

Журавин С. А.

**Исследования процессов
 влагооборота на воднобалансовых
 станциях в России**

Санкт-Петербург

2022 год

УДК
ББК

Журавин С. А. Исследования процессов влагооборота на водно-балансовых станциях в России. Монография. – СПб.: ООО «РИАЛ», 2022 – 224 с., 73 илл.

Монография содержит информацию об истории создания сети воднобалансовых станций в России, целях и задачах их работы, программе, методах и средствах наблюдений. В работе также приведены результаты анализа динамики элементов водного баланса и определяющих их факторов на основе материалов многолетних наблюдений в условиях климатических изменений, а также примеры составления водных балансов малых водосборов при наличии комплексных наблюдений. В дискуссионном плане рассмотрены проблемные вопросы развития экспериментальных гидрологических исследований на репрезентативных и экспериментальных водосборах.

Книга рассчитана на гидрологов и специалистов сопредельных наук о земле, а также на студентов и аспирантов в данных областях знаний.

Zhuravin S. A. Study of water turnover at the water balance stations in Russia. – SPb.: RIAL ltd, 2022 – 224 p., 73 ill.

The monograph contents information about history of the water balance stations network build up in Russia, purposes and tasks of their work, methods and facilities for observations. The results of analysis of the water balance components and determining factors variations on the basis of long-term observations under the climate change are represented as well as examples of the small basins water balance computations based on the complex observations. The problematic aspects of the hydrological experimental studies at the small research basins are considered for the discussion.

The publication is intended for hydrologists and environmentalists, undergraduate and postgraduate students in this field of knowledge.

УДК
ББК

ISBN 978-5-907276-55-0

© А. С. Журавин, 2022
© Государственный Гидрологический институт, 2022
© Издание, оформление: ООО«РИАЛ», 2022

Дизайн, компьютерная верстка и печать ООО «РИАЛ»
196655, Санкт-Петербург, Колпино, Вознесенское шоссе, 49/2-253

*Подписано в печать 25.11.2022 г. Формат 70 x 100 1/16
Тираж 300 экз. Заказ № 52-22/1*

«Все хорошо в природе, но вода – красота всей природы. Вода жива; она бежит или волнуется ветром; она движется и дает жизнь и движение всему окружающему. Разнообразны явления вод, и непонятны законы этого разнообразия.»

(С. Т. Аксаков «Записки ружейного охотника Оренбургской губернии»)

ПРЕДИСЛОВИЕ

Исследования процессов формирования стока воды на основе метода водного баланса широко использовались в нашей стране и за рубежом на протяжении многих десятилетий как на стационарах воднобалансовых и болотных станций, так и в экспедиционных условиях для решения различных гидрологических задач.

Однако в последние десятилетия в силу ряда причин, прежде всего экономического характера, экспедиционные гидрологические исследования в России (исключая стандартные проектно-изыскательские работы) прекратились полностью, а стационарные сократились до минимального за весь послевоенный период уровня. При этом потребность в информации о динамике водного баланса в последнее время заметно возросла, поскольку многие процессы формирования стока воды по-прежнему недостаточно хорошо изучены, а многолетние изменения климата повлекли за собой существенные преобразования состояния природной среды, в том числе и такие, которые за предыдущий период регулярных инструментальных наблюдений зафиксированы не были. Это отмечалось, в частности на VII Всероссийском гидрологическом съезде, который проходил в Санкт-Петербурге в 2013 году, и коснулось смежных дисциплин в области наук о Земле, которые связаны с процессами тепло- и влагооборота.

Как следствие, восстановление и развитие сети воднобалансовых станций является насущным требованием времени в России, что также было отмечено отдельным, но до сих пор не реализованным пунктом в Решении съезда [Решение ..., 2014].

Аналізу материалов наблюдений отечественных воднобалансовых станций (ВБС) в том или ином виде посвящено более двух тысяч работ. В большинстве случаев полученные на них данные привлекались для установления зональных воднобалансовых соотношений, обоснования методов гидрологических расчетов и прогнозов, оценки антропогенных воздействий на гидрологический режим, решения других конкретных гидрологических задач, разработки физико-математических моделей стока.

Более полные обобщения выполнялись ранее только для отдельных станций. В частности, следует упомянуть монографию В. А. Урываева [Урываев, 1953], а также работы А. И. Субботина и В. С. Дыгало [Субботин, Дыгало, 1982], А. М. Горчакова [Горчаков, 1983]. Последние из упомянутых, несомненно, полезных публикаций посвящены конкретным объектам. В книге А. И. Субботина и В. С. Дыгало обобщены данные наблюдений Подмосковной ВБС, но издание отчасти носит справочный характер. В работе А. М. Горчакова выполнен подробный анализ составляющих водного баланса водосборов Приморской ВБС за двадцатилетний период. Монография В. А. Урываева также посвящена преимущественно опыту проведения полевых воднобалансовых гидрологических работ на Валдае. Однако она включает основополагающие принципы в постановке таких работ, и послужила основой при разработке Руководства стоковым станциям [Руководство, 1954], а позднее и международного руководства «Репрезентативные и экспериментальные бассейны» [Репрезентативные и экспериментальные бассейны, 1971].

Краткие обобщения деятельности воднобалансовых станций, оценки их роли и задач на перспективу на разных этапах были сделаны А. А. Соколовым и А. И. Чеботаревым [Соколов и Чеботарев, 1970], А. Н. Поповым [Попов А. Н., 1971], а также А. Б. Заводчиковым и С. А. Журавиным [Заводчиков и Журавин, 1981].

Аналогичные публикации можно найти и в зарубежной практике. Например, опыт двадцатилетних наблюдений и экспериментов на водосборах верховьев рек Уай и Северн вблизи Плинлимона в Уэльсе был обобщен и опубликован Институтом гидрологии (Великобритания) в 1991 году [Plinlimon Research, 1991].

Нельзя не упомянуть, что материалы наблюдений воднобалансовых станций использовались при написании отдельных томов «Ресурсов поверхностных вод СССР» для регионов, где эти станции на тот момент действовали. При создании этих фундаментальных трудов были учтены, тщательно проанализированы и обобщены все данные наблюдений воднобалансовых станций. Большой объем информации и иллюстративного материала помещен в текст монографий.

Однако с течением времени был накоплен новый опыт, более отчетливо обрисовались слабо изученные процессы формирования стока, возникли задачи оценки тенденций преобразования гидрологического режима в условиях многолетних изменений климата, и их воздействия на окружающую среду в целом. Поэтому назрела необходимость проанализировать современное состояние отечественной гидрологии в экспериментальной области как в целом, так и в отношении воднобалансовых станций, являющихся ее неотъемлемой частью.

Частично эти вопросы рассмотрены в научно-прикладных Справочниках [Основные гидрологические характеристики рек ..., 2015; Основные гидрологические характеристики водных объектов ..., 2021; Многолетние изменения элементов ..., 2021], в процессе создания которых были привлечены все доступные

на момент их издания материалы наблюдений на действующих объектах водно-балансовых станций. Однако цели этих изданий носили прикладной характер и были ограничены поставленными перед ними задачами.

Настоящая работа не претендует на всеобъемлющее обобщение результатов деятельности воднобалансовых станций, что под силу сделать только большому научному коллективу, при участии сотрудников сетевых подразделений, непосредственно связанных с получением и первичным обобщением материалов наблюдений ВБС.

Автор выражает глубокую признательность всем бывшим и поныне действующим сотрудникам воднобалансовых станций за их самоотверженный многолетний труд и преданность своему делу. Особо глубокую благодарность автор выражает В. Ю. Георгиевскому, М. Л. Маркову, С. А. Лаврову, Е. В. Гуревич за ценные замечания и предложения, сделанные при подготовке и редактировании рукописи, а также Т. Г. Молчановой за техническую помощь в ее оформлении.

ВВЕДЕНИЕ

Сложный комплекс взаимодействующих процессов тепло-влажнооборота, с которым связана гидрология, по мнению многих ведущих гидрологов, в частности Р. К. Линслея, не поддается точному описанию в виде системы математических уравнений и не может быть адекватно и в полном объеме воплощен в лабораторных условиях. Поэтому основой изучения процессов влагообмена являются долговременные комплексные полевые наблюдения и эксперименты, проводимые на репрезентативных и экспериментальных водосборах, хотя полный цикл гидрологических исследований включает также лабораторные работы, осмысление полученных результатов и представление наблюдаемых процессов в виде комплексных или частных моделей, о чем ранее писал Н. И. Коронкевич [Коронкевич, 1990].

Не случайно ряд исследователей отмечают, что хотя «большинство нашей текущей методологии в гидрологии было развито и опробовано на реках с водосборами больших размеров, использование экспериментальных бассейнов было продуктивным для улучшения понимания процессов... и полевого тестирования гидрологической методологии» [Linsley, 1975]. Позднее это было подтверждено в преамбуле к Брауншвейгской Декларации, где отмечалось, что «только на хорошо определенных малых бассейнах, где проводятся высококачественные измерения, возможно исследование сложных комбинированных физических, химических и биологических процессов» [Braunschweig Declaration, 2010].

«Долгосрочное гидрологическое изучение водосборов обеспечивает широкие возможности познания процессов, включая наименее изученные из них (неопределенности). Несомненную пользу принесут новые концепции в гидрологических исследованиях на основе полевых исследований и долгосрочных рядов наблюдений. Поэтому экспериментальные и репрезентативные водосборы по-прежнему должны рассматриваться как критически важный источник прогресса в изучении гидрологических процессов» [P. Warmerdam & H. Stricker, 2010].

Математическое моделирование процессов влагообмена, с одной стороны, выступает как средство интерпретации и обобщения данных комплексных наблюдений и результатов их анализа с учетом сложившейся к настоящему времени теории формирования стока воды и его потерь, и в качестве инструмента решения гидрологических задач на недостаточно или совсем неизученных водосборах. С другой стороны, оно должно послужить в качестве «двигателя» дальнейших полевых исследований для развития теории движения воды на речном водосборе.

Критика методологии гидрологических исследований на малых водосборах касается, прежде всего, высоких затрат, большой продолжительности работ и

несовершенства средств измерений и методов наблюдений [Hewlett et al., 1969; Edwards & Rodda, 1972 и др.].

Другим важным аргументом критиков этого направления является то, что малые водосборы часто не могут служить в качестве индикаторов поведения других водосборов ввиду особенностей их физико-географических условий, поскольку каждый такой небольшой бассейн обладает индивидуальными азональными свойствами, а количественные характеристики элементов их водного баланса и гидрологического режима нельзя напрямую распространять на большие территории. Этот вопрос до сих пор остается дискуссионным и в значительной степени зависит от корректного выбора и «репрезентативности» водосбора. Однако подавляющее большинство исследователей в то же время признают, что в области экспериментальной гидрологии альтернативы малым исследовательским водосборам просто не существует и зональные закономерности процессов формирования влагооборота они отражают вполне адекватно.

Для решения инженерных задач материалы наблюдений на малых бассейнах также по необходимости используются в качестве аналогов, поскольку другой прямой информации по гидрологическому режиму малых водотоков практически нет, а применяемые методы расчетов для неизученных водосборов зачастую дают не вполне удовлетворительные результаты.

В бывшем СССР, а теперь в России долгосрочные гидрологические исследования процессов влагооборота сосредоточены в основном на воднобалансовых станциях, представляющих собой хорошо оборудованные серии экспериментальных и репрезентативных водосборов. ВБС относятся к разряду специализированных станций Росгидромета и наряду с болотными станциями, пунктами наблюдений за испарением с поверхности почвы, воды и снега, пунктами сети агроводнобалансовых наблюдений составляют специализированную гидрологическую сеть, которая в сочетании с основной сетью, осуществляющей наблюдения за осадками и стоком воды, позволяет контролировать основную часть влагооборота при условии достаточно хорошо развитой сети пунктов наблюдений.

Помимо воднобалансовых станций наблюдения на репрезентативных и экспериментальных водосборах в послевоенный период широко применялись экспедициями ГГИ и других институтов для обеспечения информационной основы изучения региональных особенностей процессов формирования стока воды и других элементов водного баланса при решении большого круга гидрологических задач. В частности, в процессе работы Веселовской и Каракумской экспедиций, экспедиции по исследованию водных ресурсов районов освоения целинных и залежных земель, экспедиции по исследованию водного и солевого режима орошаемых земель, Южно-Казахстанской экспедиции, экспедиции по изучению весеннего половодья (Донская и Вятская экспедиции), экспедиции в зоне хозяйственного освоения

БАМ были организованы стоковые станции или полигоны с программами наблюдений, соответствующими программе стоковых (воднобалансовых) станций. Общее число таких объектов достигало 15 – 20-и, а количество водосборов составляло несколько десятков. Некоторые экспедиционные станции работали в течение 3 – 5 лет, другие до 10 лет и более (например, Семикаракорская станция и полигон «Могот» экспедиции БАМ). Ряд станций после завершения работы экспедиций были переданы сетевым подразделениям, о чем сказано ниже.

Для сети Росгидромета большинство видов наблюдений, проводимых на воднобалансовых станциях, формально являются стандартными. Главное отличие воднобалансовых станций заключается в комплексности наблюдений, повышенной густоте объектов, маршрутов и пунктов наблюдений. Только наблюдения за склоновым поверхностным и внутрпочвенным стоком, уровнями грунтовых вод не являются стандартными для остальной гидрометеорологической сети в России, причем во многих странах скважины грунтовых вод совмещены с гидрометрическими створами и входят в состав стандартной программы гидрологических наблюдений. Следует отметить, что на ряде станций в рамках специальных исследований проводились дополнительные наблюдения за перехватом осадков растительностью, интенсивностью водоотдачи из снега, водной эрозией и др., что выходит за рамки стандартного комплекса наблюдений на ВБС, но соответствует общим принципам их деятельности в качестве объектов экспериментальной гидрологии.

Повышенные затраты на содержание станций связаны в первую очередь с необходимостью содержания штата высококвалифицированных специалистов, потребностью в оборудовании для производства практически всех видов гидрологических, большинства видов метеорологических, актинометрических и теплобалансовых наблюдений, трудоемкостью выполнения некоторых из них. Методы и средства наблюдений по-прежнему далеки от совершенства, несмотря на определенный прогресс в их развитии, хотя и при резком росте стоимости приборов.

Проведение долгосрочных наблюдений на ВБС обусловлено потребностью мониторинга гидрологического режима во всей цепи влагооборота в условиях изменяющегося климата и антропогенных воздействий на природную среду, что соответствует статусу станций как объектов опорной сети в этой области.

Еще одним важным аспектом для понимания настоящей роли воднобалансовых станций является ошибочная, по нашему мнению, точка зрения, что наблюдения на них нужны только для информационного обеспечения развития фундаментальных основ гидрологической науки, хотя она, являясь наукой прикладной, служит базисом развития инженерных гидрологических расчетов и прогнозов стока. Не менее важны данные наблюдений ВБС для решения региональных гидрологических проблем. Они включают разработку региональных методов гидрологических

расчетов стока воды и характеристик водного баланса, мероприятий по адаптации местного водохозяйственного комплекса к современным изменениям климата, когда сложно принимать адекватные решения без информации о процессах, происходящих на водосборах малых рек, где, собственно, преимущественно и формируется сток воды. Данные об элементах водного баланса и характеристиках стока, получаемые на ВБС, используются также непосредственно при гидрологическом обосновании конкретных региональных проектов, решении других практических задач, требующих информации о водном балансе.

Воднобалансовые станции при правильной постановке задачи также служат в качестве полигонов для испытания нового оборудования, что позволяет в рекомендациях по их использованию учитывать особенности различных природных зон. Станции, кроме того, являются учебными полигонами для подготовки специалистов-гидрологов.

К сожалению, преемственность в проведении комплексных воднобалансовых наблюдений на экспериментальных и репрезентативных водосборах в России в значительной мере была нарушена. Поэтому представляется целесообразным по возможности обобщить накопленный к настоящему времени опыт организации и проведения воднобалансовых наблюдений на малых репрезентативных водосборах, что будет полезно при возобновлении экспериментальных гидрологических исследований, без которых какое-либо развитие гидрологии в целом и ее инженерных отраслей в частности, невозможно, равно как невозможен и полноценный мониторинг влагооборота. В этом заключается первая цель данной работы.

Второй задачей работы является уточнение наиболее актуальных направлений воднобалансовых исследований, соответствующих современным запросам и требованиям.

В заключение представляется полезным напомнить вывод М. А. Великанова о перспективах гидрологии, который отмечал, что «... единственно правильный путь для дальнейшего развития научной гидрологии, путь синтеза физического анализа гидрологических явлений и широких обобщений физико-географического характера».

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СЕТИ ВОДНОБАЛАНСОВЫХ СТАНЦИЙ, ОСНОВНЫЕ ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ, ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ И ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА НАБЛЮДЕНИЙ

1.1 История развития сети воднобалансовых станций

История развития исследований гидрологического режима на экспериментальных и репрезентативных водосборах в России насчитывает уже свыше 100 лет: первая «станция водного баланса» была организована под руководством М. А. Великанова в 1922 году в с. Кучино под Москвой. Также под Москвой, в с. Собакино на Московской областной сельскохозяйственной опытной станции с 1920 года под руководством И. И. Касаткина и С. И. Небольсина проводились специальные исследования элементарного поверхностного стока. Напомним, что пионерные гидрологические бассейновые исследования с инструментальными гидрологическими наблюдениями на малых водосборах Шпербельграбен и Репперграбен в Швейцарии начались в 1903 году [Herrmann & Schumann, 2010], хотя отдельные работы были начаты на них в середине 1890-х годов.

Идея создания сети ВБС (до 1973 года – стоковых станций) впервые обсуждалась на I Гидрологическом съезде в 1924 году. На II Гидрологическом съезде в 1928 году эта дискуссия получила дальнейшее развитие. Первая стоковая станция – Придеснянская, созданная на базе эрозионной станции по инициативе ее руководства, начала наблюдения в 1929 году. К этому же времени относится и организация Южно-Белорусской станции.

В 1932 году сначала С. А. Кодем [Коль, 1932] была сделана первая попытка обоснования программы работ стоковых станций, а затем М. А. Великанов и М. И. Львович представили типовую программу для стоковой станции [Великанов, Львович, 1932]. В программе была поставлена цель работы стоковых станций, которая заключалась в возможно наиболее полном изучении всех факторов формирования стока, предложены структура, состав наблюдений, методы и существовавшие на тот период времени средства измерений.

Практические шаги по организации стоковых станций были предприняты еще ранее Д. Л. Соколовским, в то время начальником Бюро водного баланса и стока

Государственного гидрологического института, который в 1931 году инициировал изыскания для организации стоковых станций в бассейнах рек Тосны и Луги, а также в районе Валдайской возвышенности. Он же в 1933 году впервые предложил научно обоснованную схему, представленную на *рисунке 1.1*, размещения 45-и стоковых станций в различных ландшафтно-географических зонах страны от тундры на севере до полупустыни и пустыни на юге [Соколовский, 1933]. В основу программы был положен географо-гидрологический подход В. Г. Глушкова, который «устанавливает причинную связь всех вод данного района ... с географическим ландшафтом в целом, включая сюда, кроме климата, геологию, геоморфологию, почвы и растительность...» [Глушков, 1933]. Большие размеры «пятен» расположения предлагаемых станций связаны с тем, что конкретное их положение могло быть определено только после проведения необходимых изысканий в показанных на схеме районах.

В 1940 году Д. Л. Соколовский уточнил проект развития сети стоковых станций. В соответствии с этим проектом предполагалось создать сеть из 10-12-и исследовательских (I разряда) и около 70-и наблюдательных (II разряда) стоковых станций, расположенных во всех физико-географических зонах страны. Эта обширная программа была реализована только частично: к началу 1940-х годов действовало 11 стоковых станций (таблица 1.1), на которых велись наблюдения преимущественно за стоком, осадками и метеорологическими элементами, запасами воды в почве и снеге, грунтовыми водами, испарением с поверхности воды. Предпринимались также первые попытки инструментальных наблюдений за испарением с поверхности почвы.

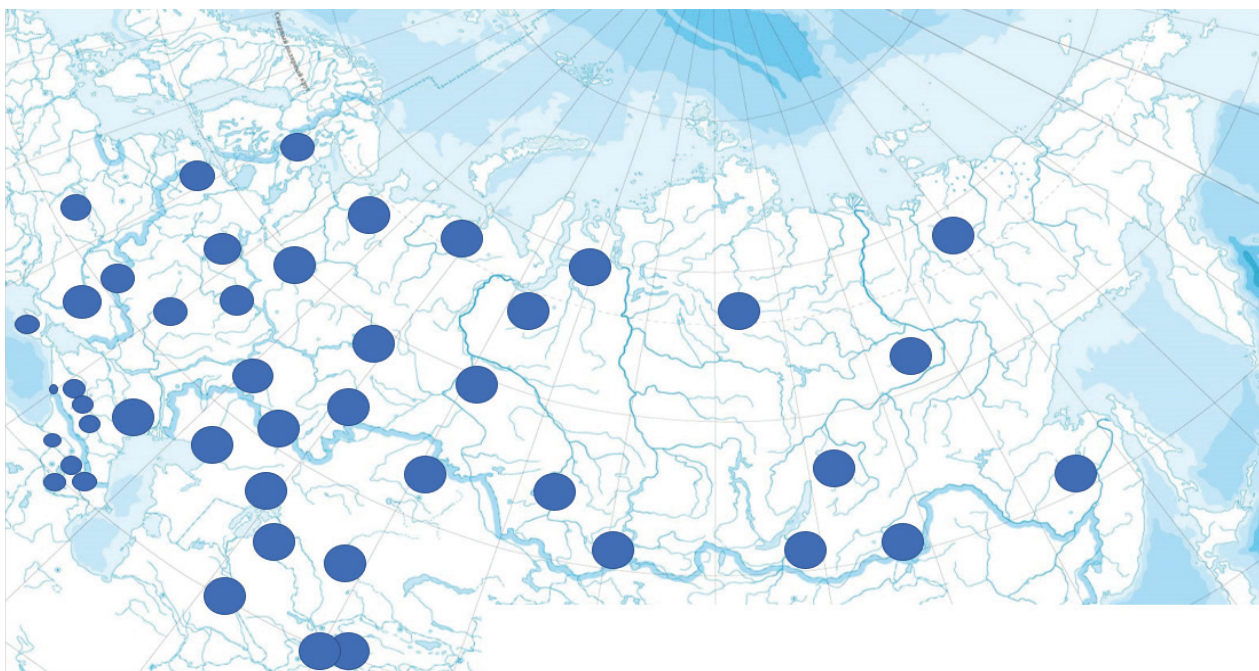


Рисунок 1.1. Проект размещения сети стоковых станций на территории СССР, предложенный Д. Л. Соколовским в 1933 году

Из перечисленных станций некоторые (Южно-Белорусская, Алмазьянская и Куцевская) были неудачно выбраны, научно-технический уровень работ на всех станциях оставлял желать лучшего. Тем не менее, удалось накопить опыт организации и постановки наблюдений за отдельными элементами водного баланса, усовершенствовать ряд приборов и предложить новые [Корзун, 1968].

Таблица 1.1 – Стоковые станции, организованные в 1928 – 1940 годах

Станция	Разряд	Географическое положение	Специализация, ландшафт	Год организации
Валдайская	I	Северо-Запад	Лесная	1933
Тосненская	I	Северо-Запад	Лесная	1933
Придеснянская	I	Украинское Полесье	Лесостепная	1929
Кишчайская	I	Азербайджан (г. Нуха)	Горноселевая	1939
Бомнакская	I	Бассейн р. Зеи	Таежномерзлотная	1935
Пиканская	II	Бассейн р. Зеи	Горномерзлотная	1933
Алма-Атинская	II	Бассейн р. Малой Алмаатинки, Казахстан	Горная, селестоковая	1939
Южно-Белорусская	II	Белорусское Полесье	Болотно-лесная	1928
Алмазьянская	II	Бассейн р. Ломоватки, Донбасс	Степная	1932
Бучанская	II	Бассейн р. Ирпень, Украина	Лесостепная	1939
Куцевская	II	Бассейн р. Еи, Приазовье	Степная	1940

Из перечисленных станций некоторые (Южно-Белорусская, Алмазьянская и Куцевская) были неудачно выбраны, научно-технический уровень работ на всех станциях оставлял желать лучшего. Тем не менее, удалось накопить опыт организации и постановки наблюдений за отдельными элементами водного баланса, усовершенствовать ряд приборов и предложить новые [Корзун, 1968].

Эволюцию задач, состава объектов и комплекса наблюдений стоковых станций в довоенный период можно проследить на примере развития Валдайской стоковой станции, описанную В. А. Урываевым [Урываев, 1953]. Решение об организации станции было принято в 1933 году. В 1934 – 1936 годах проводилось обследование района, разрабатывалась программа работ, производился выбор объектов наблюдений. В это время было организовано 4 водомерных поста, 5 осадкомерных пунктов и 5 пунктов наблюдений за уровнями грунтовых вод, начаты снегомерные съемки, наблюдения за режимом влажности почвы, испарением с поверхности воды и почвы, поверхностным склоновым стоком на стоковых площадках.

Задачей станции на начальном этапе было изучение стока с малых водосборов и склонов, а также испарения с поверхности воды и почвы. Однако обширная программа работ Валдайской стоковой станции не была обеспечена полноценными техническими средствами и кадрами, в результате чего многие материалы наблюдений были мало надежными, не проводился их своевременный анализ, производились многочисленные изменения в составе объектов наблюдений.

