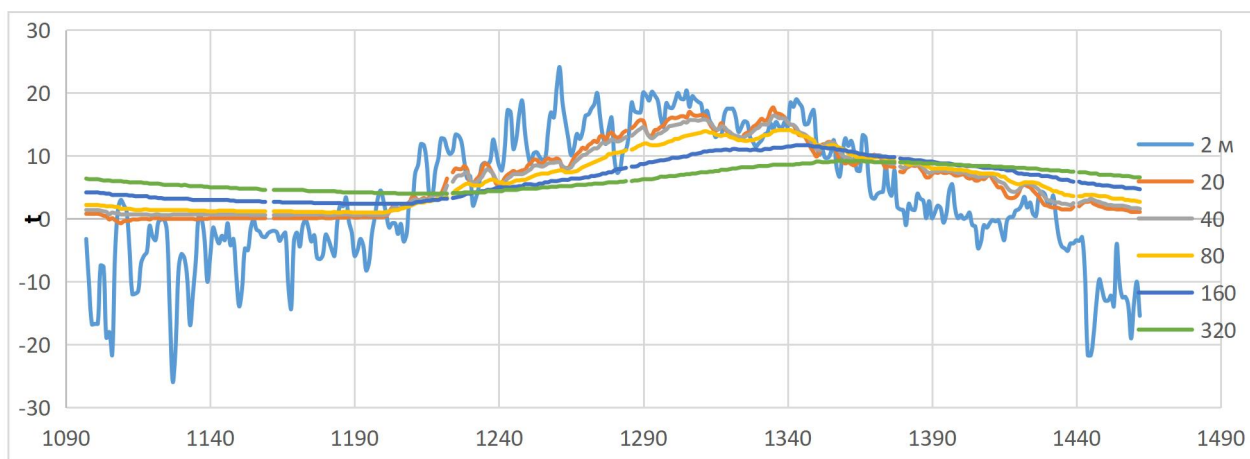


Рисунок 11. График температур воздуха и почвы на разных глубинах по ст. Вытегра за 2009 год.

На графике (рисунок 11) отображена динамика температур в течении года. Температура воздуха (2м) - самая изменчивая кривая, демонстрирует ярко выраженный сезонный ход. Зимой частые перепады и уменьшения температур до значений -20. Летом максимальные значения доходят до +20-25 градусов.

Температура почвы на глубинах (20-40) близких к поверхности повторяют форму воздушной кривой, но с меньшей амплитудой. На средних глубинах (80-160) колебания почти не заметны, температура держится около 0...+5.

На самом глубоком слое, кривая практически горизонтальная, что означает, что температуры почти не меняются в течении года.

Все кривые имеют общую тенденцию, понижение температур в начале и конце года (зима) и повышение в середине (лето), даже на большой глубине. В приложении 5 представлены еще несколько графиков по второй станции (Тихвин).

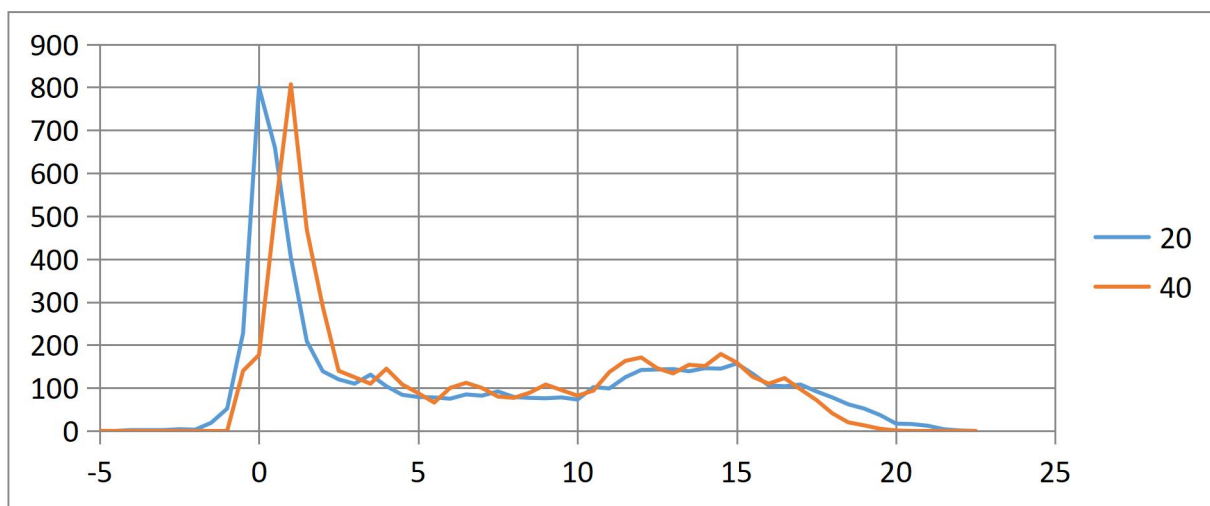


Рисунок 12. График частоты повторений температуры на различных глубинах по ежедневным данным за многолетний период на ст. Вытегра

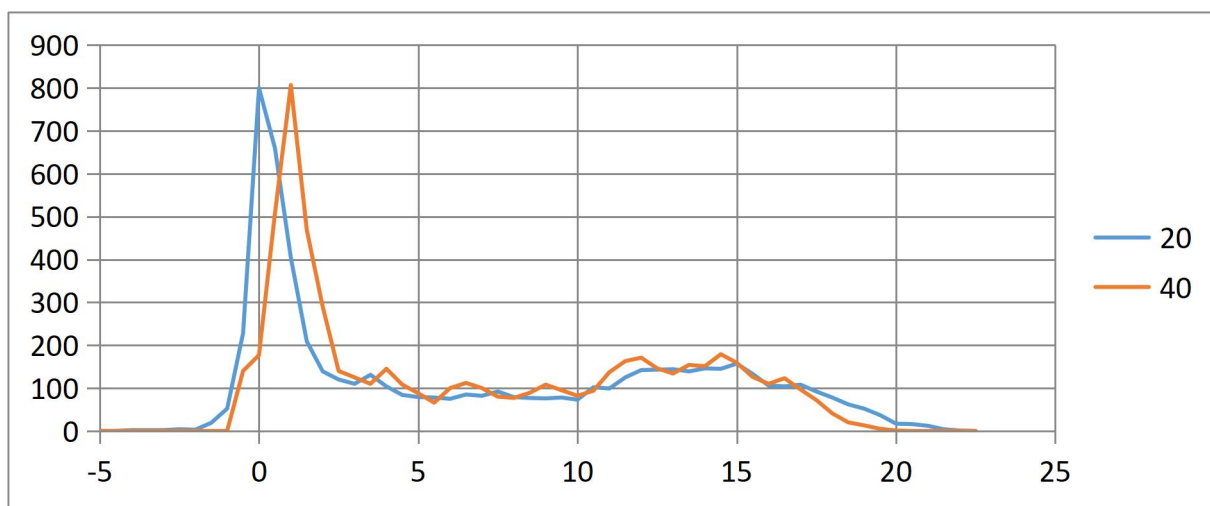


Рисунок 13. График частоты повторений температуры на различных глубинах по ежедневным данным за многолетний период на ст. Тихвин

На графике (рисунок 12, 13) видно, что у слой, который ближе к поверхности, наиболее частые значения температуры при 0 градусов, достигают отметки в 800 дней. Из этого следует, что чаще всего слои находятся на грани замерзания/оттаивания. А у слоя, который чуть глубже, температура выше на несколько градусов, которая также достигает высокой отметки частоты. Температура на большей глубине медленнее прогревается и остывает.

Таблица 4. Моделирование температуры на глубине 20 см

	0	20расч	40	5
1	0,3	0,5	1	0
2	0,9	0,5	1	0
3	-1,6	0,5	1	0
4	-1,2	0,5	1	0
5	-10,3	0,5	1	0
6	-28	0,5	1	0
7	-31,1	0,5	1	0
8	-32,4	0,5	0,9	0
9	-33,2	0,5	0,9	0,2



Рисунок 14. График соотношение смоделированной температуры и исходной

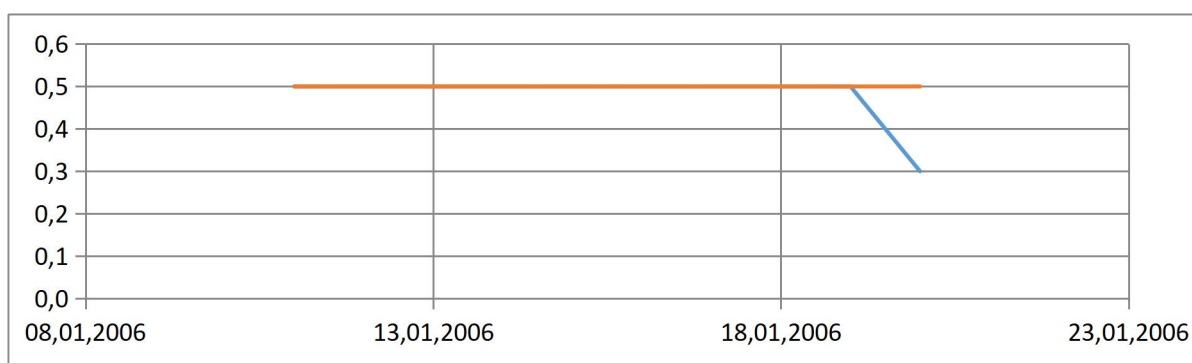


Рисунок 15. График соотношение смоделированной температуры и исходной

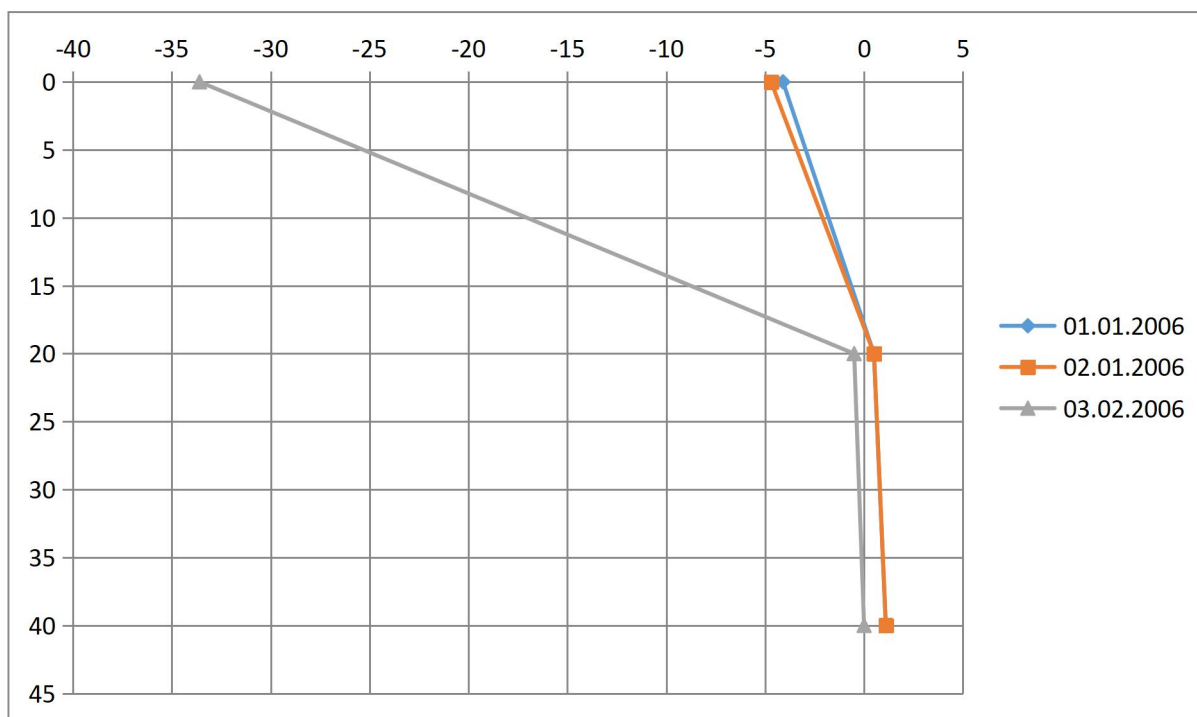


Рисунок 16. Динамика температур

На этом примере демонстрируется, что для слоя 20 см можно моделировать температуру.