В 1937 году объем работ станции был сокращен, а направление исследований изменено на получение информации для совершенствования прогнозов стока весеннего половодья, повысилось качество наблюдений. С 1938 года при участии сотрудников ГГИ А. Д. Дубаха, О. А. Спенглера, А. И. Решетникова и ряда других были проведены исследования формирования и разрушения снежного покрова, водоотдачи на склонах разной экспозиции и добегания талых вод, начаты работы по изучению влияния леса на сток.

На совещании по вопросам развития стоковых станций, прошедшем в ГГИ в 1940 году, было признано необходимым осуществить техническое перевооружение станций для повышения надежности и точности измерений. В частности, было предложено применять для измерений стока воды водосливы различного профиля, самописцы уровня воды, почвенные испарители с использованием больших монолитов и др.

Современная история ВБС берет начало со второй половины 1940-х – начала 1950-х годов, когда на территории СССР была воссоздана сеть стоковых станций. Их организация не была случайной. Она связывалась с осуществлением крупных водохозяйственных проектов, среди которых были обводнение центральных черноземных областей, междуречья рек Волги и Дона (Нижнедевицкая и Дубовская стоковые станции), Средней Азии и Казахстана (Западно-Туркменская и Западно-Казахстанская стоковые станции), обустройство лесных полос в степной зоне (ГМО Каменная Степь) и др. Станции создавались с учетом уточненной Д. Л. Соколовским и О. А. Спенглером программы их работы [Соколовский, Спенглер, 1946].

Изменение наименования станций со стоковых на воднобалансовые произошло после обновления и издания в 1973 году «Руководства воднобалансовым станциям», что в большей степени соответствовало направлению их работы, хотя фактически станции носили воднобалансовый характер с самого начала их создания, о чем свидетельствует первоначальная программа их работы, разработанная М. А. Великановым и М. И. Львовичем в 1932 году.

Общее число одновременно действовавших станций в период их расцвета в 1960 – 1970-х годах достигало 18-и станций в разных природных зонах (*таблица 1.2*). На *рисунке 1.2* показано размещение воднобалансовых станций на территории бывшего СССР. Общее количество объектов наблюдений на ВБС составляло более 200 водосборов, половина из которых располагалась на территории Российской Федерации.

Таблица 1.2 – Воднобалансовые (стоковые) станции на территории бывшего СССР, действовавшие после 1945 года

Станция	Ландшафтная зона	Период работы	Наибольшее количество водосборов
Валдайский филиал ГГИ	Лесная (южная европейская тайга)	1933 – действует	15
Прибалтийская ВБС (Латвия)	Лесная	1946 – 2005	6
Подмосковная ВБС	Лесная (смешанных лесов)	1945 – действует	9
Болховская ВБС	Лесостепная	1972 – 1985	16
Нижедевицкая ВБС	Лесостепная	1947 – действует	10
ВБС Каменная Степь	Степная	1949 – действует	6
Дубовская ВБС	Степная	1948 – 1986	12
Придеснянская ВБС (Украина)	Лесостепная	1929 – действует	8
Богуславская НИГЛ (Украина)	Лесостепная	1946 – действует	13
Велико-Анадольская ВБС (Украина)	Степная	1950 – 1986	5
Закарпатская ВБС (Украина)	Горная, лесная	1956 – действует	23
Молдавская ВБС (Молдавия)	Степная	1953 – действует	9
Западно-Туркменская ВБС (Туркмения)	Пустынная	1950 – закрыта после 1991	6
Акусская ВБС (Казахстан)	Степная	1974 – действует	1
Приморская ВБС	Лесная, лесостепная	1956 – 1997	20
Колымская ВБС	Горно-таежная, в зоне мерзлоты	1948 – действует	7
Алма-Атинская селестоксовая (Казахстан)	Горная	1939 – 1972	21
Бомнакская, стоковая	Лесная, в зоне мерзлоты	1935 – 1968	4
Бучанская, стоковая	Лесостепная	1939 – 1955	3
Западно-Казахстанская стоковая (Казахстан)	Полупустынная	1951 – 1973	5
Кустанайская, стоковая (Казахстан)	Степная	1960 – 1971	9
Новорыбинская стоковая	Лесостепная	1956 – 1964	1
Оксочи, стоковая	Лесная	1944 – 1987	7

Примечание:

после переименования стоковых станций в воднобалансовые некоторые из них сохранили прежний статус из-за недостаточного комплекса наблюдений; современное состояние станций, которые действовали на территории бывших союзных республик достоверно неизвестно из-за отсутствия информации.

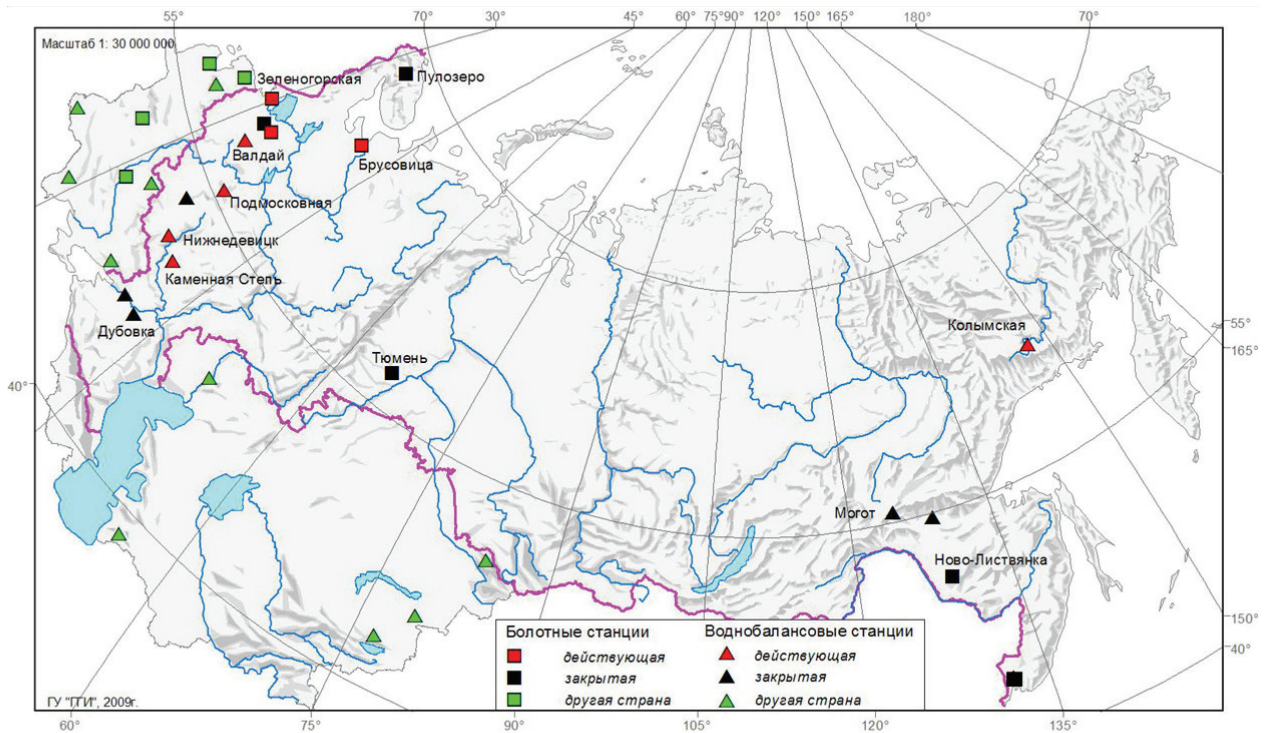


Рисунок 1.2. Размещение воднобалансовых и болотных станций на территории бывшего СССР

Значительный вклад в развитие глобальной сети наблюдений на экспериментальных и репрезентативных водосборах в свое время внесло организованное по инициативе ЮНЕСКО Международное Гидрологическое Десятилетие (1965 – 1974 гг.). Именно в конце 1960 – начале 1970-х годов были развернуты наблюдения на большинстве экспериментальных и репрезентативных водосборов в мире. Существенную роль материалы наблюдений на них продолжали играть при осуществлении различных фаз Международной Гидрологической Программы ЮНЕСКО, особенно в проекте FRIEND (Гидрологический режим по материалам международной сети данных), а также других международных инициатив, таких как ERB (Европейские исследовательские бассейны).

Сокращение сети отечественных воднобалансовых станций началось во второй половине 1980-х годов, когда без достаточных с нашей точки зрения оснований были закрыты Дубовская, Болховская и Велико-Анадольская ВБС.

В этот период основной акцент гидрологических исследований сместился в область изучения пространственно-временного распределения водных ресурсов. В области расчетов стока основной упор был сделан на стохастические методы, поскольку к этому времени были накоплены достаточно длинные ряды наблюдений на стандартной гидрометрической сети, а не стационарность рядов связывалась только с антропогенными воздействиями. Тогда казалось, что основные проблемы расчетов стока и оценки водных ресурсов сравнительно легко могут быть решены

на основе данных только о стоке воды, а другие гидрологические задачи будут решены с применением начавшегося несколько ранее бурного развития математического моделирования процессов формирования стока. Мировой и отечественный опыт в этой области накапливался с конца 1950-х годов, хотя математическое направление оформилось как самостоятельный раздел гидрологии только в 1970-е годы [Жорень, 1991; Мотовилов, Гельфан, 2018; Sivapalan, Blöschl, 2017], и успех создания универсальных математических моделей стока казался близким.

Однако исходной причиной сложившейся ситуации с сокращением сети воднобалансовых станций представляется противоречие интересов производства, к которому относятся региональные Управления Гидрометслужбы, и гидрологической науки в лице головных и региональных институтов. В советский период этот конфликт регулировался государственным обеспечением сети необходимыми материальными ресурсами и кадрами, а также активным взаимодействием сетевых и научных организаций на всех уровнях, когда станции принимали непосредственное участие в решении научных, методических и практических гидрологических задач. С ухудшением экономической ситуации, а тем более в рыночных условиях, государственное обеспечение существенно сократилось, обострились кадровые проблемы, и заинтересованность сетевых подразделений в сокращении непрофильных с их точки зрения позиций в целях экономии усилилась.

Помимо названных выше, были и другие причины снижения интереса к детальным воднобалансовым наблюдениям и исследованиям. Парадоксальная ситуация сложилась, в частности, в области развития методов гидрологических расчетов, которая на протяжении многих десятилетий являлась одним из основных прикладных направлений гидрологической науки. Для решения гидрологических задач в области строительного проектирования были разработаны соответствующие СНиПы и другие регламентирующие их документы, которые обобщали и унифицировали накопленный ко времени их создания опыт расчетов различных гидрологических характеристик. Наиболее полная версия такого СНиПа (СН 435-72.83) была принята в 1983 году, а в последующую версию (СП 33-101-2003) были внесены относительно небольшие изменения и дополнения, связанные преимущественно с применением методов математической статистики. СНиП рекомендует использование региональных методов расчетов, но их применение требует обоснования и уточнения параметров, поскольку большинство этих методов были разработаны десятки лет назад. Развитие региональных методов фактически приостановилось в расчете на более широкое применение математических моделей, однако в отечественной инженерной гидрологической практике этого пока не наблюдается, так как в «прокрустово ложе» основного регламента, разработанного около 40 лет назад, они не вписываются. Кроме того, современные модели не позволяют надежно рассчитывать весь спектр основных гидрологических

характеристик, особенно в области низкого стока. Поэтому развитие более простых сравнительно с моделями региональных методов гидрологических расчетов по-прежнему актуально, хотя в настоящее время в число основных видов деятельности Гидрометслужбы это направление работ не включено, а другие ведомства такие работы также перестали финансировать.

Нельзя отрицать необходимости регламентов, но они не могут десятилетиями оставаться незыблемой догмой и должны изменяться по мере развития гидрологической науки и запросов практики. Однако здесь нередко возникает противоречие между консерватизмом практики и необходимостью совершенствования и обновления регламентов.

Особо хотелось бы выделить проблему применения статистических методов применительно к гидрологическим расчетам, которая оказала значительное негативное влияние на развитие генетических исследований, как экспедиционных, так и стационарных, а также основанных на них методов расчетов. Еще в середине 1940-х годов об этом писал Б. В. Поляков [Поляков, 1946], предостерегая от излишнего увлечения статистическими методами. В 1950-е годы на страницах Известий АН СССР была проведена дискуссия сторонников и противников статистического подхода к решению гидрологических задач. В. А. Урываев также считал, что применение статистических приемов правомерно и необходимо (иногда, по его мнению, это единственно возможный способ решения), однако «этот прием не может быть основным средством познания сущности явления и не может дать точного решения». Позднее А. А. Соколов и А. И. Чеботарев отмечали, что «простота и конкретность получаемых статистическими методами результатов расчета породила ряд опасных тенденций в гидрологии» [Соколов, Чеботарев, 1970]. В частности, одна из этих тенденций «заключалась в переоценке роли и значения этих методов... этот метод нередко применялся чисто формально, без должного изучения природы явления».

Затруднения в применении статистических методов, возникшие в последние годы и связанные с не стационарностью процессов формирования гидрологического режима при изменениях климата, а также ввиду значительного сокращения наблюдательной сети, особенно в отношении малых рек и водотоков, со всей очевидностью свидетельствуют о необходимости совершенствования и более широкого применения генетических подходов в гидрологических расчетах. Причем эта проблема назрела уже достаточно давно. В частности, Ю. Б. Виноградов еще в конце 1980-х годов писал, «что в преддверии последнего десятилетия XX века мы практически столкнулись с фактом не стационарности гидрологических рядов, в то время как постулат стационарности явно или незримо присутствовал во всех наших теоретических и расчетных построениях традиционного толка» [Виноградов, 1988].

В силу названных выше причин интерес к генетическим подходам и экспериментальным исследованиям в конце 1980-х годов у значительной части гидрологического научного сообщества и особенно практиков ослабел. В материалах комплексных воднобалансовых наблюдений по-прежнему были заинтересованы разработчики гидрологических детерминированных и гидрофизических моделей, специалисты в области долгосрочных гидрологических прогнозов стока весеннего половодья и проектировщики, если их объекты находились в относительной близости от станций или в аналогичных физико-географических условиях. Таким образом, субъективные факторы в сочетании с неочевидностью экономической выгоды от содержания ВБС повлекли за собой стагнацию, а затем и деградацию их сети и комплекса наблюдений.

Нельзя не отметить весьма двойственную роль математического моделирования гидрологических процессов на основе создания концептуальных детерминированных моделей в развитии экспериментальной гидрологии. С одной стороны эти модели явились продуктом объединения моделей различных гидрологических процессов, в значительной мере основанных на обобщении материалов экспериментальных полевых исследований. С другой – возникла иллюзия, что в условиях приоритетного совершенствования моделей на современном этапе развития гидрологии в последние десятилетия, дорогостоящие экспериментальные гидрологические исследования имеют второстепенное значение, поскольку авторы моделей не очень склонны акцентировать внимание на проблемных точках в области физического описания процессов формирования стока и других элементов водного баланса, уделяя больше внимания проблемам масштабирования и применения геоинформационных систем. В этом отношении показательны публикации М. Сивапалана и Г. Блешля [Sivapalan, Blöschl, 2017], Ю. Г. Мотовилова и А. Н. Гельфана [Мотовилов, Гельфан, 2018]. Однако одновременно именно разработчики моделей на различных конференциях и семинарах подчеркивают заинтересованность в развитии экспериментальной гидрологии. Причины этого очевидны и сформулированы, в частности, Ю. Б. Виноградовым, который прямо отмечал ряд неудовлетворительных решений и недостаточно изученных процессов [Виноградов, 1988; Виноградов, Виноградова, 2008].

Подобное положение характерно не только для России. Аналогичная проблема в развитии гидрологии как науки была отмечена в статье Браса и Иглсона [Bras, Eagleson, 1987]. Позднее Иглсон писал о прагматическом подходе инженерной гидрологии, которая «... затормозила развитие фундаментальной гидрологической науки ... и создала методическую и образовательную базы, не соответствующие необходимому уровню решения возникающих задач» [Eagleson, 1990].

В условиях общего кризиса, уже после распада СССР, неконтролируемое сокращение станций, состава и объектов наблюдений на них продолжилось в 1990-х годах. В результате в настоящее время в России по значительно сокращенным программам действует всего 5 ВБС.

Сложная ситуация с сетью наблюдений на репрезентативных водосборах, сложившаяся в России, отнюдь не уникальна в мировой практике. В США в 1965 году насчитывалось 152 водосбора, программа наблюдений на которых была близка программе наблюдений воднобалансовых станций [Inventory, 1965], в Великобритании в 1972 году таких объектов было 49. Значительное количество репрезентативных водосборов в 1980 – 1990-х годах было в Германии, Франции, Швеции и других европейских странах [Flow Regimes ..., 1993], а также в ряде стран Азии и Латинской Америки. Однако в 1990 – 2000-х годах произошло их существенное сокращение. В частности, в Германии к 2010 году количество малых исследовательских водосборов сократилось по меньшей мере на три четверти [Herrmann, Schumann, 2010].

Заметим, что плотность стандартной гидрометрической сети в подавляющем большинстве, по крайней мере, европейских стран неизмеримо выше, чем в России. Тем не менее, потребность в материалах комплексных воднобалансовых наблюдений была и остается очевидной гидрологам и там.

Негативное влияние на развитие долгосрочных гидрологических исследований на малых водосборах в последние годы во всем мире оказывает также бюрократический подход, основанный на расчете «экономической эффективности» вложенных средств, а принятая повсеместно система грантов и подобных им инициатив не позволяет развивать устойчивые долгосрочные программы.

Поэтому в последние десятилетия финансирование многолетних экспериментальных гидрологических работ повсеместно сократилось, и многие объекты наблюдений на малых исследовательских водосборах в разных странах, в том числе и развитых, под предлогом экономии средств были закрыты, несмотря на возражения гидрологического сообщества. При этом краткосрочные двух-трехлетние исследования для оценки тех или иных эффектов влагооборота продолжают.

Справедливости ради надо отметить, что в некоторых случаях работы даже при этой системе, в частности в США и ряде других стран, продлеваются на некоторых экспериментальных и репрезентативных водосборах в течение длительных периодов. Но при этом нередко меняются программы наблюдений и исследований, методы и средства измерений, что не позволяет накапливать надежную долгосрочную однородную информацию по ряду элементов водного баланса.

Однако в последнее время с осознанием значительной трансформации гидрологического режима под воздействием многолетних изменений климата и необходимости учитывать их при решении водохозяйственных проблем, вновь возросла

потребность в материалах наблюдений о процессах формирования стока воды и других элементов влагооборота на современном этапе. В гидрологическом сообществе сомнений в необходимости осуществления полноценного непрерывного мониторинга влагооборота не возникало, о чем свидетельствует появление «Брауншвейгской декларации» и ряд других инициатив.

1.2 Цели и задачи работы воднобалансовых станций

Цели и задачи производства наблюдений на воднобалансовых станциях эволюционировали по мере накопления опыта и знаний в области тепло- и влагооборота, в соответствии с возникавшими проблемами, связанными с изучением водного режима, решением практических инженерно-гидрологических задач и совершенствованием методов прогнозов стока воды.

Первоначально цель работы стоковых станций была сформулирована в самом общем виде как установление общих зависимостей «между всеми слагаемыми водного баланса и влияющими на них факторами» [Великанов, Львович, 1932]. В «Руководстве стоковым станциям», изданном в 1954 году, в качестве основных целей работы станций заявлены совершенствование методов гидрологических расчетов и прогнозов, а также решение проблем хозяйственного использования малых рек.

Впоследствии перечень задач был конкретизирован и в течение нескольких десятилетий в соответствии с требованиями действующего сейчас «Руководства воднобалансовым станциям» [Руководство, 1973] станции должны были обеспечивать исходные данные для решения следующих основных гидрологических задач:

- Установления количественных характеристик и соотношений элементов водного баланса для водосборов, выявления закономерностей в изменениях этих соотношений в зависимости от гидрометеорологических, физико-географических условий и хозяйственной деятельности человека;
- Разработки и дальнейшего совершенствования методики наблюдений и расчета элементов водного баланса;
- Разработки и дальнейшего совершенствования теории инфильтрации и стока талых и дождевых вод с целью уточнения методов расчета и прогноза стока половодья и паводков;
- Исследования водопотребления и влагообеспеченности сельскохозяйственных культур;
- Изучения водной эрозии и установления ее региональных особенностей.

Перечисленные задачи охватывают широкий круг вопросов гидрологии. В ряде направлений за последние десятилетия с накоплением информации были достигнуты

определенные успехи, в других – достижения были значительно скромнее. Как правило, наилучшие результаты были достигнуты в случае тесного взаимодействия станций и научных центров, а также при условии заинтересованности сотрудников станций в развитии исследований и научном обобщении материалов наблюдений.

Климатические изменения, оказывающие заметное влияние на современное состояние водных объектов, потребовали уделить большое внимание мониторингу гидрологического режима, дальнейшее развитие получило направление моделирования стока, хотя полученные результаты пока не вполне оправдывают ожиданий. Поэтому в гидрологическом сообществе (не только в России) возникла идея генерализации целей и задач исследований на малых водосборах на современном этапе.

В 2009 году в Госларе-Ханенкли (Германия) прошел рабочий семинар «Современное состояние и перспективы гидрологии на малых бассейнах». Семинар был организован по инициативе Брауншвейгского Технического Университета при содействии Национального комитета Германии по МГП и ряда международных организаций (МГП ЮНЕСКО, Европейской сети исследовательских бассейнов – ERB, Программы Гидрология и Водные Ресурсы ВМО – HWRP). По итогам этого семинара была принята Брауншвейгская Декларация [Braunschweig Declaration, 2010], в обсуждении которой приняли участие около семидесяти специалистов из 25 стран мира. В Декларации в общем виде сформулированы текущие цели и задачи гидрологических исследований на малых водосборах, актуальные в настоящее время, которые включили в себя:

- Мониторинг реального мира – долгосрочный мониторинг окружающей среды, связанный с природопользованием и многолетними колебаниями климата;
- Неопределенности – исследование наименее изученных процессов формирования стока и других элементов водного баланса;
- Эко-гидрология – мониторинг экологических последствий природопользования (урбанизация и другие виды землепользования) и/или произошедших под действием климатических изменений;
- Обеспечение информацией в области развития инженерных гидрологических расчетов, а также сопредельных дисциплин – климатологии, лесного хозяйства, биологии, геохимии, почвоведения и др.;
- Моделирование – обеспечение гидрологического моделирования информацией для различных условий и типов ландшафтов, в том числе о слабо изученных процессах.

Этот перечень, как представляется, в общих чертах и без излишней детализации охватывает практически весь круг проблем гидрологии, включая и те, которые были сформулированы в «Руководстве воднобалансовым станциям», и соответствует текущему состоянию науки и запросов практики.

Реализация решения поставленных задач напрямую связана с корректной организацией сети воднобалансовых станций, программой их работ и правильным распределением пунктов наблюдений на водосборах станций.

1.3 Принципы организации сети воднобалансовых станций

При организации сети воднобалансовых станций должны соблюдаться следующие основные принципы: ландшафтно-зональный принцип размещения, а также принцип обеспечения непрерывных наблюдений при относительно стабильном состоянии опорных репрезентативных водосборов.

Зонально-ландшафтный принцип подразумевает «распределение сети стоковых (воднобалансовых) станций в различных физико-географических районах и в местах, типичных по своим природным особенностям для возможно больших территорий» [Урываев, 1953].

Этот принцип был заложен в программу еще в проекте организации сети стоковых (балансовых) станций 1933 года. Д. Л. Соколовский предлагал организовать 2 станции в зоне тундры, 3 – в зоне лесотундры, 12 – в лесной зоне, 4 и 6 – в лесостепи и степи, соответственно, и 7 – в пустынях и полупустынях. Еще 11 станций должны были быть организованы в горных районах. Следует отметить, что часть станций предполагалось организовать на болотах, заболоченных водосборах и, разумеется, в зоне многолетней мерзлоты. Прилагаемая к проекту карта-схема (приведена выше на рисунке 1.1) показывает, что станции планировалось организовывать более или менее равномерно по всей территории страны, при этом около половины из них должны были работать в ее европейской части.

При формировании сети воднобалансовых станций в СССР в послевоенный период учитывались два основных взаимосвязанных фактора. Во-первых, это уже упомянутый зонально-ландшафтный фактор, связанный с потребностью в получении общей информации о формировании стока воды и водного баланса в различных природных зонах страны. При этом приоритетное развертывание станций осуществлялось в районах, где требовалось решить острые проблемы природопользования, связанные с гидрологическим режимом, в интересах народного хозяйства. В этих случаях либо непосредственно создавали стоковую станцию (например, Колымскую, Каменную Степь или Нижнедевицкую), либо станцию организовывали после проведения экспедиционных гидрологических работ на базе их пунктов наблюдений и материальных средств (ряд станций в Казахстане, Западно-Туркменская ВБС). Вторым фактором являлся интерес к собственным стационарам со стороны региональных гидрометеорологических институтов, которые

могли давать информацию для развития региональных методов гидрологических расчетов и прогнозов (Богуславская НИГЛ, Приморская ВБС, Алма-атинская селестоковая станция).

В результате сформировалась сеть воднобалансовых (стоковых) станций, структурированная по природным зонам для европейской территории, с дополнением станций в отдельных регионах Средней Азии, Дальнего Востока и Восточной Сибири. Следует отметить, что в 1970 – 1980-х годах в каждой природной зоне европейской территории располагалось не менее двух станций, что обеспечивало более надежный мониторинг гидрологического режима в этих зонах с учетом ландшафтных и климатических различий. В то же время на обширных пространствах Заволжья, Урала и Сибири воднобалансовые станции так и не были организованы.

В ряде случаев в свое время не были использованы возможности преобразования в воднобалансовые станции стационаров, организованных в периоды работы экспедиций ГГИ и Гидрометцентра в бассейне р. Вятки и на БАМе, а также некоторых стационаров региональных Управлений Гидрометслужбы. В результате были потеряны возможности получить длительные ряды наблюдений за гидрологическим режимом и определяющими его факторами в этих регионах, а объекты и пункты наблюдений, в организацию которых были вложены значительные средства, утрачены.

Не менее важными принципами работы сети воднобалансовых станций являются непрерывность производства наблюдений и однородность их рядов.

Вопрос о принципах развитии сети воднобалансовых станций последний раз обсуждался на «Конференции по проблеме развития теории и методов расчета водных балансов речных бассейнов», проходившей на Валдае в конце 1970 года [Материалы Конференции, 1970]. В докладе А. Н. Попова было отмечено, что на территории бывшего СССР в физико-географическом отношении выделено 19 стран, 88 зон и 305 провинций (согласно карте «Физико-географического районирования СССР», изд. ГУГК, 1967), при этом воднобалансовые станции имелись только в пяти из них. Разумеется, организация еще 300 ВБС даже в то время было абсолютно непосильной задачей по экономическим и организационно-техническим соображениям. Поэтому докладчик предлагал довести общее количество станций до 88 (т.е. по одной станции на каждую зону) с прикреплением к ним репрезентативных бассейнов. В качестве примера в докладе была приведена Русская равнина, где выделено 6 физико-географических зон и 54 провинции. Соответственно, было предложено иметь здесь 6 ВБС и 54 репрезентативных бассейна. Такой подход, по нашему мнению, также является чрезмерно амбициозным и трудно выполнимым. Однако сам принцип «прикрепления» к станциям репрезентативных бассейнов, по крайней мере, в наиболее проблемных с точки зрения водного режима регионах, вполне оправдан и актуален и в настоящее время.

На Европейской территории России действующие в настоящее время водно-балансовые станции расположены в полосе между 30° и 40° с.ш., последовательно по физико-географическим зонам (Рисунок 1.2): южной европейской тайги (ВФ ГГИ), смешанных лесов (Подмосковная ВБС), лесостепной (Нижедевицкая ВБС) и степной (ВБС Каменная Степь). Северные территории «закрываются» болотными станциями (Брусовица и Ламмин-Суо).

При нормальных условиях работы этих станций, то есть при условии производства полноценных комплексных наблюдений и неизменности состояния объектов, возможен зональный мониторинг процессов тепло- и влагооборота, режима стока на малых равнинных реках ЕТР. Однако нарушение любого из этих двух условий (а тем более обоих) делает задачу невыполнимой. Как показывает практика, объекты гидрометеорологических наблюдений (гидростворы, метеоплощадки, скважины грунтовых вод, снегомерные маршруты и др., а тем более водосборы) в современных условиях законодательно практически не защищены, хотя формально они должны иметь охранные зоны и сервитуты для обеспечения доступа, что очень часто не соблюдается. В частности, в результате приватизации земель были утрачены многие объекты наблюдений Подмосковной ВБС, а ее роль как зональной станции существенно пострадала.

Своего рода «недостатком» размещения станций в европейской части страны является то, что все они расположены на возвышенностях – Валдайской, Смоленско-Московской и Среднерусской, где выпадает в среднем на 10 – 15% осадков больше, чем на равнине. Поэтому в перспективе с гидрологической точки зрения целесообразно иметь в каждой основной физико-географической зоне ЕТР, по меньшей мере, по две воднобалансовые станции. Эти дополнительные станции лучше открывать в Заволжье, где климат более резко континентальный и ландшафтные условия отличны от условий Русской равнины. Слабо или вообще никак не освещены комплексными воднобалансовыми наблюдениями горные регионы и зона многолетней мерзлоты. В силу указанных выше причин организация новых станций, если такое решение будет когда-нибудь принято, должна быть привязана к охраняемым территориям – природным заказникам и заповедникам, где водосборы и пункты наблюдений в некоторой степени могут быть защищены от антропогенных воздействий.

В условиях России, где ограничены логистические связи и обширные территории слабо заселены, по-прежнему актуально положение, что «изучение всех вопросов стока может и должно вестись на основе гидрологического сопоставления стока с физико-географическими факторами ... гидрометрическое изучение стока в наших условиях возможно лишь как исключение ... Наша сеть должна удовлетворять иному требованию: освещать все типовые условия стока и давать материал для гидрологического его анализа» [Великанов и Львович, 1932 г.]. Эту точку зрения поддержал позднее и В. А. Урываев, который писал следующее: «В нашей

стране, с ее сотнями тысяч рек и озер, трудно было бы даже представить такое положение, когда все водные объекты оказались бы в поле зрения наблюдателя, были бы, как говорят, охвачены наблюдениями. Такой гидрометрический путь изучения водных ресурсов, с упором на массовость гидрометрических измерений и оставлением на втором плане изучения условий и причин, определяющих гидрологические процессы, является характерным для зарубежной гидрологии...» [Урываев, 1953]. В книге о жизни и деятельности В. А. Урываева А. А. Соколов и В. И. Корзун отмечали, что в послевоенный период отечественная гидрология пошла по пути создания «гидрологической сети небольшой плотности, которая охватывала бы всю территорию СССР, и с помощью которой, путем научного обобщения, могли бы быть получены необходимые расчетные гидрологические характеристики при недостаточности и даже отсутствии данных непосредственных наблюдений» [Соколов, Корзун, 1983].

И в настоящее время существует обоснованное мнение, что развитие гидрологической сети в России не может и не должно осуществляться только на основе экстенсивного наращивания количества гидрометрических пунктов наблюдений, преимущественно на больших и средних реках, хотя эта задача была и остается весьма актуальной и приоритетной. Гидрометрическая сеть дает полезную и важную, но весьма ограниченную информацию о стоке и уровнях воды, ледовом и термическом режиме водных объектов, качестве воды. Она, однако, не дает информации о процессах влагооборота и их изменениях на малых водосборах, где формируется основная часть водных ресурсов. Поэтому в 1960-х годах была предпринята попытка расширения функций массовой гидрометрической сети по воднобалансовому принципу с увеличением плотности сети наблюдений за осадками, испарением с различных угодий, динамикой влаги в почво-грунтах и режимом грунтовых и подземных вод. В 1966 году было отобрано 160 бассейнов, по которым с учетом дополнительной информации региональные Управления Гидрометслужбы при методическом руководстве со стороны ГГИ составляли годовые и сезонные водные балансы [Соколов, Чеботарев, 1970]. Однако развития этот перспективный подход не получил, поскольку он также требовал дополнительных ресурсов.

В отдельных регионах было бы целесообразно сконцентрировать усилия на создании «кустовых» станций, ядром которых должны служить воднобалансовые станции с приданной им дополнительной гидрометеорологической сетью, как предлагал А. Н. Попов.

Примером такой «кустовой» станции может служить работа Колымской ВБС в 1980-х годах. Схема размещения объектов наблюдений КВБС в этот период показана на рисунке 1.3. Помимо работ непосредственно на водосборе руч. Контактный, схема размещения пунктов наблюдений на котором представлена на рисунке 1.4, под управлением станции проводились наблюдения на метеостанции Кулу,

гидростворах р. Кулу – п. Кулу и руч. Кривуля, агрогидрологические наблюдения на полях совхоза Кулу. Станция, кроме того, обеспечивала работу выездного отряда в верховьях р. Кулу, действовавшего в интересах улучшения оперативных гидрологических прогнозов стока р. Колыма.

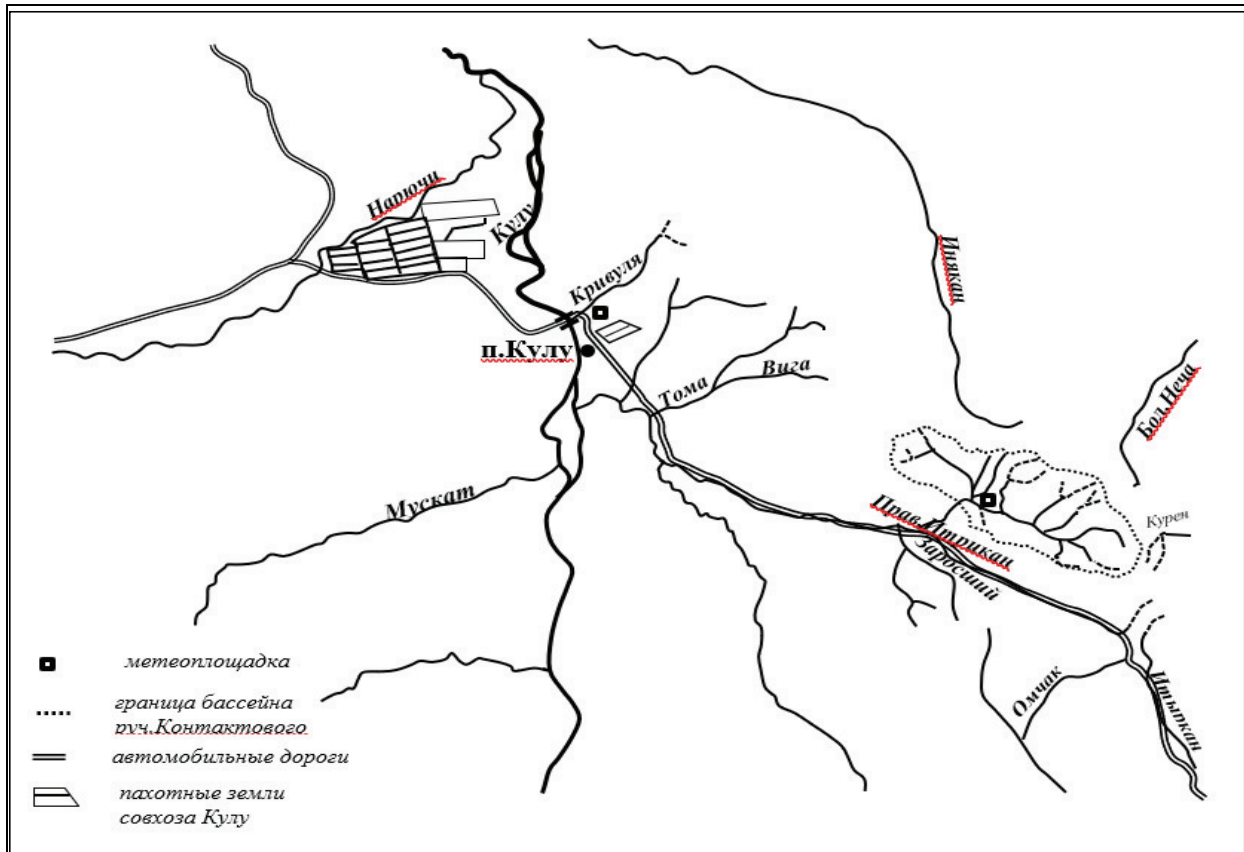


Рисунок 1.3. Схема размещения объектов наблюдений КВБС в 1980-х годах (размещение выездного отряда в верховьях р. Кулу на схеме не показано ввиду его большой удаленности)

1.4 Принципы организации воднобалансовых станций и программа наблюдений на них

1.4.1 Выбор и структурная организация бассейнов

Основными объектами наблюдений на воднобалансовых станциях являются репрезентативные бассейны, то есть такие бассейны, которые являются типичными для гидрологических регионов, характеризующихся единообразием гидрологических характеристик, и сохраняющие относительно неизменные природные условия. Помимо репрезентативных бассейнов на станциях могут быть экспериментальные бассейны, на которых одна или несколько физических характеристик подвергаются искусственным изменениям. В «Руководстве по гидрологической практике» ВМО

отмечено, что «наличие репрезентативных бассейнов желательно в каждом природном регионе, особенно в тех районах, где ожидается большой экономический рост или имеются особо сложные гидрологические проблемы» [Руководство, 2013].

Следует упомянуть об особой категории репрезентативных бассейнов – реперных бассейнах, на которых предпочтительно иметь неизменные, желательно естественные природные условия на протяжении неограниченно долгого времени. Такие бассейны необходимы для мониторинга влияния многолетних изменений климата на водооборот. Предполагается, что на каждой воднобалансовой станции должны быть такие бассейны.

В последние годы по отношению к репрезентативным и экспериментальным бассейнам в международной практике нередко применяется собирательный термин «малые исследовательские бассейны».

Выбор репрезентативных бассейнов является важнейшим и самым сложным этапом при организации воднобалансовой станции. Впервые требования к их выбору были сформулированы в 1932 г., когда практический опыт эксплуатации станций еще не был наработан. Они включали следующие положения: «1) изучаемая площадь должна быть типичною для изучаемого района; 2) она должна быть однородною в физико-географическом отношении; 3) водный баланс должен для нее сводиться с желаемой точностью без учета водообмена по ее контуру и 4) площадь ее должна быть достаточно мала, чтобы постановка на ней всех наблюдений и измерений не вызывала чрезмерных затрат и организационных затруднений» [Великанов, Львович, 1932]. С накоплением опыта организации и эксплуатации стоковых станций требования к выбору бассейнов были уточнены и расширены.

Наиболее полно процедура выбора бассейнов изложена в Международном руководстве «Репрезентативные и экспериментальные бассейны» [Репрезентативные и экспериментальные бассейны, 1971]. Она включает в себя предварительный и окончательный этапы. На первом из них выполняется анализ картографического материала (рельеф, почвы, растительность, геология) и гидрометеорологической изученности региона, его климатических и гидрологических характеристик, после чего производится предварительный выбор репрезентативного бассейна, соответствующего типичным климатическим и ландшафтным условиям района. Для России работы на этом этапе в значительной мере облегчены наличием фундаментальных монографий «Ресурсы поверхностных вод».

Второй, окончательный, этап включает в себя уже непосредственные полевые изыскания и выбор конкретных водосборов. На этом этапе, прежде всего, по данным полевых работ уточняется оценка *репрезентативности* бассейна по почвенным и гидрогеологическим показателям, а также по характеру и распространению растительности. Следует отметить, что в Руководстве воднобалансовым станциям [Руководство, 1973] рекомендуется выбрать несколько групп водосборов,

и уже из них выбирать наилучший вариант. Помимо *репрезентативности* к бассейнам предъявляется еще целый ряд требований.

Во-первых, это требование к четко выраженному водоразделу, что позволяет более точно определить площадь бассейна, к которой впоследствии будут относиться все процессы влагооборота и расчеты воднобалансовых характеристик. В Руководстве рекомендуется на участках нечетко выраженного водораздела создавать его искусственно с помощью небольших дамб и т.п. Практика, однако, показывает, что такой подход часто не дает желательного эффекта, особенно на плоских заболоченных или переувлажненных водораздельных участках небольших водосборов с площадями менее 1 км². Поэтому таких случаев лучше вообще избегать.

Весьма важным аспектом является также возможно более полное совпадение поверхностного водораздела с подземным, по крайней мере в отношении верхнего основного водоносного горизонта репрезентативного бассейна. Недооценка гидрогеологических условий бассейна может существенно осложнить наблюдения за подземными водами и анализ их режима. Желательно избегать сложных условий с наличием линз грунтовых вод в моренных отложениях, связанных друг с другом напорных горизонтов и т.п., поскольку современные стандартные методы и средства наблюдений за режимом подземных вод не предоставляют возможности адекватно учитывать такие комплексные процессы. Весьма важно также, чтобы основной водоток, выбранного для наблюдений репрезентативного бассейна, дренировал хотя бы верхний постоянный водоносный горизонт подземных вод.

Второе, но не менее важное требование – это постоянство условий формирования стока. Изменения в землепользовании, обработке земли, использовании речного стока и т.д. должны быть минимальными. Наилучшим образом этому требованию, как отмечалось выше, отвечают водосборы, частично или полностью расположенные на охраняемых территориях природных заповедников и заказников.

Размер основного водосбора станции должен быть достаточно большим, чтобы его основной водоток имел постоянный сток в течение всего года или, по крайней мере, в течение основных фаз формирования стока, но позволял в то же время обеспечивать наблюдения на нем с оптимальными затратами сил и средств. Обычно размеры этого бассейна колеблются от нескольких десятков до сотен квадратных километров, редко превышая тысячу квадратных километров.

Помимо основного репрезентативного бассейна в состав станции обычно входят несколько водосборов меньшего размера. Они выбираются с учетом региональных ландшафтных особенностей и предназначены для получения гидрометеорологической информации по основным типам ландшафтов, которые могут отличаться типами растительности, почв и т.д. Как правило, эти водосборы располагаются по принципу «вложенных» водосборов и являются притоками основного водотока разного порядка. Такое построение структуры сети наблюдательных водо-

сборов наиболее информативно, его еще называют «гнездовым». Информативность обеспечивается разной степенью дренирования грунтовых и подземных вод водосборами разного порядка с различной глубиной вреза русла. В частности, самые малые водосборы логов и балок, не дренирующие водоносные горизонты, позволяют оценивать величину склонового поверхностного и внутрипочвенного стока.

Оптимальное общее число наблюдательных водосборов на одной воднобалансовой станции чаще всего составляет 5 – 10, иногда больше или меньше. Примеры такого построения сети наблюдательных водосборов приведены на рисунках 1.4 и 1.5.

С точки зрения геоморфологической структуры гидрографической сети, которая имеет последовательность ложбина – лощина – суходол – речная долина [Нежиховский, 1971], водосборы воднобалансовых станций охватывают диапазон трех последних ее элементов, где наблюдается постоянный или периодический сток воды. При этом Р. А. Нежиховский отмечает, что в среднем около 75-80% всех звеньев гидрографической сети приходится на первичные звенья, то есть ложбины. В засушливых зонах роль ложбин несколько снижается, но вместе с лощинами (балками) они составляют не менее 70% от общей площади водосборов.

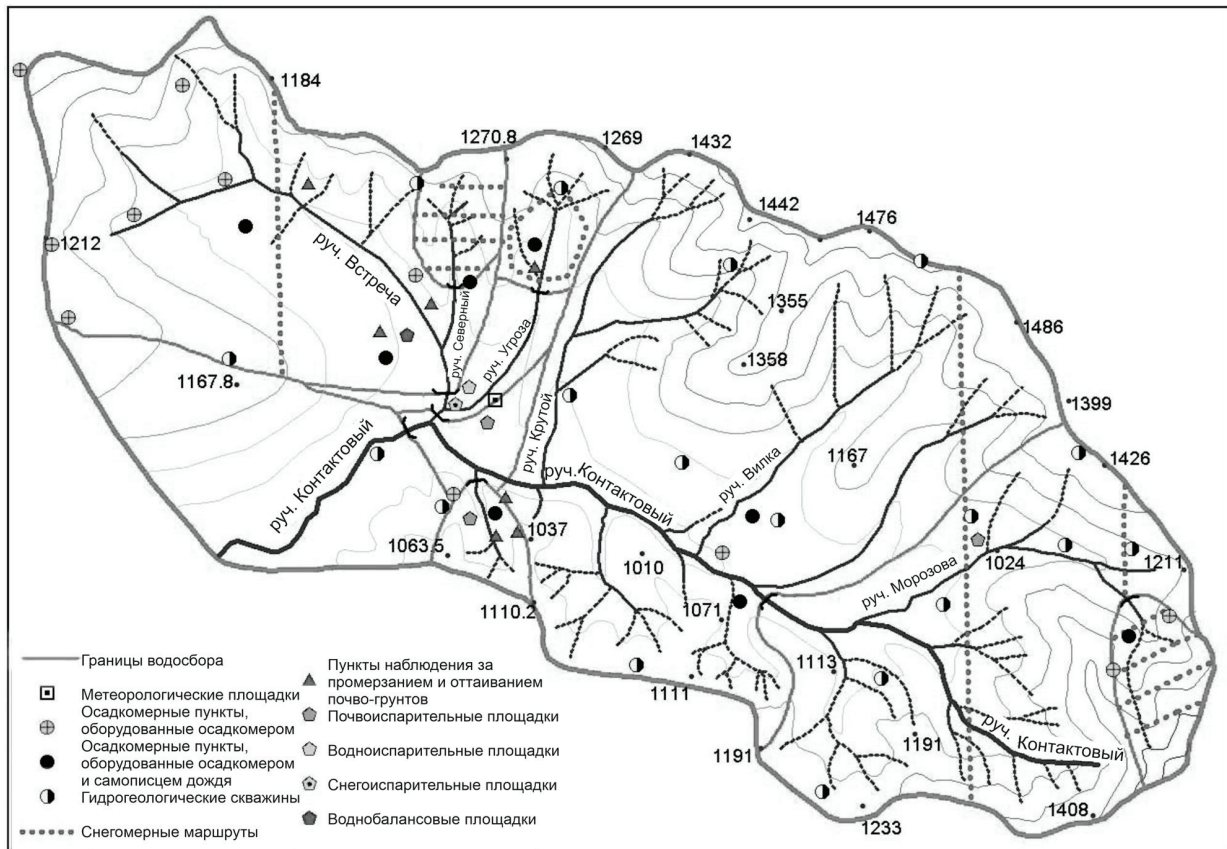


Рисунок 1.4. Карта-схема размещения сети водосборов и пунктов наблюдений на Колымской ВБС в период ее наибольшего развития в 1970-х – 1980-х годах

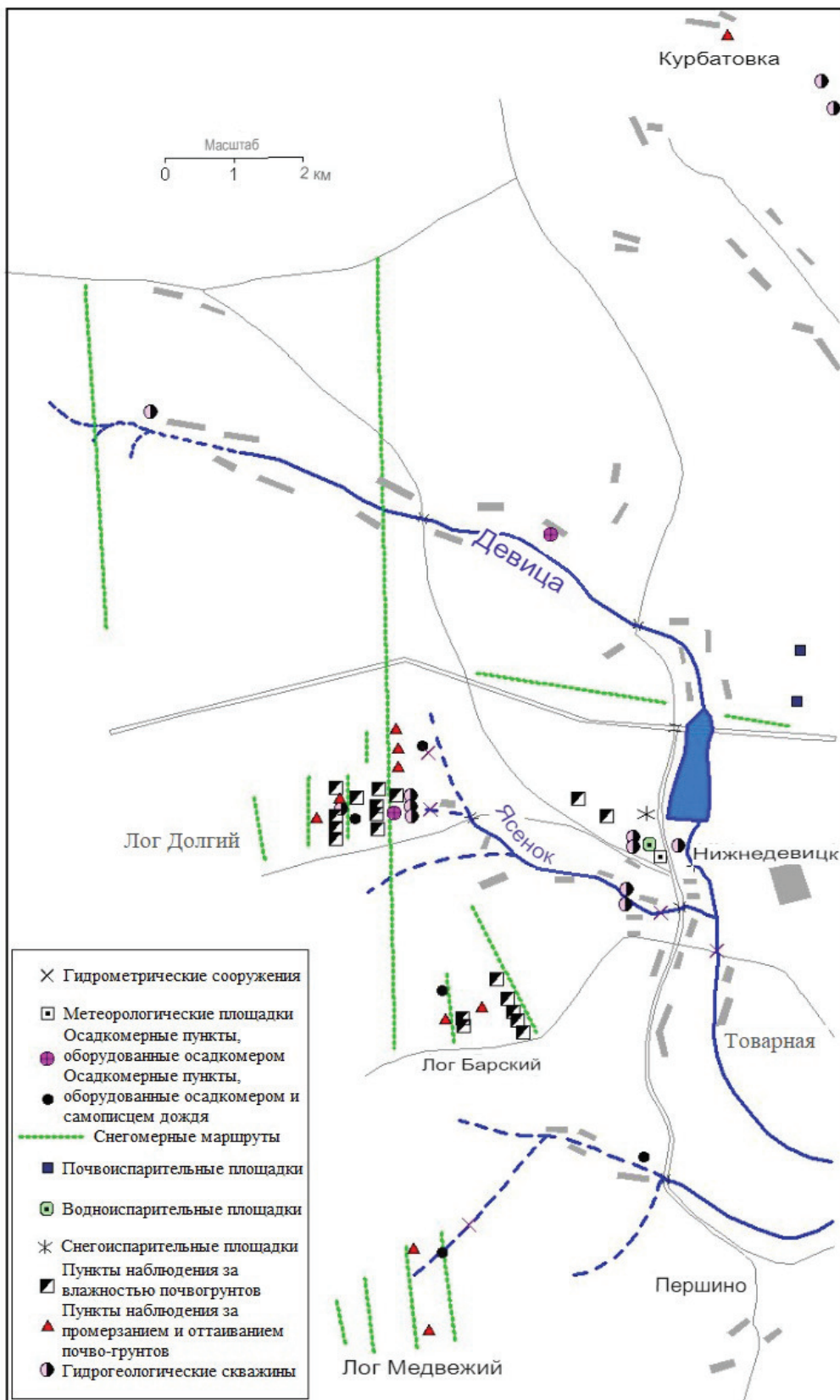


Рисунок 1.5. Карта-схема размещения сети водосборов и пунктов наблюдений на Нижнедевицкой ВБС в 1980-х годах

В полуаридных и аридных регионах бывает сложно осуществить выбор водосборов на основе «гнездового» принципа. В этих случаях выбирают серии небольших водосборов, не объединенных общим репрезентативным бассейном. Как правило, это суходольные водосборы, не имеющие постоянного стока в течение всего года. Такие схемы размещения репрезентативных водосборов использованы на ВБС Каменная Степь (рисунок 1.6) и закрытой в настоящее время Дубовской ВБС.