На графике (рисунок 14) видно, что отношение устойчивое, а на графике (рисунок 15) не устойчивое.

Таблица 5 - Характерные даты формирования половодья

№	половодья											
	начало Мининская	Q, м ³ /с	начало Акулова	Q, м ³ /с	максимум Мининская	Q, м ³ /с	максимум Акулова	Q, м ³ /с	окончание Мининская	Q, м ³ /с	окончание Акулова	Q, м ³ /с
1	03.04.2008	6,27	12.03.2008	24,50	16.04.2008	55,20	16.04.2008	444,00	03.06.2008	1,82	09.06.2008	19,60
2	25.04.2009	4,87	11.04.2009	24,30	03.05.2009	91,60	01.05.2009	495,00	30.05.2009	5,10	03.06.2009	30,10
3	03.04.2010	4,22	31.03.2010	23,60	15.04.2010	43,90	18.04.2010	287,00	09.06.2010	2,05	24.05.2010	49,40
4	10.04.2011	5,20	01.04.2011	6,72	29.04.2011	67,90	28.04.2011	430,00	02.06.2011	4,20	04.06.2011	32,90
5	18.04.2012	14,70	05.04.2012	13,00	27.04.2012	103,00	29.04.2012	440,00	30.05.2012	1,92	27.05.2012	30,80
6	18.04.2013	11,60	04.04.2013	11,00	22.04.2013	64,20	25.04.2013	344,00	27.05.2013	3,89	25.05.2013	32,00
7	14.04.2014	4,19	10.03.2014	29,50	23.04.2014	37,80	23.04.2014	135,00	08.06.2014	4,81	01.06.2014	31,10
8	11.04.2015	5,42	11.02.2015	22,10	01.05.2015	65,80	18.04.2015	310,00	16.05.2015	8,65	18.05.2015	76,20
9	03.04.2016	1,68	10.03.2016	17,00	20.04.2016	45,80	21.04.2016	240,00	22.05.2016	1,75	22.05.2016	24,00
10	20.03.2017	10,00	18.02.2017	18,50	04.05.2017	62,30	13.04.2017	208,00	11.06.2017	4,90	17.06.2017	42,10
11	09.04.2018	7,96	12.03.2018	17,70	22.04.2018	67,50	22.04.2018	427,00	25.05.2018	2,64	05.06.2018	16,40
12	03.04.2019	10,50	09.02.2019	12,60	27.04.2019	78,30	27.04.2019	394,00	20.05.2019	6,59	24.06.2019	14,60
13	03.05.2020	16,50	15.01.2020	76,20	16.04.2020	45,60	21.02.2020	372,00	02.06.2020	6,76	11.03.2020	93,50
14	03.04.2021	11,80	15.03.2021	13,90	19.04.2021	53,10	27.04.2021	237,00	03.06.2021	4,04	28.06.2021	13,60

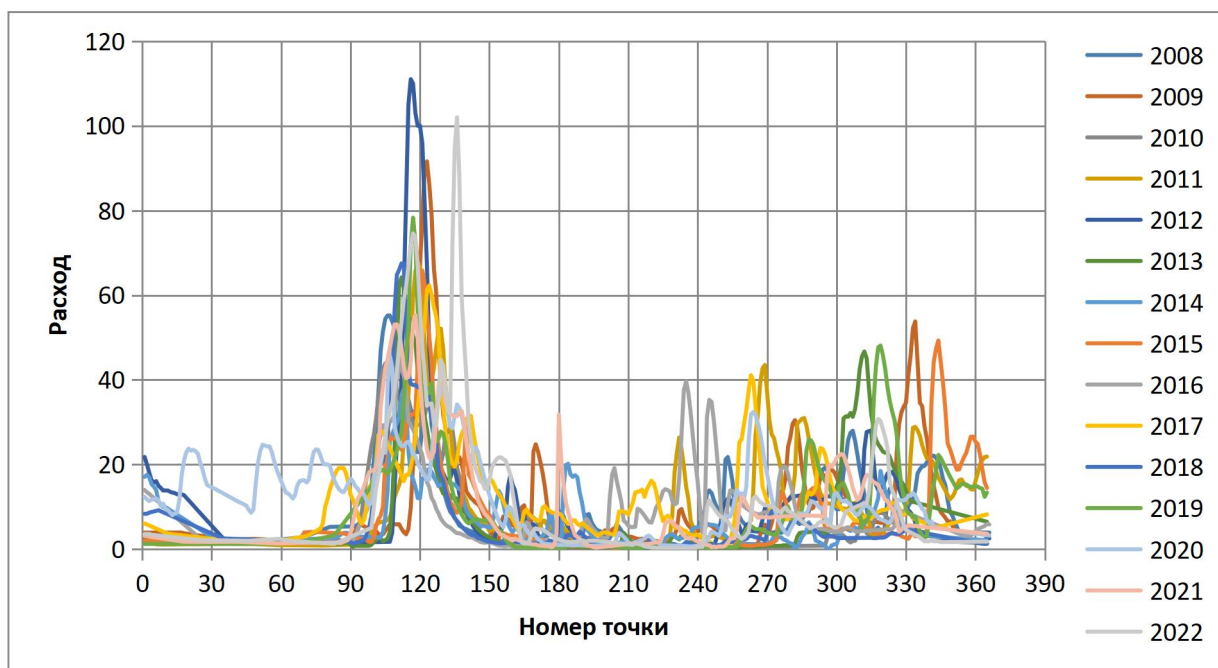


Рисунок 17. Гидрограф по гидрологическому посту Миннинская

На гидрографе (рисунок 17) представлена динамика расходов воды в период с 2008 по 2022 год.

Начало половодья во все года примерно одинаково в начале апреля, конец - в конце мая- начале июня. Самый большой всплеск приходится на апрель, что соответствует половодью в связи таяния снега. Максимальный расход в 2012 году в конце апреля. Всплески очень крутые, кратковременные, что говорит о быстром и интенсивном таяние снега.

Также на графике присутствуют паводки из-за осадков (дождей), межень зимняя, кроме 2020 года.

В 2009, 2022, 2012 наиболее сильные половодья и паводки. С 2018 по 2021 сток более спокойный, с небольшой амплитудой колебаний.