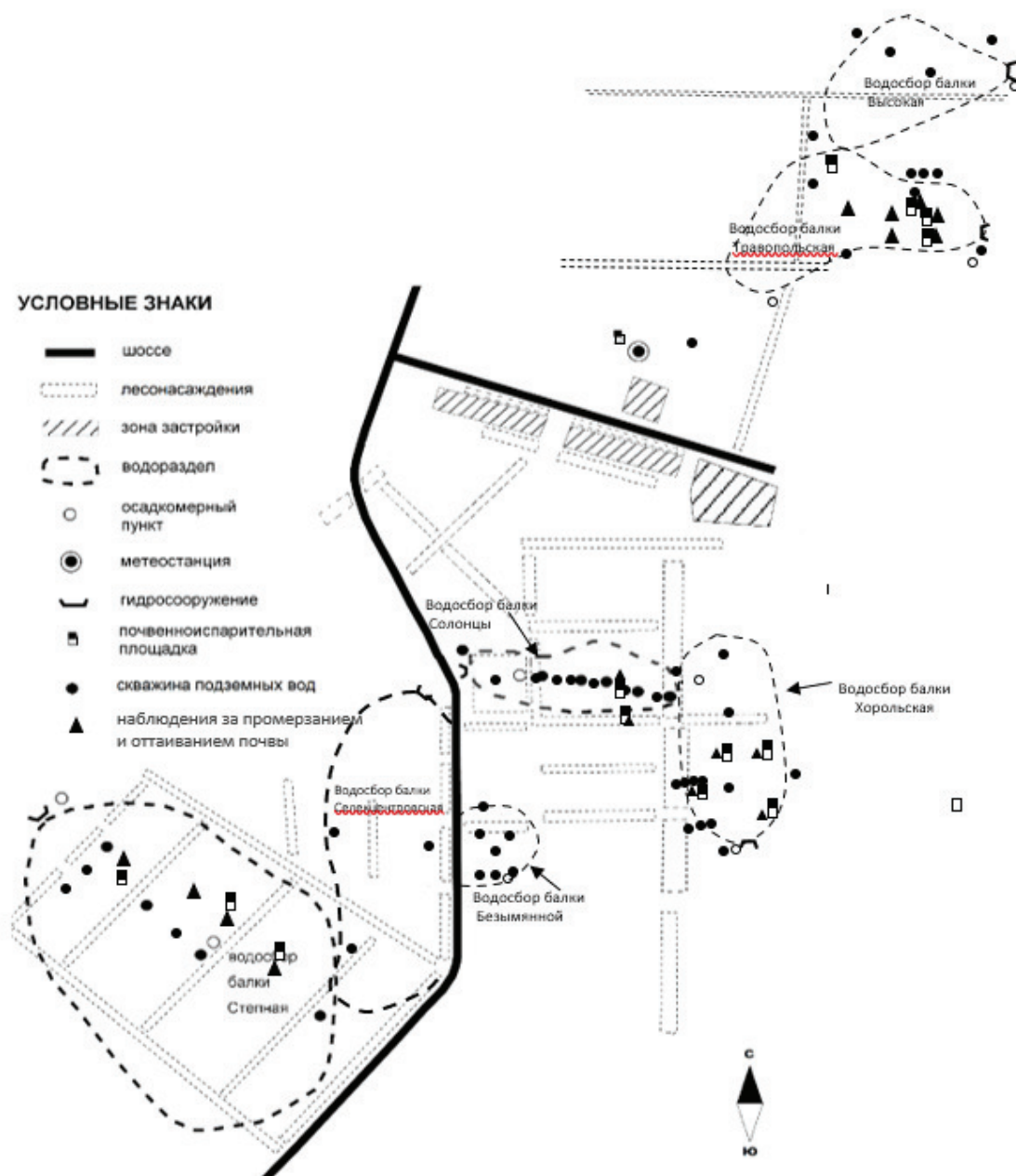


Рисунок 1.6. Карта-схема размещения сети водосборов и пунктов наблюдений на ВБС Каменная Степь в 1980-х годах

1.4.2 Программа работ воднобалансовых станций

Программа работ воднобалансовых станций была разработана исходя из принципиального положения, сформулированного В. А. Урываевым [Урываев, 1953]: «Изучение формирования гидрологического режима водных объектов может дать наилучший результат, если в процессе этих работ окажется возможным непосредственное измерение всех или большинства составляющих водного баланса одновременно с изучением факторов, их определяющих».

Поэтому стандартная программа наблюдений ВБС в соответствии с требованиями Руководства воднобалансовым станциям [Руководство, 1973] включает в себя следующие виды наблюдений и работ:

- Наблюдения за стоком воды, наносов и растворенных веществ с водосборов и склонов;
- Метеорологические наблюдения, в том числе и наблюдения за радиационным и тепловым балансом;
- Наблюдения за осадками и запасами воды в снеге;
- Наблюдения за испарением с поверхности суши, воды и снега;
- Наблюдения за динамикой влагозапасов в зоне аэрации и грунтовых водах различных водоносных горизонтов;
- Наблюдения за промерзанием и оттаиванием почво-грунтов;
- Наблюдения за аккумуляцией воды на водосборе в русловой сети, озерах, прудах, понижениях рельефа;
- Специальные почвенные, топографические, гидрогеологические и ландшафтные съемки объектов и т.д.

Очевидно, что в состав работ воднобалансовых станций включены практически все виды гидрологических наблюдений и большая часть метеорологических наблюдений в нижнем приземном слое атмосферы.

Помимо стандартной (базовой) программы наблюдений и работ на станциях осуществлялись дополнительные исследования по направлениям, актуальным для данного региона. К таким работам относятся исследования динамики снеготаяния, изучение водной эрозии, исследование влияния на сток и водный режим лесных полос и т.п. Кроме того, дополнительные работы могут включать в себя непродолжительные наблюдения на более плотной осадкомерной сети или расширенной сети наблюдений за влагозапасами в почве для уточнения необходимого и достаточного количества этих пунктов наблюдений (опорной сети), и т.п.

Таким образом, программа работ станции состоит из основной (неизменной) части базовых наблюдений и дополнительной части, которая может меняться. Это коренным образом отличает воднобалансовые станции от аналогичных объектов

за рубежом, где малые исследовательские водосборы чаще всего принадлежат университетам и другим исследовательским центрам, а программа работ на них нередко формируется в зависимости от предпочтений исследователей, кратковременных грантов, и может меняться от года к году и от объекта к объекту.

К сожалению, принцип неизменности базовой части программы наблюдений ВБС был нарушен в 1990-е годы и в настоящее время не исполняется даже на ряде оставшихся действующих станций. Дополнительные работы, разумеется, были прекращены полностью.

Типичное размещение пунктов наблюдений на воднобалансовых станциях показано выше на *рисунках 1.4 – 1.6*. Помимо гидростворов, которые замыкают выбранные бассейны, в состав наблюдательной сети ВБС входят метеостанция, осадкомерная сеть, маршруты снегосъемок, испарительные площадки, пункты наблюдений за влагозапасами в почве, ее промерзанием и оттаиванием, гидрогеологические наблюдательные скважины. Пункты наблюдений за испарением с воды, почвы и снега, а также актинометрические и градиентные наблюдения обычно совмещены с метеоплощадкой. В некоторых случаях при большой площади объектов или значительном перепаде высот в составе наблюдательной сети воднобалансовой станции действовали две метеостанции (например, на Колымской и Приморской ВБС). В период наиболее активной работы ВБС на некоторых из них также действовали несколько почвенно-испарительных площадок на полях с различными видами сельскохозяйственных культур. Маршрутные снегомерные съемки и привязанные к ним пункты наблюдений за запасами влаги в почве, ее промерзанием и оттаиванием, а также скважины грунтовых вод, как правило, сосредоточиваются на самых малых водосборах с учетом типичных ландшафтов территории.

1.4.3 Размещение пунктов наблюдений на ВБС, методы и средства измерений

Размещение пунктов наблюдений и их количество на водосборах, требования к оборудованию регламентированы соответствующими Руководствами и Наставлениями, основным из которых является «Руководство воднобалансовым станциям» [Руководство, 1973]. Однако со времени подготовки и утверждения Руководства прошло около пятидесяти лет и практика требует сделать некоторые уточнения и замечания. Возможно, назрела необходимость переработки этого документа, однако следует заметить, что принципиальных изменений в большинстве видов и методов наблюдений нет, о чем будет сказано ниже. Новые средства измерений, которые могут быть использованы на воднобалансовых станциях, обеспечиваются соответствующими руководящими документами и рекомендациями по их применению.

Измерения подавляющего большинства гидрологических и связанных с процессами формирования стока характеристик являются косвенными и производятся со значительными погрешностями, требуют значительных физических усилий и навыков при их выполнении. Прямые гидрологические наблюдения ограничиваются измерениями температуры и уровней воды на гидростворах и в скважинах грунтовых вод, а также измерениями расходов воды объемным способом.

Важнейшими аспектами производства наблюдений являются достоверность получаемой информации и однородность ее многолетних рядов. Достоверность в значительной степени зависит не только от правильного построения наблюдательной сети, но также от тщательного соблюдения всех требований при производстве наблюдений и квалификации персонала. Однородность определяется неизменностью местоположения пунктов наблюдений и природных условий в этих пунктах, а также неизменностью или подтвержденной преемственностью методов и средств измерений.

Наиболее подробно методы и средства гидрологических измерений с учетом развития современного приборостроения изложены в изданной ВМО шестой редакции «Руководства по гидрологической практике» [Руководство, 2013].

Измерения стока воды на воднобалансовых станциях производятся на малых реках, ручьях и временных водотоках в соответствии с требованиями «Наставления гидрометеорологическим станциям и постам», вып. 6, ч. II [Наставление, 1972]. На малых реках воднобалансовых станций измерения выполняются на обычных гидрометрических створах, иногда в контрольном русле. Это, как правило, замыкающие створы основного водотока станции и створы по его длине, а также створы на наиболее значительных притоках.

На более мелких водотоках, чаще всего не имеющих постоянного стока, применяются гидрометрические расходомеры (лотки и водосливы). Требования к установке различных типов расходомеров и особенности их эксплуатации весьма подробно изложены в упомянутом Наставлении и Международном руководстве [Репрезентативные и экспериментальные бассейны, 1971].

Гидрометрические расходомеры требуют обустройства дорогостоящих и сложных в изготовлении капитальных сооружений, в наших условиях чаще всего бетонных. В некоторых странах использовались также передвижные металлические сооружения, в последние десятилетия применялись пластмассовые штампованные лотки на пенополиуретановой основе для предотвращения перекосов устройства при промерзании и оттаивании ложа русла, но в России такой практики нет.

Для бетонных сооружений, кроме того, что при их строительстве сложно выдерживать необходимые параметры, нередки случаи деформаций при их промерзании и оттаивании, вследствие которых могут образовываться трещины, фильтрующие воду помимо регистрирующего профиля, что требует постоянного контроля. Водосливы с порогом часто накапливают наносы в верхнем бьефе, что нарушает их

гидравлические характеристики. Поэтому представляется, что простые контрольные русла, обладая устойчивой зависимостью $Q=f(H)$, предпочтительнее лотков, тем более что все без исключения сооружения требуют тщательной тарировки во всем диапазоне измеряемых расходов и уровней воды, поскольку в подавляющем числе случаев реальные зависимости расхода от напора отличаются от лабораторных зависимостей. Эти работы облегчают производимые в настоящее время средства измерений расходов воды для самых малых глубин потоков (типа электромагнитного измерителя скорости потока «Посейдон»).

При обустройстве тонкостенных водосливов, которые чаще всего применяются на самых малых водотоках, особо следует учитывать два обстоятельства, о которых говорится в упомянутом выше Руководстве. Во-первых, в верхнем бьефе сооружения образуется зона затопления, площадь которой возрастает при повышении уровня воды. Это может влиять на режим грунтовых вод в зоне влияния сооружения и нарушает режим формирования стока на элементарных водосборах. Поэтому зона затопления по возможности должна быть минимальной. Во-вторых, необходимо соблюдать требования к размещению водосливного выреза на оси подводящего канала русла, а скорости воды (скорости подхода) не должны превышать 0,5 м/с при пропуске максимальных расходов, для чего нередко используют успокоители или «гасители» разной конструкции.

Точность определения стока как на обычных гидростворах, так и, в первую очередь, на гидрометрических расходомерах зависит от точности измерения уровня (напора) воды на них. В настоящее время разработаны и выпускаются различные типы автоматизированных уровнемеров – поплавковых, гидростатических, барботажных и радарных. На стандартной гидрометрической сети уже используются все перечисленные типы уровнемеров, хотя большая часть установленных приборов по-прежнему находится в режиме опытной эксплуатации.

Для гидрометрических постов воднобалансовых станций на водотоках с постоянным стоком (в том числе в период с ледовыми явлениями) предпочтительными остаются более надежные поплавковые уровнемеры. В створах малых временных водотоков (логов, небольших ручьев), не имеющих постоянного стока и оборудованных расходомерами, следует использовать высокоточные гидростатические уровнемеры.

Необходимо, напомнить, что уровнемеры, во-первых, фиксируют изменения уровня воды, но не сам уровень, который контролируется ручными измерениями уровня по сваям на обычных гидростворах, либо крючковой или игольчатой рейкой на расходомерах, то есть автоматизация отдельных видов наблюдений не отменяет необходимость ручных наблюдений. Во-вторых, в условиях России, где в холодный период на реках образуется сплошной ледовый покров, на малых реках под

ним устанавливается повышенное давление воздуха, и наиболее распространенные гидростатические уровнемеры дают искаженные значения уровней воды.

Наблюдения за склоновым стоком осуществляются на стоковых и воднобалансовых площадках. Первые стоковые площадки были организованы еще С. И. Небольсиным и П. П. Надеевым в 1922 году на Московской областной сельскохозяйственной станции в с. Собакино под Москвой. Материалы наблюдений на них обобщены в их монографии [Небольсин, Надеев, 1937]. Наиболее интенсивно эти наблюдения развивались в 1950 – 1960-х годах, когда формированию склонового стока при различных условиях состояния поверхности (различные виды агротехнической обработки, разная степень промерзания почвы, наличие ледяной корки на поверхности и т.п.) уделялось большое внимание.

Краткий обзор работ, посвященных изучению склонового стока, приведен в монографии В. И. Корзуна [Корзун, 1968]. Весьма подробно проанализированы материалы наблюдений на стоковых и воднобалансовых площадках в работе Н. И. Коронкевича [Коронкевич, 1990], причем к обобщениям привлечены данные не только воднобалансовых (стоковых) станций Гидрометслужбы, но и стационаров других ведомств. Однако позднее интерес к этим наблюдениям, помимо уже упомянутого перехода к приоритетным «глобальным» исследованиям водных ресурсов, ослабел по ряду причин.

Прежде всего, обустройство площадок является весьма трудоемким и дорогостоящим мероприятием. Рекомендуемые размеры площадок, применяемых для оценки собственно склонового стока, согласно «Руководству воднобалансовым станциям» колеблются от 10х20 м до 50х400 м, то есть фактически наибольшие по размеру площадки теоретически могут занимать всю длину склона и давать информацию о реальном поверхностном и внутрипочвенном склоновом стоке. Обустройство серий площадок в приводораздельной части склона, в части склона от водораздела до примерной нижней границы транзитной зоны и по всей длине склона могло бы дать информацию о формировании стока со склона в целом и роли разных его частей, о чем в своих выводах упоминает и В. И. Корзун.

Однако преобладающее число реально действовавших стоковых и воднобалансовых площадок имели небольшие размеры и располагались преимущественно в средних и нижних частях склонов. Материалы наблюдений на таких площадках носят характер скорее индексный, чем соответствуют реальному склоновому стоку. Даже на Валдае, где действовали 16 стоковых и 4 воднобалансовых площадки, их максимальные размеры не превышали 10х80 м, хотя в упомянутой монографии Н. И. Коронкевича фигурируют площадки весьма значительных размеров, вплоть до 1 – 2 га и более.

В период проведения дискуссии о «внутрипочвенном стоке», проходившей в ГТИ 11 – 12 февраля 1954 года при участии ведущих отечественных гидрологов, гид-

рогеологов и почвоведов, большое внимание было уделено материалам наблюдений на воднобалансовых площадках, в том числе их качеству и достоверности. В частности, В. В. Романов отмечал, что воднобалансовые площадки существенно завышают величину реального внутрипочвенного стока, особенно при их небольшом размере из-за нарушения его естественного режима в нижней части площадки, где создается своего рода воронка депрессии [Романов, 1955]. М. И. Львович считал использование совсем малых площадок (размером 5x5 м) для изучения внутрипочвенного стока не только не полезным, но и вводящим в заблуждение. По его мнению «экспериментальное изучение его может принести и приносит плоды при воспроизведении комплекса основных условий и факторов» [Львович, 1955]. То есть достоверность получаемой информации зависит от правильного (репрезентативного) выбора места расположения площадки, правильной глубины заложения водосборного лотка и значительной длины и ширины площадки для уменьшения влияния краевых эффектов.

Другим недостатком ряда воднобалансовых площадок явилось, как ни удивительно, стремление изучить влияние леса на формирование стока воды. Для этого нередко организовывали параллельные площадки, одна из которых оставалась полевой, а вторая засаживалась лесом, чаще всего еловым. Посадки производились очень загущенными, создавая условия, далекие от естественных лесных угодий, примером чему могут служить воднобалансовые площадки на Подмосковной ВБС (фото 1.1). Все это вызвало много критики и нареканий, во многом справедливой, на использование материалов стоковых и воднобалансовых площадок как неадекватных, и повлекло закрытие большинства из них.

В то же время анализ материалов наблюдений за склоновым стоком, несомненно, способствовал развитию теории формирования стока воды, прежде всего, стока весеннего половодья, оценки воздействия на склоновый сток агротехнических мероприятий и др. Эти наблюдения, как будет показано ниже, оказались полезными и безальтернативными для понимания изменения процессов формирования стока в условиях климатических изменений, поскольку отражают условия формирования стока внутрипочвенной верховодки. Расчеты склонового стока, кроме того, требуются при решении ряда инженерных задач, хотя надежные методы до сих пор не разработаны. Стоковые площадки используются также при определении выноса со склонов удобрений и других растворенных и взвешенных веществ. В районе зоны загрязнения после аварии на ЧАЭС такие площадки использовались для оценки смыва радионуклидов со склонов. Поэтому, как представляется, наблюдения на стоковых и особенно воднобалансовых площадках рано исключать из арсенала методов и средств, как гидрологических, так и других связанных с процессами формирования склонового стока исследований.

Современные средства определения структуры поверхностной толщи почвогрунтов типа георадара позволяют проследить преимущественные пути стекания

внутрипочвенной верховодки и их водосборную площадь. Это, несомненно, существенно улучшит процесс выбора воднобалансовых площадок и назначение их границ, если возникнет возможность их организации.

Помимо стоковых и воднобалансовых площадок существовали также водо- непроницаемые площадки для изучения интенсивности водоотдачи из снега.

Наблюдения за стоком наносов и растворенных веществ на воднобалансовых станциях производятся на стоковых площадках и избранных створах логов, балок, ручьев и малых рек станции согласно требованиям «Руководства воднобалансовым станциям».

Необходимо отметить, что программа этих наблюдений на ВБС сильно отличается большей детальностью по сравнению со стандартной сетью. Так пробы на мутность воды должны отбираться в межень 2 раза в сутки, в период половодья – не менее 6 раз за сутки, а при прохождении дождевых паводков интервалы между отборами проб составляют 1 – 0.5 часа. Обработка проб и анализ результатов должны производиться непосредственно на станции, где для этого оборудуется специальная лаборатория.



Фото 1.1. Воднобалансовые площадки на Подмосковной ВБС (справа от залесенной площадки расположена полевая площадка)

Пробы на химический состав отбирают из каждого водотока станции не менее 10 раз в год, а при прохождении интенсивных дождевых паводков их количество увеличивают до 16 проб.

Метеорологические наблюдения на ВБС чаще всего выполняются по программе метеостанций II разряда. Комплекс наблюдений включает в себя наблюдения за температурой и влажностью воздуха, скоростью и направлением ветра, облачностью, атмосферным давлением, продолжительностью солнечного сияния, видимостью, количеством атмосферных осадков, их видом и интенсивностью, температурой и глубиной промерзания и оттаивания почвы, высотой снежного покрова на площадке и степенью покрытости снегом окружающей местности. Кроме того, на станциях проводятся актинометрические и теплобалансовые наблюдения, к ним приурочены площадки для производства наблюдений за испарением с поверхности снега, почвы и воды.

При организации воднобалансовых станций репрезентативные водосборы по возможности старались выбирать в районах, где уже имелись действующие метеостанции с продолжительными рядами наблюдений (например, Нижнедевицк, Каменная Степь). В районах, где таких станций не было, они создавались одновременно с организацией ВБС.

В настоящее время различные фирмы выпускают большое количество автоматизированных комплексов для измерения метеорологических характеристик, которые при необходимости могут дополнительно устанавливаться на воднобалансовых станциях с большими площадями водосборов или значительными перепадами высот и сложным рельефом.

Существуют также автоматизированные актинометрические комплексы, средства измерений потоков водяного пара в приземном слое. Эти приборы и оборудование дорогостоящие, сложны в эксплуатации и техническом обслуживании, для работы с ними необходим высококвалифицированный персонал и регулярное техническое обслуживание. Кроме того, необходимо установить насколько надежно такое оборудование будет работать в сложных климатических условиях России и возможно ли его использование в удаленных районах.

Наблюдения за атмосферными осадками проводятся на метеостанции ВБС и сети осадкомерных пунктов на ее водосборах. Возможно более корректное определение реального количества осадков, выпавших на поверхность водосбора, и их интенсивности – одна из наиболее сложных и важных задач при создании воднобалансовой станции. Организация осадкомерной сети на репрезентативных водосборах чаще всего требует принятия компромиссных решений между требуемой плотностью этой сети и экономическими и организационными соображениями.

Рекомендации по плотности осадкомерной сети для водосборов площадью менее 1000 км² подробно изложены в Международном руководстве [Репрезентативные

и экспериментальные бассейны, 1971] с указанием погрешности осреднения ливневых и обложных осадков 75%-ной обеспеченности при различной плотности сети, площади и временном шаге осреднения. Обоснование рекомендаций по плотности осадкомерной сети для равнинных территорий выполнено по результатам специальных работ, проведенных в зоне избыточного увлажнения на северо-западе и в полупустынной зоне на юго-западе России, где на площади в 600 км² было установлено до 750 осадкомеров, по которым одновременно производились измерения [Голубев, 1966]. Аналогичные исследования были проведены в Белоруссии [Булавко, 1971].

Следует отметить, что согласно приведенным в указанном издании данным, погрешности оценки величины суточных осадков при плотности сети осадкомеров 1 пункт на 100 км² для зоны преимущественно фронтальных осадков могут достигать 70%, а для зоны преимущественно ливневых осадков – 90%, на месячном уровне – около 20%, что наглядно свидетельствует о важности соблюдения требуемой плотности осадкомерной сети при проведении любых исследований, связанных с достоверностью измеряемых величин осадков, особенно ливневого характера.

Несколько под другим углом зрения, но также с большой степенью детализации вопрос организации наблюдений за атмосферными осадками рассмотрен в монографии В. Е. Водогрецкого и О. И. Крестовского [Водогрецкий и Крестовский, 1975]. В ней приведены таблицы рекомендуемого минимального количества осадкомерных пунктов для равнинных водосборов различной площади и конфигурации. Еще ранее эти таблицы были приведены в Руководстве воднобалансовым станциям [Руководство, 1973]. Поскольку эти публикации были изданы более сорока лет назад небольшими тиражами, мы считаем полезным привести эти таблицы здесь еще раз (таблицы 1.3 и 1.4).

Таблица 1.3 – Минимальное число осадкомеров и pluviографов для водосборов различной площади на равнинной территории

Площадь водосбора, км ²	Зона избыточного увлажнения		Зона достаточного увлажнения		Зона недостаточного увлажнения	
	осадкомер	плювиограф	осадкомер	плювиограф	осадкомер	плювиограф
до 0,2	1	1	1	1	1	1
0,2-1	1-2	1	2	1	2	2
1-10	2-3	2 - 3	3	2-3	4	2-3
10-30	4	3	5	3	6	3-4
30-100	6	3	7	4	8	4
100-300	8	4	10	5	12	6
300-1000	10	5	13	6	16	8

Таблица 1.4 – Максимально допустимые расстояния между осадкомерами (км) на водосборах удлиненной формы

Площадь водосбора, км ²	Зона избыточного увлажнения	Зона достаточного увлажнения	Зона недостаточного увлажнения
0,2-1	0,5	0,5	0,5
1-10	2,0	1,8	1,5
10-30	3,0	2,5	2,0
30-100	4,0	3,7	3,5
100-300	6,0	5,5	5,0
300-1000	10,0	9,0	8,0

В горных районах рекомендуется устанавливать осадкомеры на наиболее пониженных и возвышенных участках склонов различной экспозиции с тем, чтобы наблюдениями был освещен весь диапазон высот, в соответствии с требованиями Руководства воднобалансовым станциям [Руководство, 1973].

Необходимо отметить, что климатические изменения привели, в том числе, и к изменению характера выпадения осадков на обширных территориях [Богданова и др., 2014]. Весьма вероятно, что границы традиционно принятых зон преимущественно фронтальных и преимущественно ливневых осадков могли измениться.

Зона формирования значительных по слою и интенсивности ливневых осадков расширилась к северу и востоку ЕТР, возросли их слои и интенсивность. Поэтому приведенные в таблицах 3 и 4 данные требуют проверки, но, поскольку в ближайшем будущем вряд ли будут проведены работы, аналогичные выполненным в 1950 – 1960-е годы, основным ориентиром остаются приведенные выше критерии. Тем более что и они в настоящее время не выполняются.

В Международном руководстве [Репрезентативные и экспериментальные бассейны, 1971] схему размещения пунктов осадкомерной сети на репрезентативных бассейнах рекомендуется достаточно часто пересматривать для ее оптимизации, выявления мест размещения репрезентативных для водосбора или его части осадкомерных пунктов. Для решения этой задачи предлагается сравнивать абсолютные величины измеренных в точке осадков за дождь (сутки, месяц) со средней по всему бассейну величиной. Используются также статистические характеристики временных рядов наблюдаемых осадков.

Основными приборами для измерения количества и интенсивности осадков на воднобалансовых станциях, как и на стандартной гидрометеорологической сети, по-прежнему являются осадкомер с защитой Третьякова (О-1) и плевниограф (П-2), первые образцы которых были испытаны еще в 1949 году на Валдае. Помимо этих

приборов в отдельных случаях используются суммарные и наземные (ямочные) осадкомеры. Ямочные осадкомеры считаются эталонными для измерения жидких осадков и не требуют введения поправок на ветровой недоучет, но на практике в России применяются редко.

В последние годы появились хорошо зарекомендовавшие себя весовые осадкомеры, которые способны одновременно выполнять и функции плевниографов, причем использование таких приборов с подогреваемой верхней кромкой позволяет применять их и для измерения твердых и смешанных осадков. Однако стоимость весовых осадкомеров весьма высока, и устанавливаться они могут только на относительно защищенных от вандализма метеоплощадках. Конструкция весовых осадкомеров должна быть адаптирована для сложных природных условий России и в течение последних лет тщательно проверяется на осадкомерном полигоне ВФ ГГИ.

Выпуск плевниографов П-2 в последние годы прекращен, а весовые осадкомеры еще не получили широкого распространения на сети Росгидромета. В результате была нарушена система наблюдений за интенсивностью осадков, которая наряду с их слоем является важнейшей характеристикой для расчетов максимального дождевого стока. В частности, на Северо-Западе России в настоящее время действуют всего 3 прибора на Валдае, в Санкт-Петербурге и Лодейном Поле.

Осадкомеры, использующие принцип «качалки», желательно на ВБС не использовать, ввиду угрозы больших погрешностей измерений при высокой интенсивности жидких осадков. Для твердых и смешанных осадков они непригодны.

Существуют в настоящее время также измерительные осадкомерные системы, использующие оптические и радарные принципы измерения, но в России они пока широкого применения не имеют, а погрешности измерений с их применением требуют уточнения, хотя некоторые из применяемых автоматизированных метеорологических комплексов укомплектованы такими датчиками.

Для корректного измерения величины осадков с точки зрения предотвращения ветрового воздействия полезно устанавливать приборы в кустарнике, постриженном на высоте приемной части осадкомера, как это сделано на полигоне Валдайской контрольной системы, либо в двойной заборной защите [Голубев, 1973], или на поляне в лесу. Последний из вариантов довольно сложный из-за трудностей в подборе поляны оптимального размера, а также изменений состояния леса. Параллельные наблюдения на открытых и защищенных от ветра пунктах позволяют установить величину поправочного коэффициента на ветровой недоучет. Модель полной корректировки измеренных осадков была предложена В. С. Голубевым с соавторами в 2000 году [Голубев и др., 2000]. На основании этой модели позднее были разработаны соответствующие рекомендации для Гидрометслужбы, в соответствии с которыми производится корректировка измеренных величин осадков [Рекомендации, 2004].

Следует упомянуть радиолокационный метод оценки осадков, но на водно-балансовых станциях, за исключением ВФ ГГИ, он не применяется. Интенсивность «засветки» и траектория движения дождевой облачности, получаемые на радаре, могут применяться (и применяются) для предупреждения о возможности возникновения опасных паводков в том или ином регионе, но не позволяют измерить собственно величину осадков для прогнозирования паводка и его основных характеристик, поэтому применение метеорологических радаров должно сопровождаться наземными наблюдениями [Руководство по гидрологической практике, 2013].

Наблюдения за снежным покровом, ледяной коркой и слоем воды под снегом производятся на водосборах, воднобалансовых и стоковых площадках (помимо стандартных наблюдений на метеоплощадке). Целью этих работ является получение информации о характере и динамике накопления влаги на поверхности водосбора в холодный период и в ходе снеготаяния, контроль величин осадков, измеряемых осадкомерной сетью, данные о максимальных запасах воды в снеге к началу весеннего снеготаяния, которые являются основным предиктором прогноза стока половодья.

Производство наблюдений за запасами воды в снеге на воднобалансовых станциях регламентируется Руководством [Руководство, 1973] и соответствующими Наставлениями [Наставления, 1969]. Однако более подробно этот вопрос рассмотрен В. Е. Водогрецким и О. И. Крестовским [Водогрецкий и Крестовский, 1975] с учетом опыта, накопленного уже после издания указанных регламентов.

Снегомерные работы на ВБС включают в себя стандартные снегомерные съемки, выполняемые на станциях и постах Гидрометслужбы, систематические ландшафтно-маршрутные съемки и сплошные снегомерные работы на участках (т.н. «снегомерных квадратах») или маршрутах (например, дополнительные съемки в овражно-балочной сети или в лесополосах и т.п.).

На стоковых и воднобалансовых площадках линии снегомерных маршрутов назначаются в зависимости от их размеров (от 4-х до 10-и) поперек склона. На водосборах снегомерные работы проводятся на ландшафтных маршрутах и маршрутах сплошных снегомерных съемок.

Ландшафтные маршруты на небольших водосборах обычно имеют три линии в верхней, средней и нижней его частях. Они прокладываются от водораздела до водораздела через дрена (водоток) под прямым углом таким образом, чтобы основные уголья (лес, поле с различными типами поверхностей, долины, склоны и т.п.) были освещены наблюдениями в пропорциях, соответствующих их распространению на водосборе.

В холодный период года снегомерные наблюдения проводятся в конце месяца, а на отдельных малых водосборах также после значительных оттепелей

при снижении запасов воды в снеге на 15 – 20%. Перед началом весеннего снеготаяния помимо ландшафтных выполняются 1 – 2 сплошные снегосъемки для определения максимальных предвесенних запасов воды в снеге. Длина маршрутов сплошных снегосъемок при сложном рельефе может достигать 10 – 20 км даже на небольших водосборах. Например, на Колымской ВБС общая протяженность маршрутов сплошной снегосъемки в 1970 – 1980-х годах составляла 21 км при площади основного водосбора станции руч. Контактный – п. Нижний 21,7 км².

Расстояние между точками измерений высоты снега колеблется от 2 м до 20 м в зависимости от длины снегомерных линий. Плотность снега определяется через 20 – 400 м также в зависимости от длины маршрутов. В овражно-балочной сети при стандартных наблюдениях определение плотности снега в обычных условиях не предусмотрено из-за большой трудоемкости работы. Однако на воднобалансовых станциях с характерным ландшафтом эти наблюдения проводились на специально назначенных маршрутах. Такие наблюдения особенно важны в районах Севера, Черноземья и некоторых других, где в результате ветрового воздействия в отдельные годы до 60 – 80% снега может скапливаться в депрессиях, и сток половодья формируется именно этим снегом.

Основными приборами для измерений высоты и плотности снега по-прежнему являются переносная снегомерная рейка и весовой плотномер. При всей кажущейся рутинности и относительной легкости в производстве снегосъемок этот вид наблюдений также требует навыков и тщательности. Особенно сложно определять высоту снега на каменных валунных осыпях, в местах произрастания кедрового стланика, на болотах и других поверхностях, покрытых моховым покровом, но и на более простых поверхностях в талом состоянии (особенно на пашне) важно не заглублять рейку в почву. Достоверное определение плотности снега зависит от корректного отбора снежного монолита. Практика показывает, что при слоистой структуре снежного покрова и в лесу при формировании в толще снега ледяных «орехов» после оттепелей и таяния снега на кронах, величины плотности снега могут быть занижены в среднем на 0,05 кг/м³ и даже более того. По некоторым оценкам занижение плотности снега в конце зимы может составлять 0,03 – 0,15 кг/м³ [Вершинина и др., 1985]. Поэтому, при проведении особенно ответственных максимальных снегосъемок необходимо более тщательно контролировать и проверять качество измерений плотности снега, а при необходимости проводить дополнительные плотностные съемки.

Инструментальная погрешность определения снегозапасов в точке колеблется от 10% при запасах менее 20 мм до 5% при запасах свыше 40-50 мм [Вершинина, Крестовский, 1980].

В 1980-е годы предпринимались попытки использовать для снегосъемок метод, основанный на принципе поглощения гамма-излучения снежным покровом.

Были разработаны приборы для наземных и авиационных съемок. Полученные результаты вполне соответствовали требованиям практики и стали использоваться для прогнозов объема весеннего половодья [Методические указания, 1989]. Однако этот метод применим только для холодных и некоторых высокогорных регионов, где предзимний фон увлажнения поверхностного слоя почво-грунтов в течение зимы сохраняет стабильность. Метод, кроме того, требует контроля и калибровки по данным стандартных наземных наблюдений. Использование наземных портативных и стационарных приборов, в которых использовались источники гамма-излучения, не нашло развития из-за повышенных доз облучения при работе с ними и низкой чувствительности приборов (М-100) сравнительно с авиационными аналогами. Современные попытки возобновить это направление в измерении запасов воды в снеге в условиях переменного увлажнения деятельного слоя почво-грунтов не привели к положительному результату, что показали испытания на водосборах ВФ ГГИ.

В некоторых зарубежных странах для оценки запасов воды в снеге используют так называемые «снежные подушки», которые фиксируют изменение давления нарастающей снежной толщей. Однако этот метод имеет ряд существенных недостатков, связанных с невозможностью учитывать влияние слоистой структуры снега. Погрешности измерений в случае образования многослойной структуры и, особенно, при формировании «снежных мостов» могут достигать 50% от реальной величины запасов воды в снеге.

Наблюдения за испарением с поверхности почвы, воды и снега на воднобалансовых станциях осуществляются на постоянных площадках, совмещенных с метеорологической площадкой, на луговой поверхности или залежи. На ряде станций, расположенных в регионах с развитым сельским хозяйством, действовали также дополнительные почвенно-испарительные площадки на полях, занятых различными видами растительных культур. Эти площадки, как правило, не имели постоянного местоположения, а перемещались в зависимости от севооборота.

Наблюдения за суммарным испарением с поверхности почвы на сети Гидрометслужбы производятся преимущественно с помощью взвешиваемых испарителей ГГИ-500-50 и ГГИ-500-100 (площадь поверхности монолита 500 см^2 , высота монолита 50 см и 100 см, соответственно). Почвенно-испарительная площадка, оборудованная этими приборами, включает в себя два (ранее 4) испарителя и почвенный дождемер. На некоторых станциях использовались также гидравлические почвенные испарители малой модели с площадью поверхности монолита 2000 см^2 и глубиной 150 см. В отдельных случаях применялись взвешиваемые лизиметры с площадью поверхности монолита 2000 см^2 и его глубинами 100 – 250 см.

Наиболее распространенными на сети Гидрометслужбы России являются испарители ГГИ-500-50 и ГГИ-500-100, имеющие сравнительно простую

конструкцию и относительно более простые в эксплуатации. Они позволяют определять величины суммарного испарения с минимальным временным шагом в пять дней. По всем оценкам испарители ГГИ-500 занижают величину испарения примерно на 10%. Случайная ошибка определения суммарного испарения этими испарителями, при соблюдении всех требований, составляет $\pm 16-23\%$ [Репрезентативные и экспериментальные бассейны, 1971; Водогрещкий и Крестовский, 1975; Вершинин и др., 1981]. Эталонном для установления погрешностей служил большой гидравлический испаритель (БГИ), действовавший на ВНИГЛ. Площадь БГИ составляла 5 м², глубина – 2 м.

При этом испарители с более коротким монолитом ГГИ-500-50 могут использоваться главным образом в зоне избыточного и достаточного увлажнения, при глубине залегания уровня грунтовых вод более 1.5 м, что отмечается во всех изданиях, посвященных организации наблюдений за испарением с поверхности почвы. Разумеется, работы с монолитами глубиной 1 м более трудоемки при зарядке, а их масса составляет 80 – 90 кг. Однако испарители ГГИ-500-100 требуют перезарядки раз в месяц, в то время как более короткие ГГИ-500-50 необходимо перезарядать значительно чаще, особенно в засушливые периоды.

Взвешивание испарителей до сих пор, как и в 1950-е годы, производится на малогабаритных шкальных весах грузоподъемностью 150 кг и чувствительностью весов 50 г. Весы позволяют производить взвешивание с точностью до 10 г. Для испарителей ГГИ-500-50 могут использоваться менее грузоподъемные, но более чувствительные весы. В настоящее время производится большой спектр весов, более точных, чувствительных и простых в использовании, что позволит упростить процедуру взвешивания испарителей.

Гидравлические испарители малой модели измеряли испарение с полусуточным шагом, а в настоящее время, при наличии большого спектра уровнемеров, они могли бы быть модернизированы и позволили бы проследить внутрисуточный ход испарения. В то же время гидравлические испарители намного сложнее в установке и обслуживании, из-за чего их количество даже в период наиболее интенсивного развития гидрологических наблюдений было невелико. Конструкция и описание гидравлических испарителей приведены в Международном руководстве [Репрезентативные и экспериментальные бассейны, 1971].

В отдельных случаях в отечественной практике и за рубежом применяются лизиметры, преимущественно для решения научно-методических задач, связанных с оценкой интенсивности суммарного испарения, динамики влаги в почвенно-грунтовой толще для различных типов почво-грунтов и сельскохозяйственных культур, оценкой скорости просачивания воды и пополнения грунтовых вод и др.

Организация и производство наблюдений за испарением с поверхности почвы, описание оборудования и порядок его использования, записи и обработки

данных регламентируются соответствующим Руководством [Руководство по производству наблюдений над испарением с почвы и снежного покрова, 1963]. Помимо наблюдений за суммарным испарением, осадками и просачиванием воды через почвенные монолиты в состав работ входят также наблюдения за влажностью почвы при смене монолитов, скоростью ветра, температурой и влажностью воздуха.

Средства и методы наблюдений за испарением с поверхности почвы, так же, как и за остальными характеристиками водного баланса и определяющими их факторами, были разработаны для природных условий центральной и южной частей ЕТР. Они не всегда пригодны для других регионов, в частности, для регионов распространения многолетней мерзлоты. Как отмечает Н. Г. Василенко [Василенко, 2013], опыт производства наблюдений за испарением с поверхности почвы на полигоне «Могот» в зоне БАМ показал, что стандартные взвешиваемые испарители могут использоваться здесь только в период, когда глубина оттаивания почвогрунтов превышает 20 см. Для наблюдений использовались укороченные до 25 см монолиты. Зарядка монолитов большего размера оказалась невозможной из-за высокой щебенистости нижележащих горизонтов грунтов. Бортики испарителей тщательно изолировались мхом для уменьшения их прогрева.

На Колымской воднобалансовой станции были проведены измерения температурного режима монолита в стандартном приборе и в ненарушенном грунте. Они показали, что температура монолита в приборе практически сразу после зарядки повышается на 3 – 4°С по сравнению с температурой ненарушенного грунта, что ведет к быстрому пересыханию монолита и нарушению его водно-теплового режима. Поэтому под руководством Е. Л. Бояринцева при участии С. И. Суцанского на станции был разработан специальный тип взвешиваемого испарителя со стандартной площадью поверхности 500 см² и глубиной 20 см, работающий на принципе простейшего лизиметра. Кожух, в который заряжался монолит, был сделан из плексигласа, дно герметичное. Монолит вставлялся в гнездо таким образом, чтобы стенки и дно тесно контактировали с грунтом. В кожух была встроена перфорированная трубка, с помощью которой уровень воды в монолите поддерживался на уровне, соответствующем уровню грунтовых вод (глубине оттаивания) окружающей территории. Зарядка монолита производилась с осени, наблюдения – с 20 мая по 1 июля 1979 года ежедневно в 8 ч. За этот период испарение по стандартному прибору составило 46 мм, а по экспериментальному – 87 мм. Позднее на станции был создан более совершенный не взвешиваемый лизиметр для производства наблюдений за испарением с поверхности почвы.

Помимо измерения испарения с поверхности почвы с помощью испарителей и лизиметров для этой цели используется также метод теплового баланса, основанный на измерении радиационного баланса (В), называемого также «остаточной

радиацией», который представляет собой «разность между энергетическими освещенностями, создаваемыми приходящим и уходящим от подстилающей поверхности излучением» [РД 52.04.562-96, 1997]:

$$B = D + S' + E_a - R_k - E_z - R_d \quad (1.1),$$

где S' и D – прямая солнечная (с учетом склонения) и рассеянная радиация, E_a , R_k , E_z , R_d – атмосферная, отраженная коротковолновая, земная и отраженная длинноволновая радиация, соответственно.

Тепловой баланс, в свою очередь, выражается уравнением [Руководство по теплобалансовым наблюдениям, 1977]:

$$B + P + L + V = 0 \quad (1.2),$$

где B – радиационный баланс деятельной поверхности, P – поток тепла в почве, L – турбулентный поток тепла в приземном слое атмосферы, V – затраты тепла на испарение с деятельной поверхности или его выделение при конденсации водяного пара на этой поверхности.

Расчет затрат тепла на испарение производится преимущественно методом теплового баланса, а при определенных условиях, отмеченных в «Руководстве по теплобалансовым наблюдениям», с применением формулы турбулентной диффузии.

Приборы и оборудование для производства актинометрических и теплобалансовых наблюдений сложные и должны обслуживаться высококвалифицированными кадрами.

В 1970-х годах для актинометрических наблюдений в СССР использовались регистрирующие установки (УАР), которые с помощью многоканального самопишущего устройства позволяли вести запись пяти основных видов радиационных потоков. В последние годы за рубежом были созданы более совершенные автоматизированные комплексы для выполнения актинометрических наблюдений, а также приборы для прямых измерений потоков тепла в почве и потоков пара в приземном слое. Однако все эти приборы весьма дороги, а возможности их применения в климатических условиях России, особенно зимой и в переходные периоды, не вполне ясны и требуют серьезной проверки, хотя на некоторых станциях они уже установлены. Кроме того, этим приборам требуется постоянное и хорошо отлаженное техническое сопровождение. Поэтому всегда полезно иметь исправные приборы и оборудование для производства наблюдений с применением самописцев или ручных срочных наблюдений в случае выхода из строя автоматики.

За рубежом основными методами инструментального определения испарения с почвы являются метод теплового баланса и лизиметры. При этом лизиметры устанавливаются на платформы весов, что позволяет вести непрерывную запись процесса.

Отметим, что производство наблюдений за испарением с поверхности почвы в современных условиях не является приоритетной задачей Гидрометслужбы. По состоянию на 2017 год на сети действовало 22 почвенно-испарительных пункта наблюдений на всю территорию России. При этом почти все оставшиеся пункты, за исключением Нижнедевицкой ВБС и ВБС Каменная Степь, оборудованы испарителями ГГИ-500-50.

По-видимому, предполагается, что величина этого основного элемента водного баланса может быть с достаточной достоверностью получена расчетным путем одним из методов, рекомендуемых в [Руководство по гидрологической практике, 2013]. Однако, во-первых, для расчетов испарения с почвы как в полуаридной и аридной зонах, так и в зоне достаточного увлажнения необходима информация о влагосодержании почвы, которая отсутствует. Во-вторых, расчет полезно контролировать на основе полевых наблюдений. То же касается и испарения с поверхности воды и снега.

Измерения испарения с водной поверхности на сети воднобалансовых станций и специализированной водно-испарительной сети производятся на водноиспарительных площадках II и III типа. В комплект площадки III типа входит один испаритель ГГИ-3000 площадью 0,3 м² и один почвенный дождемер с приемной поверхностью 0,3 м². Испаритель ГГИ-3000 представляет собой цилиндрический бак высотой 60 см с конусообразным дном. На площадках II типа помимо испарителей ГГИ-3000 используются испарительные бассейны площадью 20 м² и глубиной 2 м, а на площадках I типа еще и испарительные бассейны площадью 100 м². Площадки I типа на воднобалансовых станциях не встречаются, за исключением ВФ ГГИ, где большой испарительный бассейн давно не действует. На акваториях водоемов в отдельных случаях применялись также плавучие установки.

Наблюдения производятся в соответствии с требованиями Наставления [Наставление, 1985], в котором подробно изложены принципы организации площадок (в том числе плавучих установок), приборы и оборудование, порядок наблюдений и обработки материалов. Наблюдения по испарителям и испарительным бассейнам сопровождаются измерениями осадков, температуры поверхности воды, скорости ветра, температуры и влажности воздуха.

Данные наблюдений, получаемые с помощью испарителей ГГИ-3000, являются в какой-то мере индексными и отражают общие тенденции в многолетних изменениях испарения с поверхности воды. Однако альтернативы им нет, и в настоящее время, как и раньше, не существует способа измерений испарения с реальных водоемов, а расчетные схемы без данных испарителей дают слишком большие погрешности, о чем сказано ниже.

Наиболее адекватные реальному испарению с поверхности воды на водоемах данные можно получить только используя плавучие установки, причем

оборудованные бассейнами площадью 20 м^2 , что возможно при соединении трех стандартных плотов. Применение таких установок позволяет измерять испарение с водоема за месяц со случайной погрешностью $\pm 10\%$, а за безледоставный сезон – $\pm 3\%$ [Голубев и Кузнецов, 1980]. В той же статье отмечено, что корректировка расчета испарения с поверхности водоемов с использованием данных наблюдений по испарителям и испарительным бассейнам снижает погрешность расчета в 2 раза по сравнению с принятой методикой расчета без учета этих материалов [Указания, 1969]. Такой же вывод был сделан М. А. Колером для условий США, где сетевым прибором для определения испарения с поверхности воды является испаритель класса А.

Предложения по методике использования материалов наблюдений по испарителям ГГИ-3000 для расчета испарения с поверхности водоемов были внесены В. С. Голубевым и А. П. Урываевым [Голубев и Урываев, 1983].

Б. Д. Зайков установил, что испарение, измеренное в бассейнах площадью 20 м^2 , расположенных на суше на ровном открытом месте корректно отражает испарение с малых водоемов глубиной до 6-8 м и площадью до 100 га. Более поздние исследования показали, что данные наблюдений по этим бассейнам в целом за теплый период позволяют оценивать испарение с поверхности водоемов площадью до 100 км^2 с погрешностью $\pm 6 \%$, а для водоемов с площадью зеркала до 1000 км^2 – с погрешностью $\pm 9 \%$. Таким образом, испарительные бассейны площадью 20 м^2 вполне корректно отражают величину годового испарения с поверхности воды более 90 % всех водоемов на территории России. Методика перехода от показаний основных сетевых испарителей ГГИ-3000 к испарению из испарительных бассейнов площадью 20 м^2 была разработана В. И. Кузнецовым [Кузнецов, 1970].

Для водоемов с большей площадью акватории погрешность существенно возрастает и составляет от -23% до 28% , что связано не столько с увеличением их площади, сколько со степенью проточности и процессами водообмена.

Использование плавучих установок (плотов) – мероприятие значительно более дорогостоящее и сложное по сравнению с наиболее распространенными стандартными площадками III типа, оборудованными испарителями ГГИ-3000, и даже с площадками II типа. Из воднобалансовых станций плавучие установки действовали только на ВФ ГГИ, который мы причисляем к их числу и каковым он, по сути, является. В настоящее время плавучая установка действует только на болотной станции Брусовица.

Проблемы производства наблюдений за испарением с поверхности воды, по мнению В. С. Голубева и В. И. Кузнецова, включают в себя два основных аспекта. Первый из них заключается в различной степени защищенности

водно-испарительных площадок от ветрового воздействия, второй – в нарушении теплового режима водной массы испарителя из-за ее взаимодействия с подстилающей поверхностью, о чем писал В. А. Урываев еще в 1953 году на основании опыта использования первого теплоизолированного испарителя, установленного на ВНИГЛ в 1949 году.

В соответствии с требованиями Наставления водно-испарительные площадки должны располагаться на открытой местности на расстоянии не менее 30-кратной высоты предметов, ослабляющих скорость ветра. В. С. Голубев и В. И. Кузнецов по степени ветровой защищенности подразделили площадки на три категории: «защищенность дальнего порядка», когда препятствия (деревья, строения, возвышенности и т.п.) находятся от площадки на расстоянии 100 м и более); «защищенность среднего порядка» – препятствия удалены на расстояние 50 – 100 м; «защищенность ближнего порядка» – препятствия находятся на расстоянии менее 50 м.

Выполненный названными авторами анализ рядов наблюдений за испарением с поверхности воды по испарителям ГГИ-3000 для станций, имеющих одинаковый порядок защищенности и сходные условия взаимодействия с подстилающей поверхностью, показал, что «поле испарения с поверхности воды относительно корреляционной функции является однородным и изотропным для расстояний до 600 км для всей территории страны», где перепад высот не превышает 500 – 600 м. Однако с повышением класса защищенности влияние микроклиматических факторов резко возрастает и репрезентативность данных наблюдений снижается. Это еще раз подтверждает необходимость соблюдения неизменного состояния физико-географических условий охранных зон водноиспарительных и других пунктов наблюдений от воздействия как антропогенного, так и естественного характера (например, зарастания лесом).