Начало половодья начинается примерно в тоже время, когда происходит устойчивый переход через «0». Были сопоставлены графики 8 и 10 и по ним видно, что после наибольших снеготазпасов наступает максимальный расход воды. В приложении 6 гидрограф по посту Акулова гора.

4 Моделирование и прогнозирование водонепроницаемого слоя

4.1 Разработка алгоритма прогноза

На первом этапе проводился расчет момента устойчивого перехода температуры через «0» на основе данных метеорологических постов. Для определения момента применялось два основных метода, анализ кумулятивной суммы или отрицательных температур, или положительных, либо длительность морозного периода. Далее были построены графики температур на разных глубинах почвы, пример представлен на рисунке 9. Эти графики позволили отследить динамику промерзания и оттаивания почв, выявить закономерность распространения температурных волн с глубиной, оценить влияние поверхностных условий (снежного покрова) на температурный режим почвы.

По данным о расходах воды, были построены гидрографы стока (рисунок 10). Они отражали динамику водного стока, включая периоды весеннего половодья, межени и паводков.

Далее были рассчитаны снегозапасы на трех метеостанциях, по которым строились графики максимальных снегозапасов, выполнен анализ изменчивости снегонакопления между метеостанциями и производилось сравнение изменений снегозапасов с гидрографом. Данное сопоставление позволило выявить взаимосвязь между объемом накопленного снега и величиной весеннего половодья, а также определить вклад снеготаяния в формирование речного стока.