Влияние теплообмена между испарителем и окружающим грунтом на показания испарителя ГГИ-3000 различно и зависит от географической зональности и местных условий (состава и увлажнения почво-грунтов, глубины залегания грунтовых вод, наличия и оттаивания мерзлоты и др.). В численном выражении влияние теплообмена с окружающим грунтом на показания испарителя (мм/сутки) выражается следующим уравнением [Голубев, Калюжный и Федорова, 1980]:

$$\Delta E = 1.32e^{0.19\Delta t} - 1.20 \quad (1.3),$$

где ΔE – среднее суточное изменение испарения, обусловленное теплообменом с грунтом; $\Delta t = (t_n - t_{0.3})$ – разность средних месячных значений температуры почвы на глубине 20 см (t_n) и температуры почвы в испарителе ($t_{0.3}$); e – основание натурального логарифма.

Поэтому был разработан и испытан теплоизолированный испаритель ГГИ-3000 ТМ, конструкция и результаты испытаний которого изложены в

упомянутой выше статье В. С. Голубева с соавторами. Следует упомянуть, что создание теплоизолированного испарителя было в свое время поддержано рабочей подгруппой по измерениям осадков, испарения и влажности почвы Комиссии по приборам и методам наблюдений ВМО. К сожалению, этот прибор до сих пор не внедрен на сети. Один его экземпляр действует на береговой испарительной площадке ВФ ГГИ. По обоснованному мнению авторов прибора, его применение могло бы способствовать оптимизации водно-испарительной сети применительно к ее численности в бывшем СССР. В настоящее время плотность сети далека от оптимальной (менее 100 пунктов по стране), и продолжает уменьшаться.

Используемый во многих странах испаритель класса А имеет диаметр 120.6 см и высоту 25.4 см. Устанавливается он на деревянном поддоне над поверхностью земли, что, конечно, проще по сравнению с испарителями ГГИ-3000, и, тем более, испарительными бассейнами. К недостаткам этого испарителя можно отнести его возвышение над поверхностью земли и, поэтому, большую зависимость от метеорологических факторов сравнительно с заглубленными испарителями. Сопоставление данных наблюдений испарителя класса А с наблюдаемыми на испарительном бассейне площадью 20 м² величинами испарения показали отклонения до 50 – 70% [Урываев, 1953]. Подробно сравнительные испытания испарителей ГГИ-3000 и класса А рассмотрены в работе А. Р. Константинова с соавторами [Константинов, Федорова, Голубев, 1960]. Тем более удивительно, что испаритель класса А наряду с испарительным бассейном площадью 20 м² признан ВМО эталонным. Это, по-видимому, связано с его широким применением во многих странах мира, простотой конструкции и установки.

Разработка высокоточных уровнемеров в сочетании с автоматизированными метеорологическими датчиками и датчиками дождя позволила создать автоматизированный комплекс для наблюдений за испарением с поверхности воды, рекомендованный ВМО к применению. Такие комплексы в настоящее время действуют в ряде зарубежных стран и были бы полезны на сети Росгидромета.

В заключение следует упомянуть еще об одной, возможно, не самой сложной, но неприятной проблеме в производстве наблюдений за испарением с поверхности воды. Проблема эта заключается в необходимости защиты испарителей от птиц и мелких животных. Обычно в России такая защита делается на каждой станции произвольно из подручных сетчатых материалов по усмотрению персонала (пример приведен на фото 1.2). Представляется целесообразным оценить воздействие защиты на результаты наблюдений и предложить оптимальный ее вариант. В некоторых странах (например, в Австралии), использующих испарители класса А, такие оценки были сделаны. Они показали снижение измеренных величин испарения в среднем на 8 – 10% при температурах воздуха до 30°С и увеличение при более высоких температурах.

Наблюдения за испарением с поверхности снега в России производятся на снегоиспарительных площадках размером 15x10 м с помощью снежных испарителей ГГИ-500-6. Порядок организации площадки, средства и методы производства наблюдений и обработки полученных материалов регламентированы Руководством [Руководство по производству наблюдений над испарением с почвы и снежного покрова, 1963].

Метод снежных испарителей используется во всех странах, где испарение со снега актуально. Различия заключаются в площади поверхности испарителей, их высоте и материале, из которого они изготовлены. Согласно рекомендациям ВМО площадь должна быть не менее 200 см² [Руководство, 2013].

Наблюдения за запасами воды в почво-грунтах являются одной из наиболее важных составляющих воднобалансового комплекса наблюдений. Именно почвенно-грунтовая толща является средой, в которой атмосферные осадки преобразуются в поверхностный, внутрипочвенный и подземный сток, а также испарение.



Фото 1.2. Водно-испарительная площадка на ВБС Каменная Степь

Организация, средства и методы наблюдений, порядок выполнения работ и обработки полученных материалов регламентируются целым рядом Наставлений, Руководств и Указаний. Для сети воднобалансовых станций они сочетают регламенты, применяемые на агрометеорологической сети [РД 52.04.562-96; Руководство по определению агрогидрологических свойств почвы на гидрометстанциях, 1964], и специальные документы для ВБС [Методические указания управлениям Гидрометслужбы № 52, 1959; Руководство воднобалансовым станциям, 1973]. Агрометеорологические наблюдения, которые также выполняются на воднобалансовых станциях, носят на них все-таки сопутствующий характер. Главной целью является мониторинг режима увлажнения верхнего слоя зоны аэрации.

Работы по изучению почво-грунтов на ВБС подразделяются на систематические (режимные) и эпизодические.

Эпизодические наблюдения за содержанием влаги в почво-грунтах включают в себя сплошную съемку и определение плотности (объемного веса) почво-грунтов. Сплошная съемка с учащенным количеством пунктов отбора проб почво-грунтов производится при организации наблюдений с целью определения оптимального местоположения и количества точек для систематических наблюдений. Согласно «Руководству воднобалансовым станциям» она проводится в периоды наименьшего и наибольшего увлажнения для установления неравномерности распределения влаги в почво-грунтах по территории. В. Е. Водогрецкий и О. И. Крестовский рекомендуют проводить сплошную съемку только в засушливый период [Водогрецкий В. Е. и Крестовский О. И., 1975], что представляется более обоснованным, поскольку изменчивость распределения влагозапасов в почво-грунтах по территории в это время наибольшая.

Процедура производства сплошной съемки и обработки полученных материалов подробно изложена в Методических Указаниях [Методические указания управлениям Гидрометслужбы № 52, 1959] и монографии Водогрецкого В. Е. и Крестовского О. И. Упомянутые издания, как отмечалось выше, были изданы небольшими тиражами, а сплошные влагосъемки в России не проводились около сорока лет со времени работы Донской экспедиции ГГИ, и опыт производства таких работ практически утрачен. Поэтому представляется целесообразным повторить основные положения процедуры проведения сплошных съемок и обработки полученных данных.

Количество скважин для съемки устанавливается в зависимости от сложности ландшафта водосбора, который определяется степенью разнообразия рельефа, почв и растительности. Численным критерием сложности является значение среднего квадратического отклонения запаса влаги в почво-грунтах в принятом слое (обычно 1 м) σ , определяемое по уравнению:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (W_i - \bar{W})^2}{n}} \quad (1.4),$$

где W_i – влагозапасы в i -том пункте наблюдений; \bar{W} – среднее арифметическое значение влагозапасов из всех n пунктов наблюдений.

Было установлено, что для простых условий единообразного ландшафта, характерного, к примеру, для степи, $\sigma = 10 \div 15$ мм, для более сложных условий пересеченной местности, занятой различными угодьями, $\sigma = 30 \div 50$ мм, а для очень сложных водосборов $\sigma = 60 \div 90$ мм. Необходимое число скважин n для получения средних влагозапасов в почво-грунтах с погрешностью 15 мм (величина, близкая инструментальной погрешности гравиметрического метода), обеспеченной в 80% случаев, для простых условий составляет 5 – 7, для сложных условий – 10 – 20, для очень сложных условий – 30 – 60.

Скважины на исследуемом водосборе могут размещаться по принципу механического отбора, равномерно по всей его площади, или по принципу типического отбора, пропорционально основным типам ландшафтов. В этом случае количество скважин на каждом типе ландшафта определяется из соотношения:

$$n_i = n \left(\frac{f_i 100}{F} \right) \quad (1.5),$$

где n_i – количество скважин в пределах типа ландшафта; n – общее число скважин на водосборе; f_i – площадь, занимаемая типом ландшафта на водосборе; F – общая площадь водосбора.

Влагозапасы на водосборе при сплошной съемке определяются с учетом «веса» каждого типа ландшафта. При типическом подходе скважины уже распределены по типам ландшафтов, а для механического принципа отбора требуется группировка скважин по типам ландшафтов.

После проведения съемки выполняется расчет по определению оптимального количества пунктов наблюдений на водосборе, который включает в себя несколько этапов.

На первом этапе вычисляются запасы влаги в метровом слое почво-грунтов в каждом пункте измерений W_i и их средняя арифметическая величина для всех точек (\bar{W}), после чего по формуле (4) определяется величина среднего квадратического отклонения (σ).

Далее вычисляется ошибка выборочной средней, имеющей различную вероятность, по формуле:

$$Z_{\alpha} = \frac{t_{\alpha}}{\sqrt{n-1}} \sigma \quad (1.6),$$

где σ – среднее квадратическое отклонение запаса влаги в почво-грунтах; n – количество пунктов определений; t_{α} – и нормированное отклонение выборочной средней \bar{W} от истинной средней.

Нормированное отклонение t_{α} вычислено для различной вероятности α и различного числа определений и приводится в курсах статистики в табличном виде, а также в Методических Указаниях [Методические указания управлениям Гидрометслужбы № 52, 1959] (таблица 1.5).

Таблица 1.5 – Распределение нормированных отклонений в малой выборке для значений t_{α} при $\alpha=0,80$

$n-1$	$\alpha=0,80$	$n-1$	$\alpha=0,80$	$n-1$	$\alpha=0,80$	$n-1$	$\alpha=0,80$
1	3,02	6	1,44	12	1,36	27	1,32
2	1,89	7	1,41	14	1,35	30	1,32
3	1,64	8	1,40	16	1,34	40	1,31
4	1,58	9	1,39	18	1,33	60	1,30
5	1,48	10	1,37	26	1,33	120	1,29

Для удобства сравнения ошибок их выражают в процентах от средних значений \bar{W} :

$$P_{\alpha} = \frac{Z_{\alpha}}{W} 100\% \quad (1.7),$$

Для целей воднобалансовых расчетов допустимая относительная ошибка не должна превышать 5% в аридных и полуаридных регионах и 10% в зоне достаточного и избыточного увлажнения.

На последнем этапе по таблице 1.6 устанавливается достаточное количество скважин для получения среднего запаса влаги в почво-грунтах с заданной погрешностью, то есть такое количество, при котором ошибка среднего запаса влаги (в миллиметрах слоя воды) не выходит за заданные пределы при обеспеченности $\alpha=0,80$. После этого по установленному количеству скважин при заданных $Z_{0,80}$ или P_{α} определяется средняя взвешенная величина влагозапасов в почве на водосборе.

Таблица 1.6 – Определение числа скважин n по среднему квадратическому отклонению σ для разных значений ошибки $Z_{0.80}$ при $\alpha = 0,80$

σ	Значение ошибки $Z_{0.80}$, мм				σ	Значение ошибки $Z_{0.80}$, мм		
	2	5	10	15		5	10	15
3	6	3	2	1	35	51	23	11
5	13	4	3	2	40	104	29	14
7	23	6	3	3	45	134	36	17
10	41	9	4	3	50	164	44	20
15	93	17	6	4	60	200	62	28
20	164	28	9	5	70		84	39
25	256	41	12	7	80		108	50
30		59	17	9	90		166	76

В Международном руководстве для случая равномерного распределения скважин по площади водосбора рекомендуется рассчитывать необходимое количество скважин N по формуле:

$$N = \frac{C_v^2 \cdot 10^4}{(P\%)^2} \quad (1.8),$$

где C_v – коэффициент вариации влажности почвы по площади водосбора; $P\%$ – заданная относительная ошибка среднего значения влажности почвы на водосборе обеспеченностью 0,67.

На воднобалансовых станциях сплошные съемки выполняются однократно при организации наблюдений за запасами влаги в почве на выбранном водосборе. Сплошная съемка может быть повторена через несколько лет при условии изменения ландшафтных характеристик, например, после распашки целинных земель, облесении и т.п.

Специально эту работу, как представляется, надо проводить в случае сложных ландшафтных условий, которых при выборе водосборов на воднобалансовых станциях следует по возможности избегать. Наблюдения за влагозапасами в почве на них проводятся на элементарных водосборах с площадями от нескольких десятых до 2 – 3 км². Пункты наблюдений обычно совмещаются со снегомерными маршрутами таким образом, чтобы на каждом склоне располагалось 3 – 4 скважины в верхней, средней и нижней его частях. Поэтому на каждом из наиболее детально исследуемых водосборов количество скважин составляет 18 – 20 единиц, что обеспечивает необходимую точность измерения средних для него влагозапасов.

Пробы почво-грунта в пункте измерений отбираются в слоях 0 – 5 см, 5 – 10 см и далее через 10 см (при стандартной глубине отбора до 1 м). Для отбора проб в отечественной практике используются ручные буры АМ-16 и АМ-26. Метод такого отбора проб и их дальнейшей обработки называется гравиметрическим. Инструментальная погрешность определения влагозапасов этим методом в точке для слоя 1 м составляет 5% для суглинистых почв и 10% для супесей и песков (8 – 10 мм) [Вершинина, Крестовский, 1980].

За рубежом довольно широко используются датчики влажности почвы, основанные на принципе измерения электросопротивления среды в зависимости от ее увлажнения (TDR, FDR). Преимуществом этого подхода является неизменность местоположения пунктов наблюдений и значительное снижение трудозатрат. Однако такие датчики не могут применяться на сельхозполях в период обработки почвы. В мерзлых почво-грунтах они неприменимы. Калибровка датчиков производится обычно в лабораторных условиях, а контроль их показаний все равно должен осуществляться гравиметрическим способом.

В 1970 – 1990-х годах в отечественной практике применялись также нейтронные измерители влажности почвы (НИВ), но в настоящее время они, по крайней мере, в России и Европе, не используются, хотя в Руководстве ВМО этот метод описан как применяемый. Дистанционные методы на современном этапе позволяют оценить увлажнение зоны аэрации преимущественно на качественном уровне. Такие попытки предпринимались и в нашей стране [Вершинина и др., 1990], но развития эти работы не получили.

Процедура обработки отобранных образцов почвы заключается в определении их влажности в процентах от абсолютно сухого веса. Пересчет процентной влажности (E) в слой воды для каждого горизонта отбора проб производится с учетом объемного веса (плотности) почво-грунтов по формуле:

$$W = \frac{E\rho h \cdot 10}{100} = \frac{E\rho h}{10} \quad (1.9),$$

где W – содержание влаги в почво-грунте, выраженное в мм слоя воды; ρ – объемный вес соответствующего слоя (плотность), кг/м³; h – мощность слоя почво-грунта; 10 – коэффициент для перевода запаса влаги из сантиметров в миллиметры.

Таким образом, важнейшей водно-физической характеристикой почво-грунтов является их объемный вес (плотность), то есть вес единицы объема сухого почво-грунта в ненарушенном сложении. Помимо корректного вычисления содержания влаги в почве эта характеристика определяет ее общую порозность, полную и наименьшую влагоемкость, по которой определяют расчетные величины коэффициента водоотдачи почво-грунтов.

Методика определения плотности почво-грунтов была в свое время разработана, прежде всего, для целей производства агрогидрологических наблюдений на сельскохозяйственных угодьях и регламентируется «Руководством по определению агрогидрологических свойств почв на гидрометстанциях» [Руководство ..., 1985]. Она адаптирована для мелкозернистых почв сельскохозяйственных полей, содержащих преимущественно тонкодисперсные фракции. Для отбора проб в ненарушенной структуре используются буры АМ-27 (Васильева) и АМ-7 (Качинского), которые позволяют достаточно надежно определять плотность почвы с незначительным (до 2 – 5%) содержанием включений размером до 0,5 см.

Однако на репрезентативных водосборах воднобалансовых станций (например, Колымской и Приморской ВБС), как и вообще в природе, часто встречаются почво-грунты с высоким содержанием щебня или древесных корней, как в отдельных горизонтах, так и по всему профилю. Определение плотности таких почво-грунтов с применением буров Васильева и Качинского малоэффективно. Проблема эта не новая: еще в 1948 году С. И. Долгов предложил использовать для каменистых почв пробоотборник объемом 4 л, а в 1957 году Ф. Р. Зейдельман разработал метод определения плотности по объему вынутаго грунта. Оба подхода широкого применения не получили.

В конце 1970 – начале 1980-х годов работы в этом направлении были проведены в экспедиции БАМ ГГИ [Василенко, 2013]. В качестве пробоотборника использовалась часть цилиндра почвенного испарителя ГГИ-500 высотой обычно 10 см. В основу обработки материала была положена модифицированная методика С. И. Долгова. По этой методике общий вес отобранного монолита W объемом V включает в себя сухой грунт (мелкозем, S), содержащуюся в монолите влагу (M_s) и крупные фракции (условно «камни», St). При этом учитывается, что «камни» являются инертной составляющей, которая может удерживать только пленочную влагу.

Для определения объемной плотности щебенистых почво-грунтов (ρ) в упомянутой монографии Н. Г. Василенко предлагается использовать формулу:

$$\rho = \frac{S}{V} = \frac{W - St}{(100 + M_{s,\%})V} \cdot 100\% \quad (1.10),$$

где $M_{s,\%}$ – процентное содержание влаги в почво-грунте монолита, которое определяется стандартным способом по отношению к сухой навеске, взятой из монолита; остальные условные обозначения приведены выше.

В результате отбора около 50-и монолитов на полигоне Могот экспедиции БАМ ГГИ было установлено, что при содержании каменистых фракций в почво-грунтах в 25 – 40% от их общего объема, что типично для центральной части Станового хребта, стандартный метод отбора малых монолитов завышает реальную

объемную плотность в среднем на 30%. В других регионах эта величина может отличаться, и в каждом случае, при наличии щебенистых почво-грунтов, необходимо производить специальную съемку их объемной плотности.

Схожая ситуация имеет место и при определении объемной плотности лесных почв, где в верхнем корнеобитаемом слое глубиной 20 – 40 см содержится большое количество растительных остатков, а на месте отмерших и перегнивших корней формируются каверны и полости. Поэтому методика определения объемной массы почво-грунтов верхнего слоя (до 0,5 – 1 м) для решения гидрологических задач в дальнейшем должна быть уточнена.

Следует отметить, что определение объемной плотности почво-грунтов в шурфах производится обычно до глубины 1 м, в отдельных случаях до 2 м. Для отбора проб в более глубоких горизонтах используют бурение ударного или вращательного действия с пробоотборниками различной конструкции. При этом происходит уплотнение грунта, что может привести к завышению объемной плотности на 0,1 – 0,2 кг/м³ [Водогрецкий и Крестовский, 1975].

Полевое определение объемной плотности в пунктах наблюдений на воднобалансовых станциях выполняется в обязательном порядке. Однако следует заметить, что использование литературных данных для объектов, где в расчетах необходимо знание объемной плотности, может привести к значительным погрешностям. Для одинаковых с точки зрения качественной оценки типов грунтов (пески, супеси, суглинки, глины) объемная плотность может отличаться на 0,1 – 0,2 кг/м³, а для верхних слоев почвы (до 0,5 м) и более того.

Наблюдения за уровнями грунтовых вод проводятся с целью оценки их вклада в речной сток, изучения взаимодействия поверхностных и подземных вод, влияния на питание грунтовых вод гидрогеологических и климатических условий, других факторов.

Наблюдения за грунтовыми водами осуществляются по смотровым гидрогеологическим скважинам и включают в себя измерения уровня и температуры воды. При проведении специальных работ могут также отбираться пробы на химический и изотопный анализ. Вопросы организации и производства этого вида наблюдений изложены в Методических указаниях [Методические указания управлениям Гидрометслужбы № 48, 1957] и Руководстве воднобалансовым станциям. Полезная информация приведена также в Руководстве по изучению режима и баланса подземных вод в речных бассейнах ... [Руководство, 1968].

Организация сети гидрогеологических скважин осуществляется по принципам, схожим с организацией наблюдений за влажностью почвы. Главным отличием является оценка геологических и гидрогеологических условий водосбора, для чего используются фондовые и литературные данные, а также производится разведочное бурение до водоупора нижнего из всех дренируемых основным водотоком

станции горизонтов подземных вод. В большинстве случаев это верхний постоянный водоносный горизонт, поскольку водосборы ВБС небольшие по площади и русла их основных водотоков имеют сравнительно небольшой базис эрозии.

Обычно скважины оборудуются на наиболее детально изучаемых малых водосборах в верхних, средних и нижних частях склонов (в зонах питания, транзита и разгрузки грунтовых вод), на маршрутах съемок. При этом желательно иметь «кусты» скважин, то есть по створам при одномерном движении, «треугольником» или «конвертом» для расчета потоков при двумерном движении. При этом иметь скважины на верхний, часто не имеющий сплошного распространения или пересыхающий водоносный горизонт, и на постоянно действующий горизонт грунтовых вод, дренируемый основным водотоком станции устанавливаются рядом. Дополнительные скважины оборудуются также в нижней части основного водосбора вблизи замыкающего створа.

На водосборах в зоне многолетней мерзлоты весьма желательно проводить наблюдения за динамикой подземных вод в таликах.

Помимо собственно установки наблюдательных скважин необходимо проведение специальных работ по определению водно-физических свойств грунтов, как в зоне аэрации, так и в насыщенной зоне. Эта работа выполняется при бурении скважин с привлечением специалистов-гидрогеологов.

Вычисление изменений запасов грунтовых вод производится по формуле:

$$\Delta U = 10\mu\Delta H \quad (1.11),$$

где μ – коэффициент водоотдачи; ΔH – изменение уровня грунтовых вод за расчетный период, см.

Коэффициент водоотдачи определяется из соотношения:

$$\mu = \frac{\rho(W_{пв,\%} - W_{нв,\%})}{100} \quad (1.12),$$

где ρ – объемная плотность грунта; $W_{пв,\%}$ и $W_{нв,\%}$ – полная и наименьшая влагоемкость в процентах от веса грунта. При этом следует учитывать, что полная влагоемкость должна быть уменьшена на 12 – 18% за счет пространства, занятого защемленным воздухом [Водогрецкий и Крестовский, 1975]. Недоучет этой характеристики может привести к завышению величины коэффициента водоотдачи.

Наблюдения за уровнями воды в скважинах производятся хлопущкой или водяным свистком, закрепленным на мерной ленте. Температура воды измеряется водным термометром в нижней части фильтра. Особое внимание должно уделяться

своевременной очистке фильтров скважин и контролю отметки верха трубы (приводки). В настоящее время существуют компактные уровнемеры в комплекте с термодатчиками, позволяющие автоматизировать процесс наблюдений, что не исключает необходимости периодического ручного контроля показаний уровнемера.

На отклонение уровня воды, измеренного в скважине, от истинного значения уровня воды водоносного горизонта определенное влияние оказывает атмосферное давление [Лавров, Марков, 2018], воздействие которого зависит также от диаметра трубы скважины. Этот вопрос требует дополнительной методической проработки.

Наблюдения за промерзанием и оттаиванием почвы, и ее температурой осуществляются с помощью мерзлотомеров Данилина и почвенно-вытяжных термометров, соответственно.

Мерзлотомеры устанавливаются на метеоплощадке и на водосборах, где они обычно совмещаются с пунктами определения влажности почвы. Процедура зарядки и установки мерзлотомеров весьма подробно изложена в «Руководстве воднобалансовым станциям». Единственно, что хотелось бы добавить, это необходимость проверки заряженных мерзлотомеров на течь перед их установкой. Качество выпускаемых в последние годы мерзлотомеров снизилось из-за применения более жесткой резины, вследствие чего трубка с водой имеет небольшие изгибы по длине. Погрешность измерения глубины промерзания мерзлотомерами составляет 10 – 15% (5 – 10 см) [Вершинина, Крестовский, 1980].

Почвенно-вытяжные термометры (ПВТ) обычно устанавливаются только на метеоплощадке. В настоящее время они могут быть заменены на автоматизированную систему типа АМТ, которая имеет ряд преимуществ в эксплуатации. Однако там, где продолжают эксплуатироваться ПВТ старого образца, следует тщательно следить за состоянием войлочных прокладок на штоках, предотвращающих циркуляцию воздуха внутри кожуха (трубы). При истирании или утрате этих прокладок показания будут сильно искажены.

Помимо приборов и оборудования, обеспечивающих наблюдения за элементами водного баланса и определяющими их факторами, следует упомянуть *вспомогательное оборудование*, которое используется при производстве гидрологических работ. В частности, современные геодезические приборы и средства пространственного позиционирования, средства дистанционных наблюдений (квадрокоптеры, видеокамеры) могут заметно облегчить целый ряд видов сопутствующих работ.

Резюмируя сказанное выше, следует сделать несколько замечаний. Во-первых, несмотря на очевидные успехи мирового гидрометеорологического приборостроения, доля ручных гидрологических наблюдений и работ при проведении воднобалансовых наблюдений остается очень большой даже в условиях применения максимально возможного количества современных наблюдательных комплексов. Значительная их часть пока частично или полностью не автоматизирована

(наблюдения за испарением со снега, снегосъемки, влагосъемки, наблюдения за промерзанием и оттаиванием почво-грунтов и определение их водно-физических характеристик и др.). Не автоматизированы в России и наблюдения за испарением с поверхности почвы, хотя при неглубоком залегании уровня грунтовых вод это можно сделать с помощью лизиметров, установленных на весах, что требует значительных затрат. Однако принципиально важным является то, что многие автоматизированные виды наблюдений должны контролироваться с помощью ручных наблюдений.