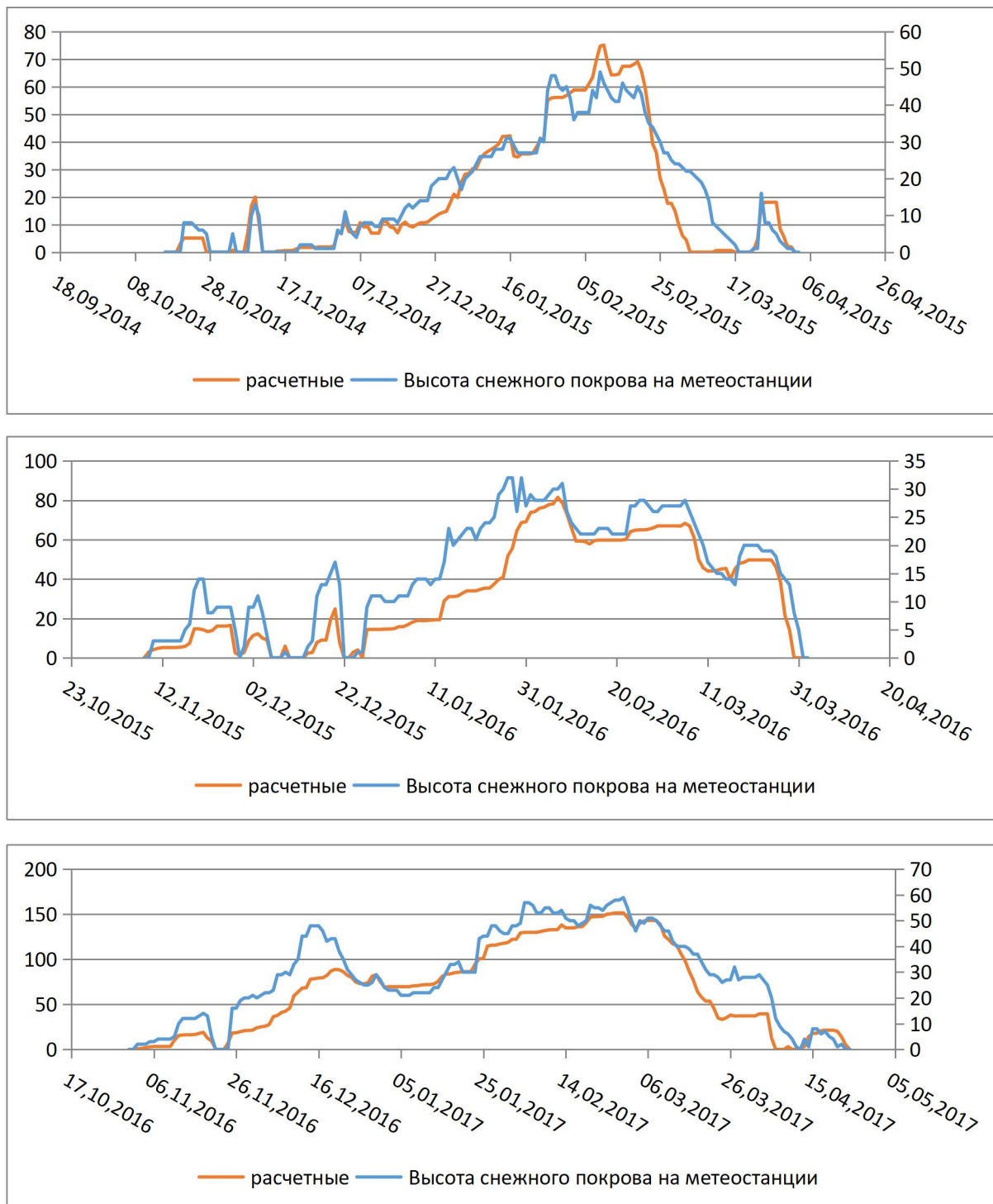
Заключение

Список использованных источников

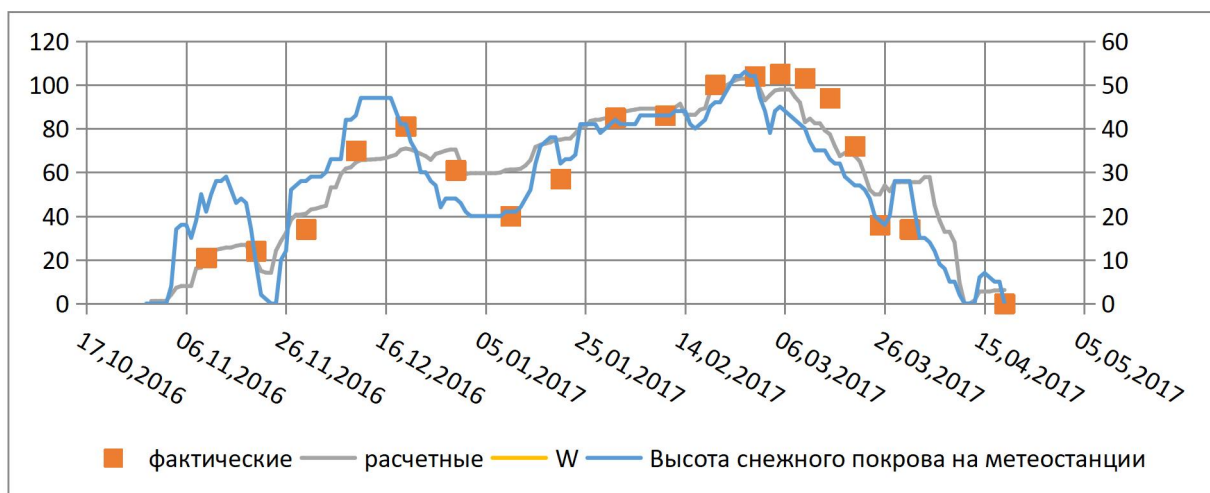
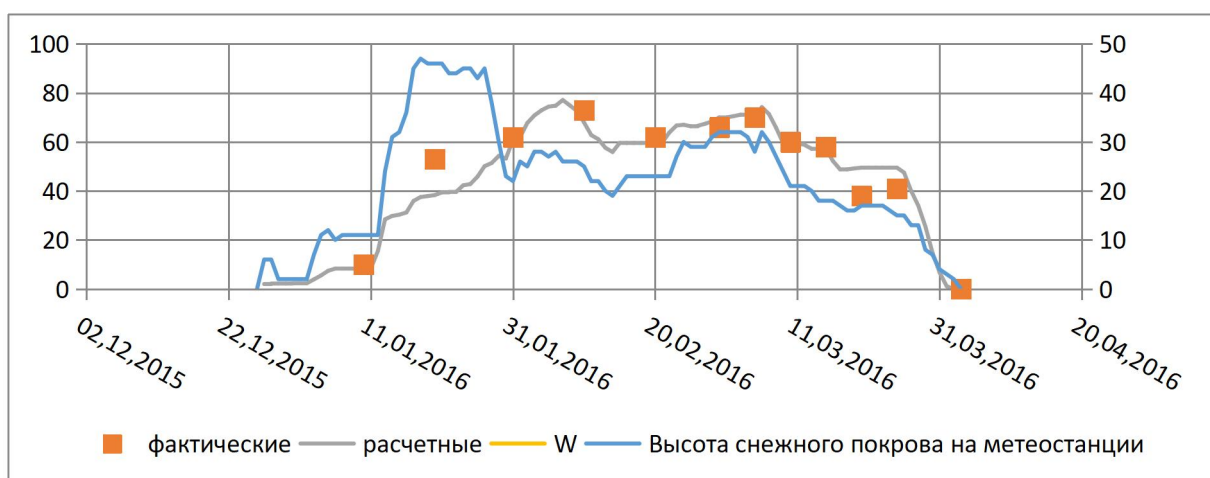
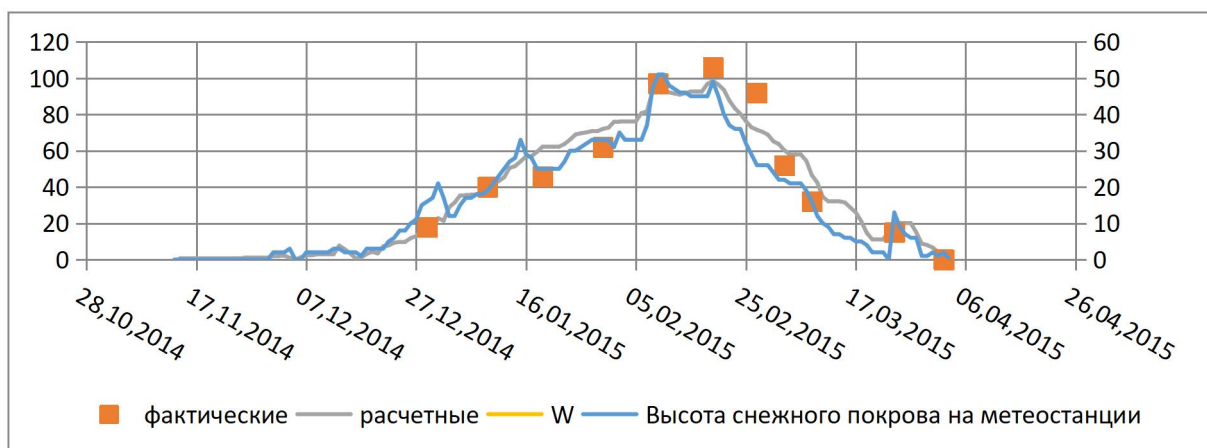
1. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО): [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [<http://gmvo.skniivh.ru>] 13.03.2026.
2. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [<http://meteo.ru>], 04.02.2026.
3. Гайдукова Е.В. Гидрологические прогнозы - Конспект лекций - 92 с.
4. Георгиевский, Ю. М. Краткосрочные гидрологические прогнозы / Ю. М. Георгиевский. – Л., 1982. – 100 с..
5. Георгиевский, Ю. М. Гидрологические прогнозы: учебник / Ю. М. Георгиевский, В. А. Шаночкин. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2007. – 436 с.
6. Калинин, В. Г. Математико-геоинформационное моделирование процесса снеготаяния на речных водосборах Прикамья / В. Г. Калинин, А. А. Шайдулина, В. С. Русаков, М. А. Фасахов // Лед и Снег. – 2020. – Т. 60, № 3. – С. 425–438.
7. Мазо К.А. Поташев К.А Гидродинамика - 2013.- 126 с.

Приложения

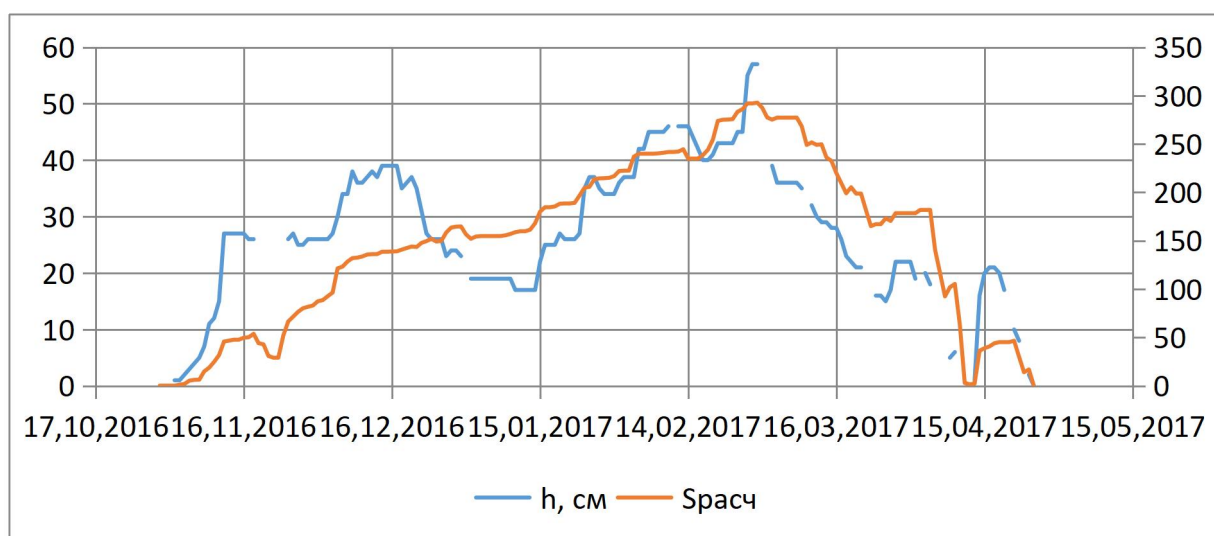
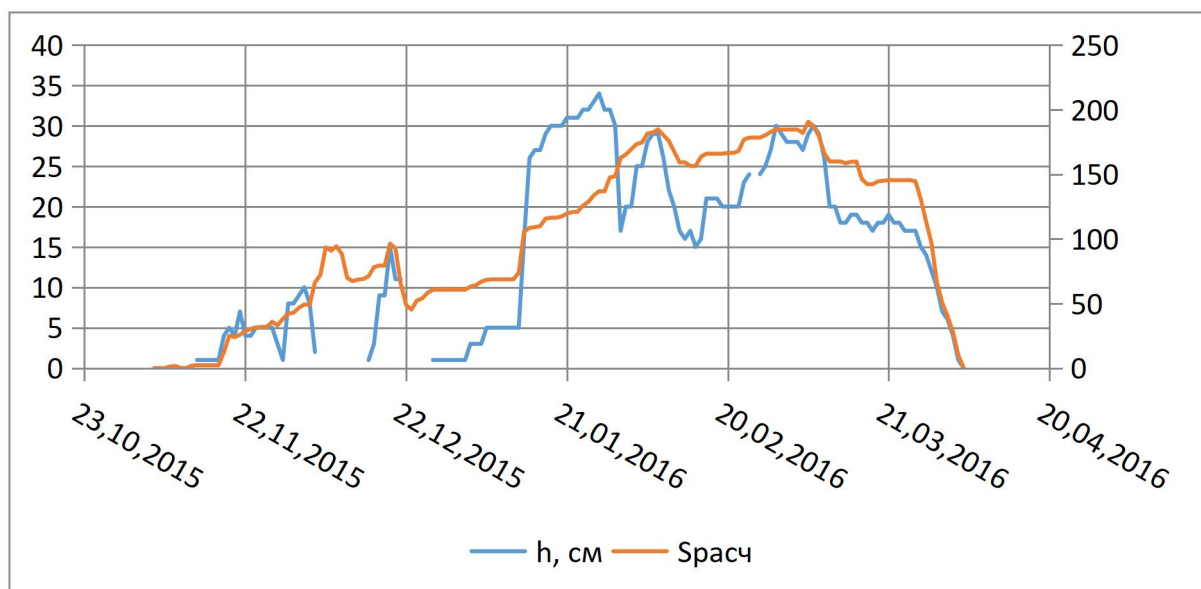
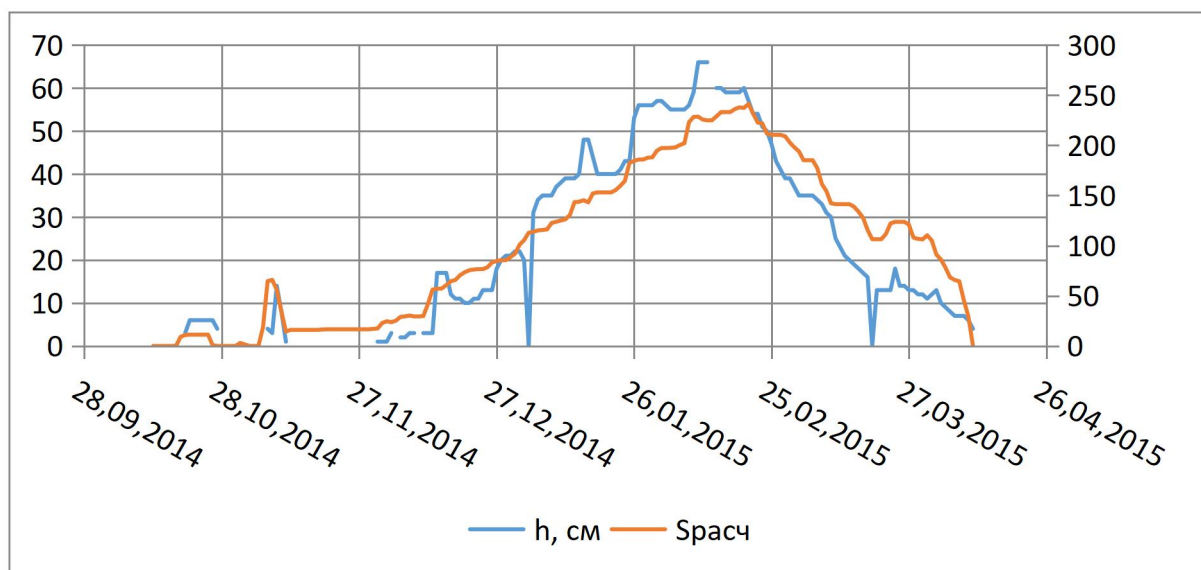
Приложение 1. График фактических и расчетных снегозапасов по ст. Вытегра за 2015, 2016, 2017