Во-вторых, ряд наблюдений, касающихся, прежде всего, измерений влагозапасов в почво-грунтах и определения их водно-физических характеристик, требует дальнейшей научно-методической работы.

Наконец, персонал станций должен постоянно поддерживать и совершенствовать навыки производства полевых работ, что, с одной стороны, является гарантией надлежащего качества и достоверности получаемых материалов, а с другой – сохраняет более тесную связь человека с природой и теми явлениями, которые он наблюдает. Это в не меньшей степени относится и к исследователям, поскольку их отрыв от предмета изучения, которым являются природные объекты, ведет к схоластическим «кабинетным» играм с цифровыми рядами данных наблюдений, в результате чего полученные выводы могут не вполне соответствовать реально происходящим процессам.

1.5 О модернизации наблюдений на воднобалансовых станциях

Модернизация наблюдений на воднобалансовых станциях, как и вообще на гидрометеорологической сети в целом, неизбежный, необходимый и необратимый процесс в ходе совершенствования методов и средств измерений. Наиболее важной особенностью современного этапа, по-видимому, является общемировая тенденция перехода на цифровые технологии с возможностью при необходимости передачи информации в режиме реального времени. Переход на «цифру» позволяет также усовершенствовать систему сбора и обработки информации.

Однако следует в первую очередь определиться с термином «модернизация» и ее эффективностью применительно к производству наблюдений на репрезентативных и экспериментальных водосборах с учетом того факта, что большая часть комплекса наблюдений по-прежнему полностью или частично осуществляется в ручном режиме.

В обычном, «узком» понимании «модернизация» заключается в механической замене устаревших технологий и оборудования на более совершенные приборы и соответствующие им методы применения. В отношении гидрометеорологических

наблюдений на воднобалансовых станциях модернизация в «широком» смысле помимо этого должна обеспечивать полноту получаемой информации и сохранение однородности рядов наблюдений.

Однородность достигается неизменностью или *подтвержденной* преемственностью методов и средств измерений, что может быть определено только в ходе производства параллельных наблюдений в течение не менее двух-трех лет. Другими причинами модернизации являются потребность в автоматизации, когда пункт наблюдений необходим, но наблюдателя просто нет или данные могут быть получены без постоянного участия человека при сохранении непрерывности и удовлетворительного качества наблюдений.

Неизменность методов и средств измерений при модернизации безусловно сохраняется для тех видов наблюдений, которые не имеют альтернативы (по крайней мере в настоящее время) и производятся в ручном режиме с использованием средств и методов, действующих на протяжении десятилетий. К ним относятся полевые наблюдения за влагозапасами в почве гравиметрическим способом, определение водно-физических характеристик почво-грунтов, наблюдения за запасами воды в снеге, испарением с поверхности снега и почвы (в случае применения взвешиваемых испарителей), промерзанием и оттаиванием почвы. В этих случаях предполагается простая замена обветшавшего оборудования на такое же новое.

Некоторые виды наблюдений (за уровнями и стоком воды, атмосферными осадками, уровнями грунтовых вод) могут быть частично модернизированы с применением нового оборудования. К нему относятся различные типы уровнемеров и осадкомеров, устройства для измерения скорости потока воды, автоматизированная система измерения изменения уровня воды в водных испарителях. Для этих видов наблюдений модернизация заключается в комбинированной замене части устаревших типов приборов на новые, в сочетании со старыми модификациями. К примеру, собственно испаритель ГГИ-3000 или испаритель ГГИ-3000 ТМ сохраняется в неизменном виде, но дополняется автоматизированной системой уровнемера с термодатчиком, установленной в испарителе, и системой метеодатчиков (датчик осадков, анемометр).

Необходимо иметь в виду, что при установке нового оборудования, к сожалению, нередко снижается точность измерений, которая вынудила понизить для некоторых видов уровнемеров допустимую погрешность измерения изменения уровня с 1 см до 2 – 4 см. Некоторые виды работ могут также быть облегчены за счет применения современного оборудования. В частности, ручные лебедки на почвенно-испарительных площадках могут быть заменены на электрические, а лабораторное оборудование для обработки проб почво-грунтов – заменено на более совершенное, включая весы и программируемые сушильные шкафы.

Наиболее высокая степень автоматизации возможна при проведении метеорологических наблюдений. Однако комплекс наблюдений на метеостанциях ВБС также требует присутствия наблюдателей, не говоря уже о том, что они в ручном режиме выполняют актинометрические и теплобалансовые наблюдения. Применение автоматизированных актинометрических систем измерений на сети, помимо высокой стоимости, нередко вызывает большие проблемы с их эксплуатацией и обслуживанием. В результате на какой-то период приходится использовать менее совершенное оборудование.

При этом все новые измерительные устройства должны пройти этап опытной эксплуатации для установления возможности их применения в условиях России и подготовки соответствующих методических рекомендаций по работе с ними. Несоблюдение этого может иметь самые печальные последствия, что показывает современный опыт эксплуатации различных видов уровнемеров на части постов стандартной гидрометрической сети.

Еще один нюанс в модернизации ВБС заключается в том, что дорогостоящее оборудование типа весовых осадкомеров может устанавливаться только на безопасных территориях с хорошим контролем (например, на метеоплощадке). Поэтому часть наблюдательных пунктов по-прежнему должна оснащаться простейшими приборами типа осадкомеров О-1 и пока еще действующих плювиографов П-2, и т.п.

Таким образом, полноценный переход на «цифру» на воднобалансовых станциях в настоящее время возможен только частично, и касается он только наблюдений за изменением уровней (напоров) воды на гидростворах, в скважинах грунтовых вод и водных испарителях, части метеорологической и актинометрической информации, данных о температуре в различных средах и, частично, об осадках. Вся остальная информация для дальнейшей обработки и анализа должна вводиться в ручном режиме.

Специфика модернизации воднобалансовых станций в «широком» смысле, помимо их технического переоснащения, требует воссоздания требуемого состава объектов (репрезентативных водосборов разного порядка) и полного комплекса наблюдений на них. Иначе поставленная задача не будет решена.

Следует еще раз подчеркнуть, что, по нашему мнению, главным критерием экономической эффективности модернизации является достижение поставленной цели, то есть получение достоверной и полной гидрометеорологической информации с сохранением однородности рядов наблюдений. Стоимость новых приборов и расходы на их техническое обслуживание до такой степени несоизмеримы с затратами на персонал в России, что маниакальное стремление чиновников полностью заменить человека автоматом в ходе «модернизации» из соображений копеечной

экономии ведет к элементарному снижению качества и полноты информации, а часто и к полной их утрате.

Поэтому необходимо соблюдать разумный баланс автоматизации с сохранением квалифицированных кадров, способных обеспечивать контроль получаемой на автоматизированных постах информации, проводить необходимые «ручные» наблюдения и первичный анализ данных, включая расчеты водных балансов водосборов за гидрологические годы, сезоны и генетические периоды.

1.6 Комплектование персонала воднобалансовых станций

Комплектование штата воднобалансовых станций – одна из важнейших задач. Она остается краеугольным камнем их успешной работы. Д. Л. Соколовский еще в 1933 году писал, что «обеспечение кадрами высококвалифицированных специалистов, по нашему мнению, может быть проведено в жизнь лишь при том условии, если, начиная со 2-го курса, часть студентов гидрологических ВУЗ'ов будет закреплена за станциями и летнюю практику будет проводить исключительно на них» [Соколовский, 1933]. В той же статье он приводит типовое штатное расписание балансовой станции (таблица 1.7).

Таблица 1.7 – Типовое штатное расписание балансовой станции (1933 г.)

№№ п/п	Должность	Количество
1	Заведующий станции - гидролог	1
2	Помощник заведующего станции. - метеоролог	1
3	Научный сотрудник 1 разряд - гидрогеолог	1
4	Ст. техник - гидрометр	1
5	Заведующий хозяйством	1
6	Старший счетовод, он же делопроизводитель	1
7	Техник	1
8	Наблюдатели	3
9	Лаборант	1
10	Рабочие при хоз. части (посыльные, разные мелкие работы)	2
11	Рабочие для полевых работ	3
12	Наблюдатели на водостоках	10
13	Конюх	1

Таким образом, в 1930-х годах типовой штат станции включал 27 человек. Абстрагируясь от экзотических для нашего времени должностей, следует признать, что это примерно соответствует оптимальному количественному штату станции

и в наше время, с учетом более сложной и насыщенной программы наблюдений. Обращает на себя наличие в типовом штате специалистов смежных с гидрологией областей наук о земле – метеорологии и гидрогеологии.

Практика студентов на станциях по-прежнему проводится, но в последние годы она зачастую имеет ознакомительный характер и нередко ограничивается рассказом «на пальцах», без производства практических работ. Ценность такой «практики» очень невелика.

В Международном руководстве [Репрезентативные и экспериментальные бассейны, 1971] отмечается, что наблюдениями «должен руководить опытный гидролог, знакомый со всеми вопросами, которые трудно поддаются инструментальным измерениям». В состав станции должны входить специалисты-гидрологи (научные работники или инженеры), техники, имеющие специальное образование и подготовленные наблюдатели. В этом же издании приведена таблица необходимого для обеспечения наблюдений на репрезентативных водосборах штата сотрудников, принятого в бывшем СССР, для водосборов разной площади и с разной степенью сложности программы наблюдений. Минимальное количество составляет 1 техник и 2 – 3 наблюдателя на водосбор. При этом на каждой станции помимо гидрологической группы должна быть метеогруппа, осуществляющая наблюдения за метеоэлементами, радиационным и тепловым балансом.

Снижение численного состава персонала станции за счет автоматизации (без уменьшения программы наблюдений и снижения их качества) не может быть значительным, поскольку, как отмечалось выше, доля «ручных» наблюдений и работ по-прежнему высока. Например, бригада из 2-х человек за день работы при влагосъемке может сделать 12 – 15 скважин в талой почве и 8 – в мерзлой [Водогрецкий и Крестовский, 1975]. А на одном малом водосборе число таких скважин составляет 18 – 20.

Рекомендуемое соотношение научного (инженерного) и младшего персонала составляет 1:3. В отечественной практике такое соотношение никогда не выдерживалось. Однако это всегда компенсировалось активным участием в работе станций научных сотрудников ГГИ, Гидрометцентра и региональных институтов. В штате некоторых станций были научные сотрудники, такие как В. С. Дыгало на Подмосковной ВБС и А. М. Горчаков на Приморской ВБС, не говоря уже о сотрудниках Валдайской и Богуславской научно-исследовательских гидрологических лабораторий.

Современное состояние дел с персоналом воднобалансовых станций назвать иначе, чем чрезвычайное трудно. Зачастую это штат, который может поддерживать только необходимый минимум работ, сохраняющий часть объектов и пунктов наблюдений в рабочем состоянии.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ ВЛАГООБОРОТА ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НА ВОДНОБАЛАНСОВЫХ СТАНЦИЯХ

2.1 Общие положения

Мониторинг гидрометеорологического состояния окружающей среды является одним из основных направлений деятельности Гидрометслужбы. Неотъемлемой частью этой комплексной задачи является мониторинг водных объектов, в числе целей которого, согласно Положению о нем, является информационное обеспечение управления в области использования и охраны водных объектов. То есть на основании данных мониторинга, помимо контроля текущей ситуации, выявляются процессы и явления, которые должны быть учтены при разработке мер по адаптации всего социально-экономического комплекса к современному и прогнозируемому состоянию гидрологического режима в различных физико-географических зонах.

Контроль гидрологического режима в системе Росгидромета осуществляется на основе данных наблюдений стандартной и специализированной сетей станций и постов. Стандартная гидрометрическая сеть обеспечивает получение информации об уровнях и стоке воды, ее качестве, температуре и ледовых явлениях, причем в подавляющем большинстве случаев на средних и крупных реках. Данные об осадках и запасах воды в снеге поступают с сети метеорологических станций и постов. Информацию о пространственно-временных характеристиках других элементов водного баланса призвана давать специализированная агрометеорологическая и испарительная сеть. Однако весь комплекс доступных в настоящее время наблюдений за составляющими водного баланса и определяющими их факторами сосредоточен только на воднобалансовых станциях, которые должны обеспечивать информационную базу для анализа причин и следствий изменений процессов влагооборота во всей его цепи.

Идея необходимости использования малых исследовательских водосборов для мониторинга гидрологического режима была выдвинута уже достаточно давно. Такие бассейны, как упоминалось выше, были выделены в отдельный класс реперных водосборов [Репрезентативные и экспериментальные бассейны, 1971; Linsley, 1975 и др.]. Однако широкого распространения в мировой практике они не получили,

скорее всего ввиду сложности сохранения неизменного состояния водосборов в отношении землепользования, естественных изменений ландшафтов и дороговизны содержания, хотя на некоторых таких водосборах наблюдения проводились в течение нескольких десятилетий, в том числе при отсутствии антропогенных воздействий.

В пространственных масштабах природных физико-географических зон воднобалансовые станции представляют собой «точки», причем в современных условиях для каждой из основных природных зон ЕТР имеется всего одна такая «точка». Поэтому количественные величины составляющих водного баланса и определяющих их факторов, полученные в результате наблюдений ВБС, должны соотноситься с данными стандартной и специализированной гидрометеорологической сети. Основной задачей воднобалансовых станций в системе мониторинга природной среды является получение информации, необходимой для выявления изменения доминирующих процессов формирования влагооборота в различных климатических условиях и при различных антропогенных нагрузках на водосборы рек.

Мониторинг окружающей среды первоначально был определен как «система повторных наблюдений элементов окружающей природной среды в пространстве и во времени с определенными целями и в соответствии с заранее подготовленной программой» [Munn, 1973]. Позднее определение мониторинга окружающей среды в отечественной практике было дополнено процедурой оценки ее фактического и прогнозируемого состояния [Израэль, 1974]. Применительно к водным объектам мониторинг, согласно упомянутому Положению, «представляет собой систему наблюдений, оценки и прогноза изменений» их состояния. При этом Гидрометслужба отвечает за мониторинг поверхностных водных объектов, хотя их режим тесно связан с питающими их грунтовыми и подземными водами преимущественно верхних горизонтов, ответственность за мониторинг которых формально возложена на Роснедра. Состояние водных объектов также неразрывно связано с их водосборами и процессами влагооборота на них, зависящими от землепользования и климатических изменений.

В 1970 – 1980-е годы основное внимание было уделено мониторингу последствий антропогенных воздействий, таких как различные агротехнические мероприятия, формирование защитных лесонасаждений в степной зоне, урбанизация, воздействие добывающих отраслей и т.п. В качестве примера обобщений антропогенных воздействий на водный режим малых рек с использованием материалов наблюдений воднобалансовых станций можно привести работы В. Е. Водогрецкого и Н. И. Коронкевича [Водогрецкий, 1979, 1990; Коронкевич, 1973, 1990]. В последние десятилетия на первый план вышел мониторинг изменений окружающей среды под воздействием изменений климата, которые оказывают макромасштабное воздействие на весь природный комплекс, в том числе и на гидрологический режим.

Прогноз состояния окружающей среды, связанный с долговременными изменениями климата, основывается на оценке трендов климатической ситуации с применением моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), которые учитывают рост эмиссии парниковых газов. Выводы, получаемые на основе этих моделей, слишком неоднозначны и требуют «глобальных» подходов, что выходит за рамки данной работы. Поэтому мы ограничиваемся анализом текущего состояния гидрологического режима и наблюдаемыми изменениями в системе влагооборота на ЕТР, где воднобалансовые станции, хотя и в ограниченном масштабе продолжают вести наблюдения за метеорологическими характеристиками и отдельными составляющими водного баланса.

На европейской территории России значительные климатические изменения начали происходить с конца 1970-х годов, после чего установился современный климатический фон [IPCC, 2007; Второй оценочный доклад, 2014; Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год, 2021], что повлекло за собой смену предшествующего условно стационарного периода гидрологического режима современным состоянием режима стока воды. Соответственно, началось изменение всей системы влагооборота и доминирующих процессов формирования стока.

Оценке изменений режима стока воды на больших и средних реках России в целом и по отдельным регионам, бассейнам крупных рек и их основных притоков в последние годы посвящено большое количество работ [Водные ресурсы России ..., 2008; Георгиевский, 2015; Джамалов и др., 2017; Бабкин, 2017, и др.; Основные гидрологические характеристики рек ..., 2015; Основные гидрологические характеристики водных объектов ..., 2021]. Общее направление этих важных и полезных работ заключается в первую очередь в определении современного состояния ресурсов поверхностных вод в целом по большим регионам и бассейнам крупнейших рек, анализе изменений их внутригодового распределения и прогнозе изменений на перспективу. Однако такой «валовый» подход является необходимым, но недостаточным для полноценного мониторинга гидрологического режима в силу ряда причин.

Во-первых, из рассмотрения «выпадает» целый класс водотоков, а именно малые реки с площадями водосборов вплоть до 2 – 5 тыс. км² и более (в том числе и значительная часть средних рек), которые составляют большинство (более 80%) всех рек России. Их водные ресурсы не менее существенны для водообеспечения тысяч конкретных объектов, так же, как и для водоотведения сточных вод с них. Кроме того, малые реки играют важную роль в природной системе в качестве одного из основных компонентов окружающей среды.

Во-вторых, такой односторонний подход не раскрывает механизмы изменений гидрологического режима во всей цепи влагооборота, понимание которых

необходимо при разработке мероприятий по адаптации водохозяйственного и природного комплексов к текущим и прогнозируемым изменениям климата. И, наконец, мониторинг водного режима подразумевает выявление опасных и неблагоприятных гидрологических явлений, возникающих в процессе изменений влагооборота, как на реках, так и на их водосборах.

В качестве примера двойственной ситуации с оценкой «валовых» и местных водных ресурсов, можно привести данные упомянутого выше «Второго оценочного доклада Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации» в сопоставлении с конкретной ситуацией на малых и даже средних реках.

Так, в отношении «валовой» ситуации в докладе сделаны следующие выводы: «На территории России ... доминирующей тенденцией изменения годового стока рек является его увеличение. В 1981 – 2012 гг. по отношению к среднему уровню за период 1936 – 1980 гг. оно составило около 5%.... В ближайшие десятилетия нет оснований ожидать каких-либо значительных изменений годового стока основных рек России в результате изменения климата. Для большей части территории страны наиболее вероятно незначительное (в пределах 5%) увеличение годового стока, что находится в пределах его естественной изменчивости. Как показывают модельные расчеты, проведенные в рамках современных представлений о будущем климате в XXI в., водный режим рек России в ближайшие два десятилетия по своим основным параметрам будет близким к наблюдавшемуся в последние 30 – 35 лет. Ожидаемое повышение температуры воздуха зимой позволяет полагать, что наблюдающийся увеличенный зимний сток рек сохранится и в ближайшие два-три десятилетия. При этом относительная доля весеннего стока в годовом стоке будет уменьшаться».

Таким образом, по «валовым» показателям дефицита воды в России в целом не ожидается. Даже для такого сложного с точки зрения водообеспеченности бассейна, как бассейн р. Дон, значительная часть которого расположена в полуаридной и аридной зонах ЕТР, по оценкам ряда авторов [Георгиади, Милюкова, 2012; Джамалов и др., 2017] больших проблем при правильном режиме регулирования водопотребления возникать не должно.

Между тем снижение уровня воды в р. Оке в районе г. Калуги в последние годы приводило к временному нарушению работы водозабора поверхностных вод. На западе Тверской области уровень в реке Межа падал ниже среднемноголетних значений на 0,9 м. На полигоне «Малая Истра» расход воды в р. Малая Истра в межень снижался до минимальных за период наблюдений значений, а в верховьях малых рек сток воды отсутствовал. По данным Курского комитета водных ресурсов в период максимального падения уровня воды в р. Сейм в районе г. Курска, которое составляло 0,83 м, наблюдалось заметное понижение уровня воды в колодцах, так как существует прямая гидравлическая связь верхних водоносных

горизонтов с поверхностными водами. И таких примеров можно привести достаточно много, причем ситуация с дефицитом воды в отдельные достаточно продолжительные периоды наблюдается даже в регионах зоны избыточного увлажнения, например, на Северо-Западе ЕТР, что отмечено в [Журавин, Марков, 2019].

В то же время и в зоне достаточного увлажнения, и в полуаридной зоне отмечались случаи очень высокого весеннего, дождевого и годового стока на малых реках и водотоках, не наблюдавшиеся ранее.

Изменения гидрологического режима под воздействием многолетних колебаний климата взаимосвязаны и происходят во всей цепи влагооборота в системе водосбора. Поэтому для взаимоувязанного анализа изменений в этой цепи целесообразно рассматривать полный комплекс причинно-следственных связей от климатических изменений до результирующих их изменений всех составляющих водного баланса и факторов их определяющих по каждой зональной ВБС.

Воднобалансовые станции на ЕТР, как было отмечено выше, располагаются по зональному физико-географическому принципу с севера на юг в полосе между 33° и 41° в.д., охватывая последовательно зоны южной европейской тайги, смешанных лесов, лесостепную и степную зоны. Это позволяет, при условии проведения полноценных наблюдений на станциях, осуществлять мониторинг влагооборота этой обширной и наиболее густо населенной части территории России.

Необходимо отметить, что хотя ВБС Каменная Степь находится на границе лесостепной и степной зон, но по количеству годовых сумм осадков и средним годовым температурам воздуха она в наибольшей степени соответствует степной зоне, что отмечено в издании «Агроклиматические ресурсы Воронежской области» [Агроклиматические ресурсы, 1972].

2.2 Изменения основных климатических характеристик на воднобалансовых станциях

Основными климатическими показателями являются температура воздуха и атмосферные осадки. Именно эти показатели в первую очередь характеризуют климатический фон массо- и теплообмена на водосборах и характеризуют параметры внешних воздействий на них. В разной степени на влагооборот влияет вся метеорологическая обстановка, в том числе радиационный и тепловой баланс, ветровой режим, дефицит влажности воздуха и состояние облачности, которые в значительной мере определяют режим испарения и транспирации, изменения атмосферного давления и т.д.

Температура воздуха в пунктах размещения воднобалансовых станций претерпела изменения, характерные для соответствующих природных зон центра ЕТР.

На *рисунке 2.1* показаны многолетние изменения средней годовой температуры воздуха по данным наблюдений метеорологических станций ВБС. Они вполне адекватно характеризуют изменения температурного режима физико-географических зон, в которых станции расположены.

Материалы наблюдений свидетельствуют, что после относительно стабильного периода колебаний средней годовой температуры воздуха до середины – конца 1970-х годов повсеместно начинается ее рост. На станциях зоны избыточного и достаточного увлажнения средние годовые температуры воздуха, после резкого потепления к 1988 – 1990 годам, несколько замедлили свой рост (ВФ ГГИ *рисунк 2.1а*, ПВБС *рисунк 2.1б*, соответственно). В среднем в районе Валдая и Подмосковной ВБС годовая температура воздуха возросла за период с начала 1950-х годов до середины 2010-х годов на 1,2 – 1,4°C и, в соответствии с климатическими прогнозами, можно ожидать ее дальнейшее увеличение.

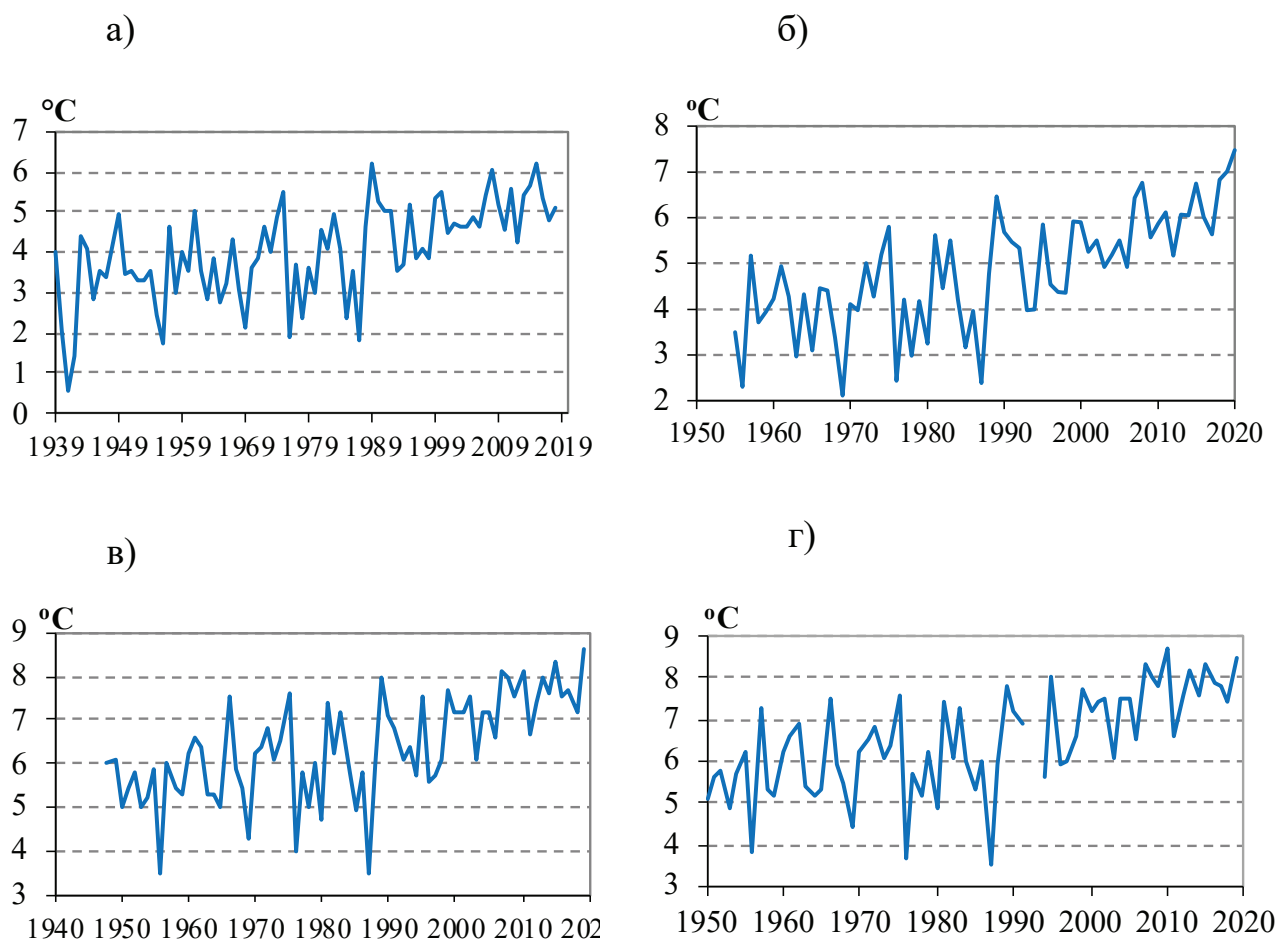


Рисунок 2.1. Многолетние изменения средней годовой температуры воздуха по данным наблюдений ВФ ГГИ (а, зона южной европейской тайги), Подмосковной ВБС (б, зона смешанных лесов), Нижнедевицкой ВБС (в, лесостепная зона) и ВБС Каменная Степь (г, степная зона)

В лесостепной и степной зонах сложилась более сложная ситуация. Здесь также после 1977 года происходил постепенный рост средних годовых температур воздуха (Нижнедевицкая ВБС – лесостепная зона, ВБС Каменная Степь – степная зона, рисунок 2.1в и 2.1г, соответственно). В ряду наблюдений в этот период выделяется 1987 год, когда наблюдалась исключительно суровая для этих природных зон зима, лишь ненамного уступающая самой холодной за период наблюдений зиме 1942 года.