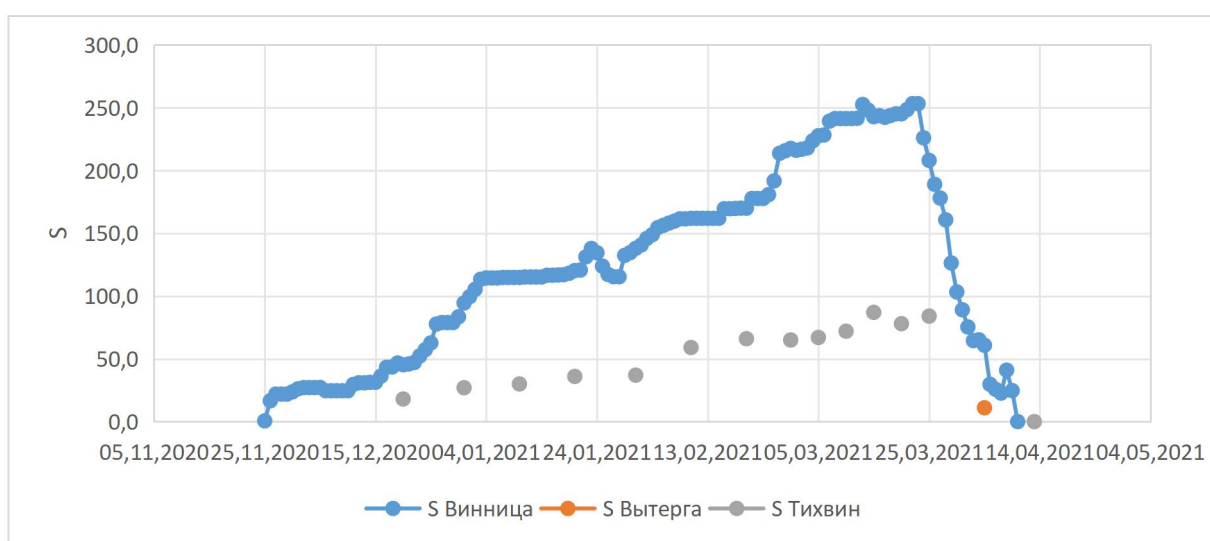
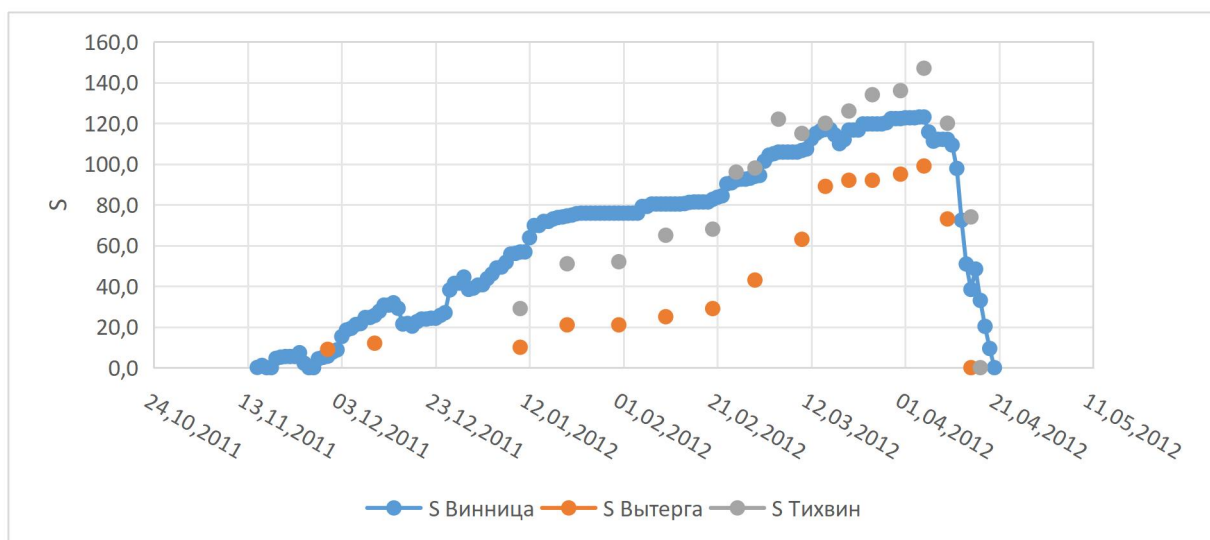
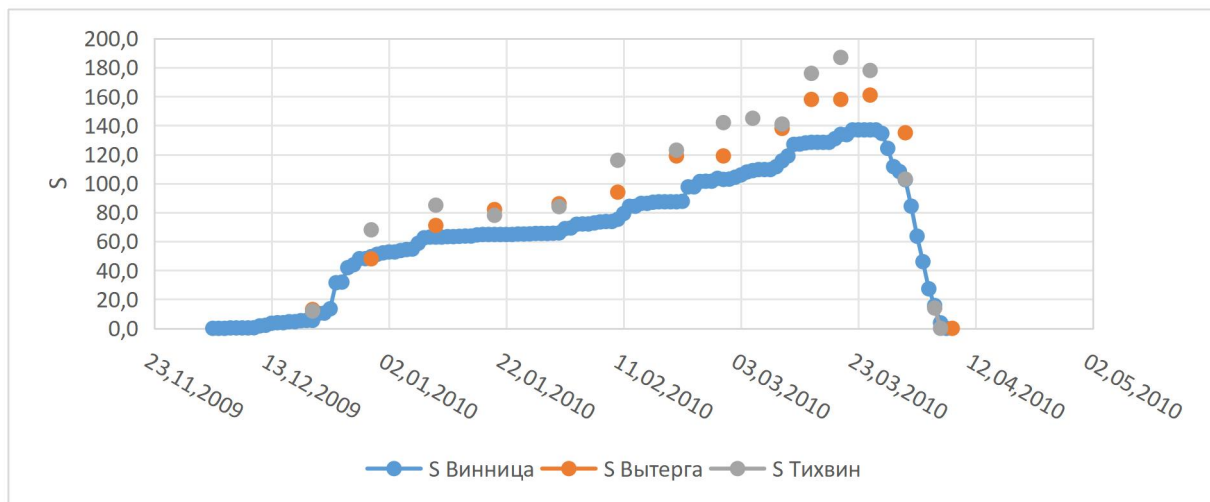
Приложение 2. График фактических и расчетных снегозапасов по ст. Тихвин за 2015, 2016, 2017



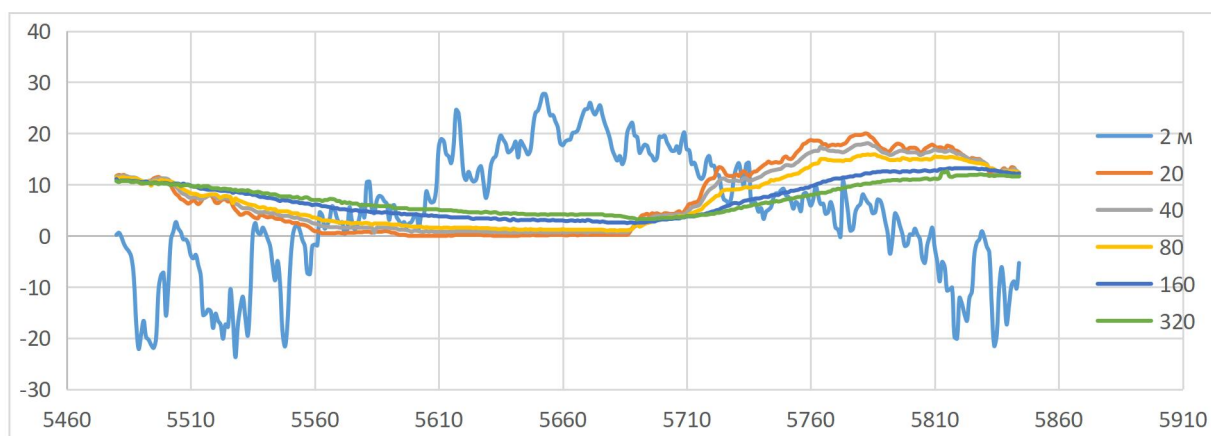
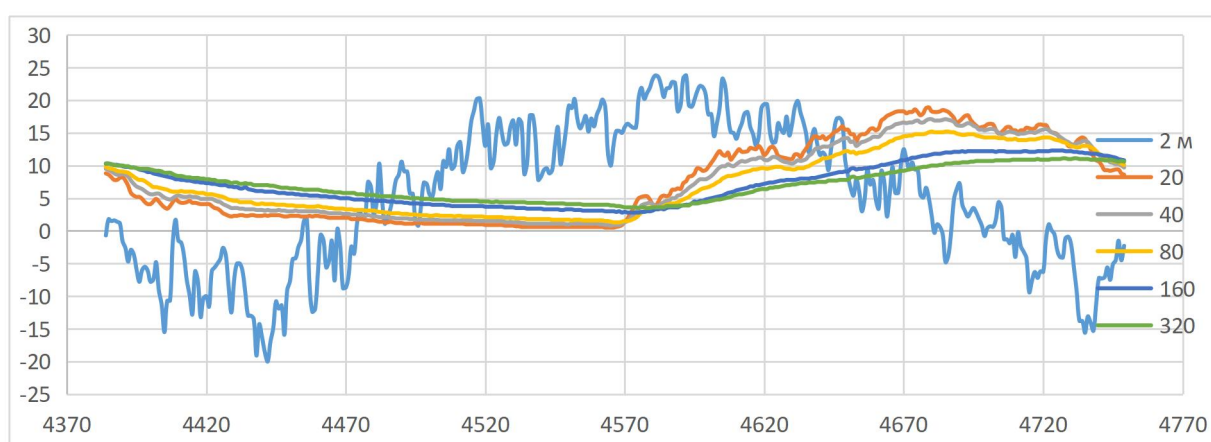
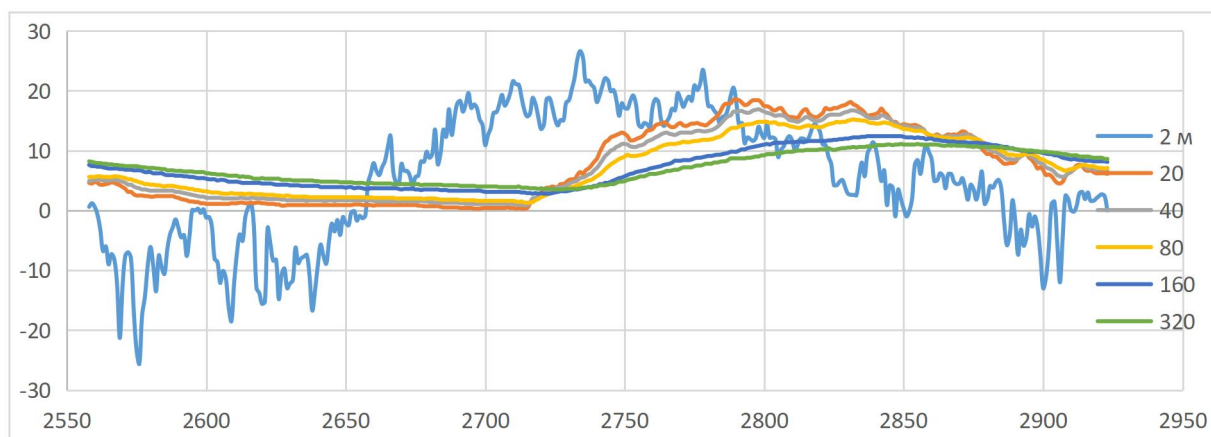
Приложение 3. График расчетных снеготолщин по ст. Винница за 2015, 2016, 2017



Приложение 4. График снегозапасов по 2010, 2012, 2021 году по трем метеостанциям ст. Винница, ст. Тихвин, ст. Вытегра



Приложение 5. График температур воздуха и почвы на разных глубинах по ст. Тихвин за 2013, 2018, 2021



Приложение 6. Гидрограф по гидрологическому посту Акулова гора