Относительная стабилизация температурного режима произошла здесь только с начала 2000-х годов, когда средние годовые температуры воздуха не опускались ниже 6°C. Однако постепенный рост температуры воздуха в полуаридной зоне сохранялся и в последнее десятилетие величина их средних годовых величин превышала уровень периода 1950 – 1977 годов уже на 2 – 2,2°C. При этом средняя годовая температура воздуха достигла величины 7,5 – 7,8°C.

Само по себе изменение средней годовой температуры воздуха, хотя и показательно для выявления долговременных периодов с разным характером температурного режима, но с точки зрения развития процессов влагооборота не столь важно, как изменение внутригодового распределения температуры, причем не только сезонного, но и внутри сезонного.

Средняя месячная температура воздуха в районах ВФ ГГИ и ПВБС возросла практически во все месяцы года. В качестве примера на рисунке 2.2 приведены средние месячные температуры воздуха по данным наблюдений на метеостанции ВФ ГГИ, осредненные за периоды 1939 – 1977 и 1978 – 2017 годы. В климатологических исследованиях принято подобные изменения температуры воздуха рассматривать в величинах отклонений от нормы (аномалий), но для целей гидрологического анализа важнее абсолютные величины, поскольку они лучше отражают воздействие температурного фактора на криогенный режим почво-грунтов, режим снегонакопления и снеготаяния, ледовый режим водных объектов.

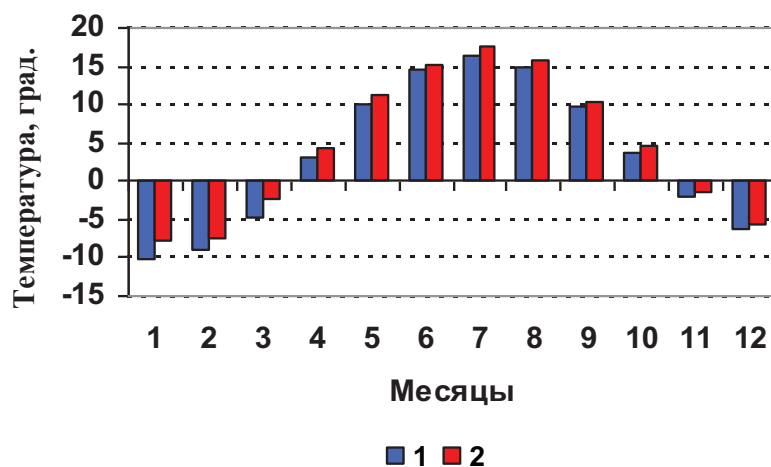


Рисунок 2.2. Месячные температуры воздуха по данным наблюдений на метеостанции ВФ ГГИ, осредненные за периоды 1939 – 1977 (1) и 1978 – 2017 (2) годы

Следует отметить, что средние месячные температуры воздуха теплого периода на станциях лесной зоны были в среднем ниже, чем в 1950 – 1970-е годы, вплоть до 2008 года. Наиболее значительный рост температуры воздуха произошел здесь в январе – феврале и марте, причем средние месячные величины температур воздуха в марте в районе ПВБС в последнее десятилетие приближаются к нулевой отметке.

Для зон южной европейской тайги и смешанных лесов ЕТР, как и для основной части территории России, где в годовом цикле по-прежнему преобладает снеговое питание рек, а наиболее многоводной фазой стока является весеннее половодье, зимне-весенний температурный режим играет особую роль. Изменение зимнего и весеннего температурного режима выражается, прежде всего, в количестве и продолжительности оттепелей и означает изменение режима снегонакопления и снеготаяния, а также увлажнения, промерзания и оттаивания почво-грунтов, которые определяют процессы формирования объемов весеннего половодья [Вершинина и др., 1985]. Температурный режим также определяет продолжительность периодов испарения с поверхности воды и почвы в течение года.

На рисунке 2.3 представлено изменение по годам количества оттепельных дней (т.е. дней со средней суточной температурой воздуха от 0°C и выше) на ПВБС в зимний период с 1956 по 2009 год. Как видно из приведенного графика, среднее количество оттепельных дней возросло с 7-ми – 9-ти в 1950-е – 1970-е годы до 15-ти – 18-ти в 2000-е годы, хотя в отдельные годы по-прежнему возможны холодные зимы без оттепелей. При этом в первый период оттепели были преимущественно кратковременными, продолжительностью 1-2 дня, а в последние десятилетия серии оттепельных дней имеют продолжительность 4-7 дней и более, что приводит к формированию внутриводного стока и зимних паводков, о чем будет сказано ниже.

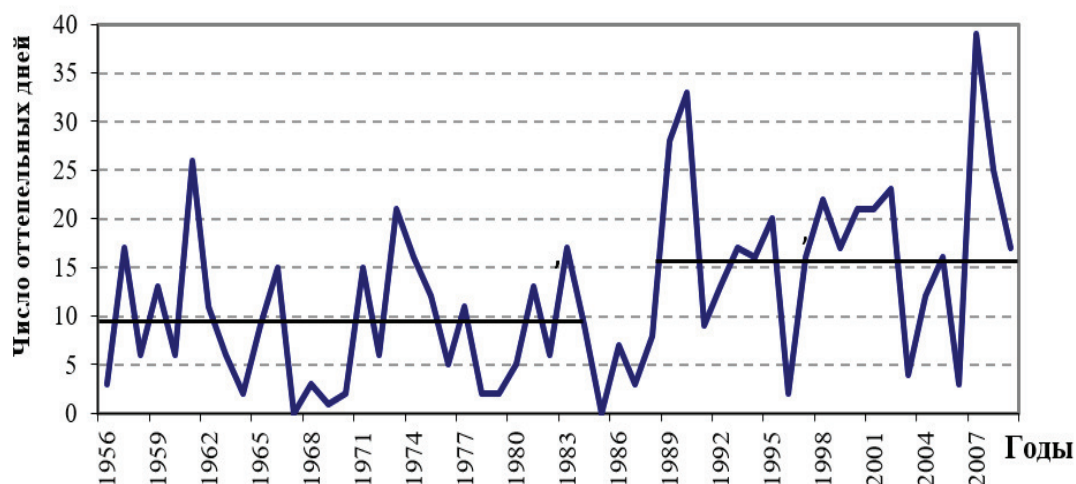


Рисунок 2.3. Изменение по годам количества оттепельных дней на ПВБС в зимний период (декабрь – февраль) с 1956 по 2009 год

Представляет интерес также изменение температурного режима в марте, который в период наблюдений до 1980 года в Подмосковье фактически являлся холодным месяцем со средней за период 1946 – 1980 годы температурой воздуха $-4,1^{\circ}\text{C}$, что лишь незначительно выше средней за этот период температуры декабря ($-6,5^{\circ}\text{C}$). В последние десятилетия средняя температура марта повысилась здесь до -2°C – -1°C . Продолжительность оттепелей в марте достигала 10 – 15 дней и более, хотя в отдельные годы, как например в 1996 и 2005 годах, средняя суточная температура воздуха марта оставалась в области отрицательных значений в течение всего месяца, так же как наблюдались положительные средние суточные температуры воздуха практически в течение всего месяца (2007 год).

Средняя месячная температура воздуха на воднобалансовых станциях, расположенных в полуаридных зонах европейской территории России претерпела аналогичные изменения. В качестве примера на *рисунке 2.4* приведены средние месячные температуры воздуха по данным наблюдений на метеостанции ВБС Каменная Степь за периоды 1929 – 1977 и 1978 – 2017 годы. Следует отметить, что наибольшее повышение температур воздуха на 2 – 3°C и здесь отмечается в зимние месяцы и в марте, но оно несколько ниже, чем в лесной зоне.

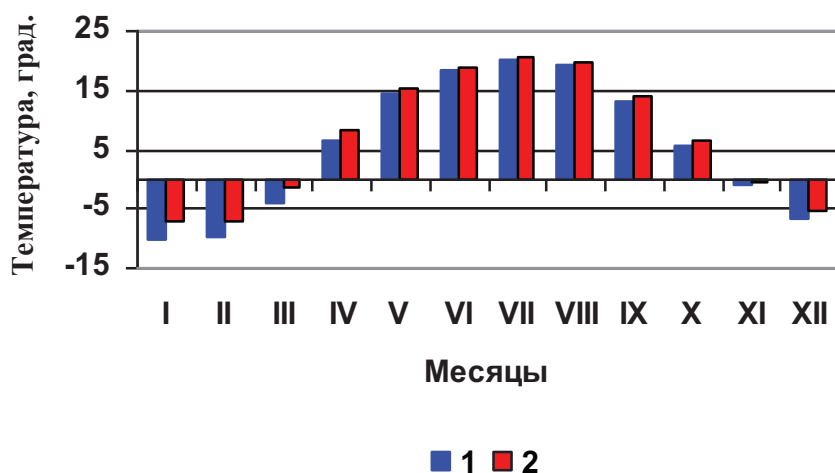


Рисунок 2.4. Месячные температуры воздуха по данным наблюдений на метеостанции ВБС Каменная Степь, осредненные за периоды 1929 – 1977 (1) и 1978 – 2016 (2) годы

Атмосферные осадки. Количество атмосферных осадков на всех воднобалансовых станциях ЕТР в последние десятилетия возросло, хотя в большинстве случаев и не так заметно как температура воздуха. Наиболее значительно увеличились годовые суммы осадков в районе Валдая, где по данным наблюдений метеостанции они за период с 1978 по 2017 год возросли в среднем на 110 мм по сравнению с 1939 – 1977 годами и на 80 мм сравнительно с 1952 – 1977 годами.

На всех остальных воднобалансовых станциях в 1980 – 2010-х годах рост осадков в среднем составил около 50 – 60 мм (рисунки 2.5). Для зоны избыточного и достаточного увлажнения это составляет 9 – 16% от первоначального периода, а для полуаридной зоны – 10 – 12%. Следует отметить, что станции расположены на возвышенностях, поэтому рост количества осадков на них несколько больше, чем на равнинных территориях. Эти результаты в целом согласуются с данными, приведенными в статье Э. Г. Богдановой с соавторами и других изданиях [Богданова и др., 2014; Доклад, 2021].

Увеличение осадков повсеместно произошло преимущественно в холодный период года. Поэтому, даже при заметном снижении запасов воды в снеге к началу весеннего половодья за счет оттепелей, общий объем формирующих его осадков (запасы воды в снеге и осадки за период половодья) в лесной зоне возрос, хотя определенное влияние на эту величину оказало увеличение продолжительности половодья (рисунки 2.6).

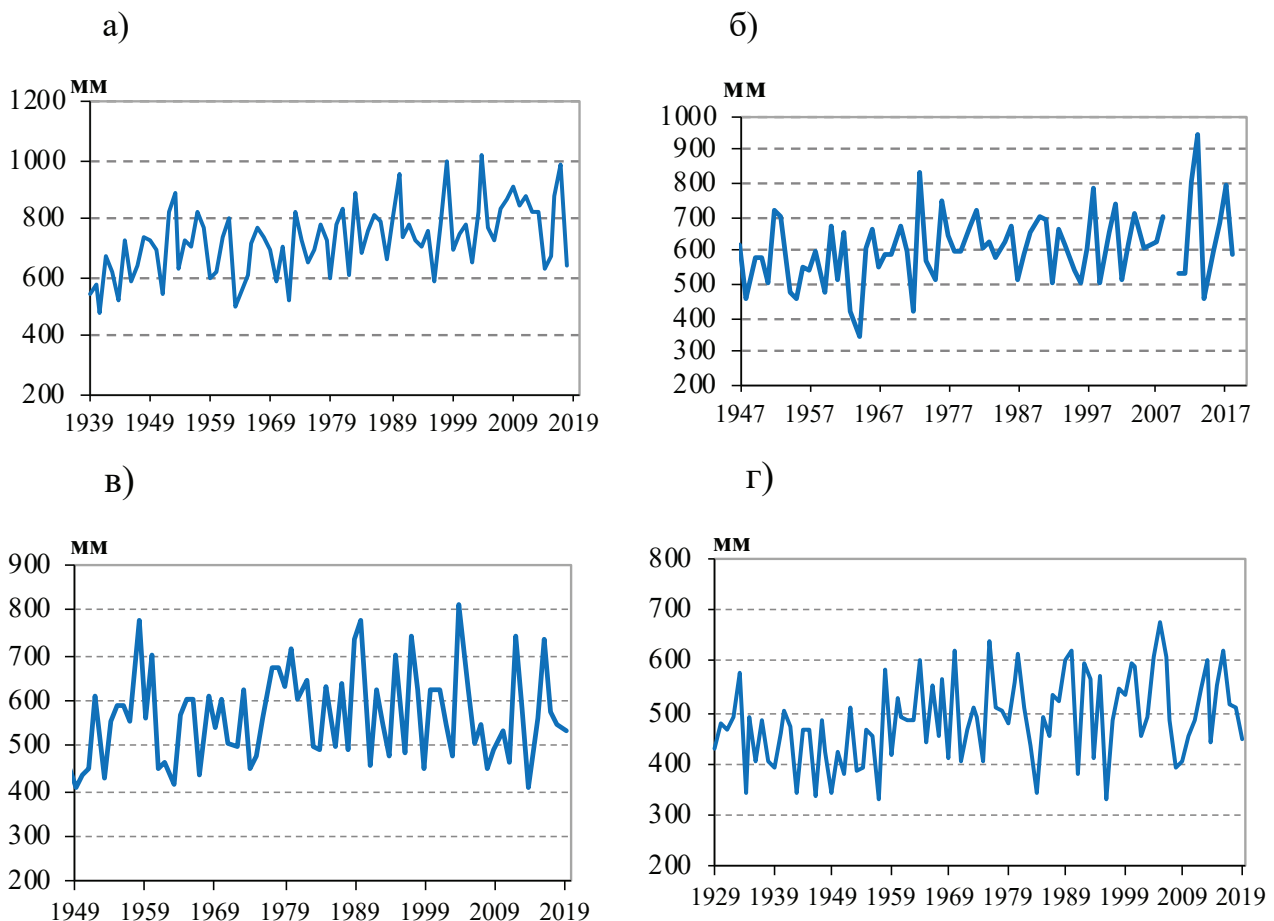


Рисунок 2.5. Многолетние изменения годовых сумм осадков (с поправкой на смачивание) по данным наблюдений на метеостанциях ВФ ГГИ (а, зона южной европейской тайги), Подмосковной ВБС (б, зона смешанных лесов), Нижнедевицкой ВБС (в, лесостепная зона) и ВБС Каменная Степь (г, степная зона)

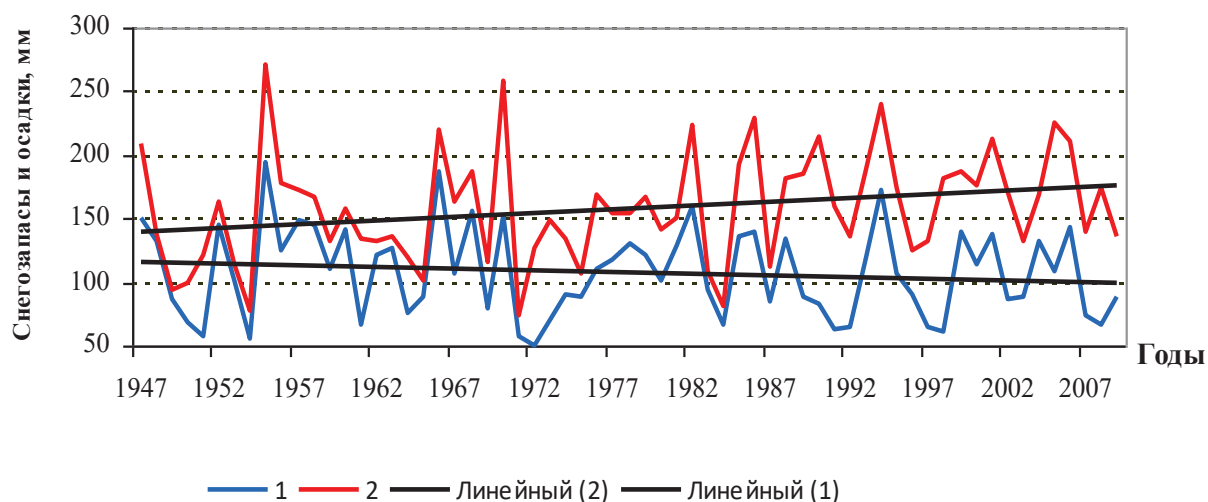


Рисунок 2.6. Изменение величин максимальных предвесенних запасов воды в снеге (1) и величин максимальных снегозапасов и осадков за период половодья (2) с 1947 по 2009 год на водосборе р. Медвенка (ПВБС)

На станциях, расположенных в лесостепной и степной зонах, наблюдается заметное увеличение изменчивости годовых сумм осадков. С одной стороны здесь участились случаи выпадения значительных величин годовых осадков (600 – 800 мм), характерных для зоны достаточного и даже избыточного увлажнения, а с другой – наблюдаются типичные для этой зоны относительно маловодные периоды продолжительностью вплоть до 4 – 5 лет с годовыми суммами осадков ниже 500 мм. К примеру, в 1996 году их сумма (здесь и далее с поправкой на смачивание) составила всего 334 мм. При этом в 2000-е годы годовые суммы осадков в полуаридной зоне не опускались ниже 400 мм.

Увеличение осадков в полуаридной зоне наблюдается в основном в осенне-зимний период. В частности, по данным метеостанции ВБС Каменная Степь количество осадков в декабре – феврале возросло в среднем с 83 мм в 1929 – 1977 годах до 108 мм в 1978 – 2017 годах. Однако осадки теплого периода здесь также существенно увеличились. При этом необходимо отметить общую тенденцию к снижению количества осадков в июле – августе. В отдельные годы (2009 и 2015 годы) суммарное количество осадков в эти месяцы составило всего 9 – 11 мм. О вероятности дальнейшего увеличения непрерывной длительности летних периодов без осадков свидетельствуют модельные расчеты, выполненные в ГГО с использованием региональных климатических моделей [Школьник и др., 2014].

Особый интерес представляют предвесенние максимальные запасы воды в снеге и осадки за период формирования половодья. Выполнить такой анализ для Нижнедевицкой ВБС не представляется возможным ввиду того, что весенний сток на малых водосборах станции, где наблюдения еще продолжаются, в последние

десятилетия практически не формировался, и, следовательно, невозможно выделить этот генетический период. Поэтому информация приведена только для ВБС Каменная Степь.

На рисунке 2.7 показаны многолетние изменения предвесенних запасов воды в снеге, количество осадков, выпавших за период половодья, и их сумма, которая определяет водоподачу на водосбор балки Степная за период половодья. Очевидно, что кардинальных изменений этих характеристик не произошло. В среднем за 1978 – 2016 год предвесенние запасы воды в снеге и осадки за период половодья снизились всего на 11 мм по сравнению с предыдущим многолетним периодом. Основной причиной снижения этой величины здесь послужило уменьшение продолжительности половодья.

Основные выводы, связанные с изменением климатической ситуации, заключаются в том, что эти изменения начали происходить с середины – конца 1970-х годов. При этом существенное повышение средних годовых температур воздуха в лесной зоне произошло в течение относительно короткого периода – в 1980-х годах, после чего интенсивность их нарастания замедлилась. В полуаридной зоне первоначальный рост средних годовых температур воздуха был замедленным вплоть до второй половины 1990-х годов. Наибольший их рост наблюдался в 2000-е годы, а в последнее десятилетие (2008-2017 годы), процесс несколько замедлился.

Годовые суммы осадков в среднем возросли на всей рассматриваемой территории в течение 10-и – 15-и лет при увеличении межгодовой изменчивости. При этом средние за последний период величины сумм годовых осадков меняются незначительно.

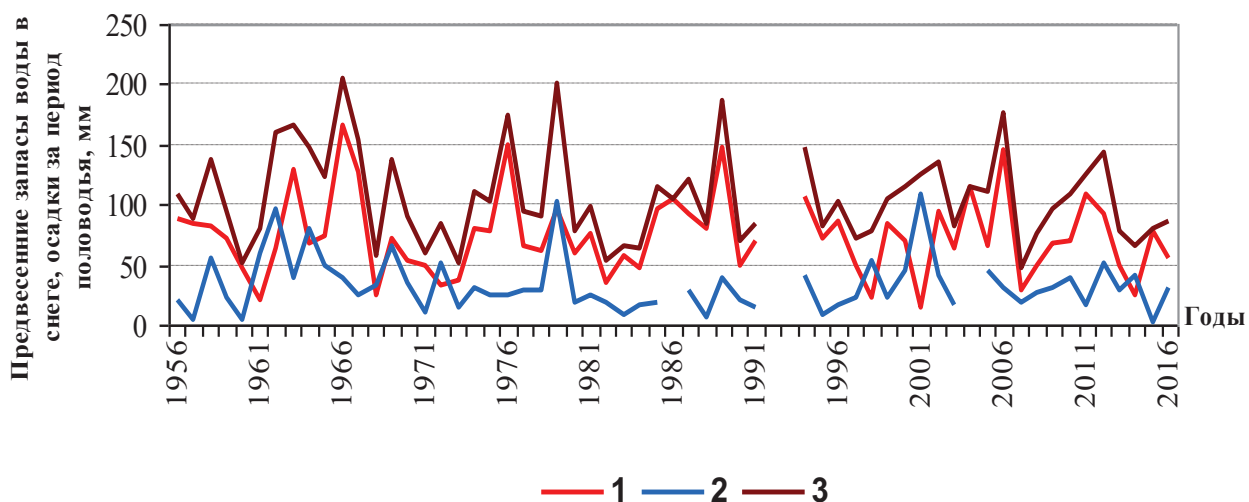


Рисунок 2.7. Многолетние изменения предвесенних запасов воды в снеге (1), количество осадков за период половодья (2) и сумма запасов воды в снеге и осадков за период половодья (3) на водосборе балки Степная (ВБС Каменная Степь)

С некоторой долей условности многолетний ход колебаний основных климатических показателей за период инструментальных наблюдений на воднобалансовых станциях можно представить в виде двух квазистационарных и переходного периодов. Представление климатических изменений в виде квазистационарных и переходного периодов является своего рода упрощением, принятым для более четкого выделения перехода от предшествующих к современным климатическим условиям. Это упрощение относится в первую очередь к изменениям температурного режима, полной стабилизации которого пока не наблюдается и, в соответствии с климатическими прогнозами, в ближайшее время не предвидится.

Гипотеза о стационарных и переходном периодах в климатических изменениях позволяет представить в таком же виде и потенциальные изменения гидрологического режима, которые уже произошли и могут произойти в перспективе в результате их воздействий. Точные границы переходного периода установить невозможно и они могут отличаться для различных регионов. В отечественной гидрологической практике начальной границей переходного периода условно был принят 1978 год. Ввиду неопределенности конечных границ переходного периода и для упрощения анализа изменений режима составляющих водного баланса и определяющих их факторов, сравнения проводились преимущественно для двух фиксированных периодов от начала наблюдений до 1977 года и с 1978 года по 2017 год (или более поздний год, в зависимости от наличия информации), хотя это нивелирует реальные изменения внутри второго временного отрезка, который включает в себя периоды как интенсивных, так и замедленных климатических изменений.

Для более детального анализа составляющих водного баланса крупных речных бассейнов ЕТР второй период (после 1977 года) некоторыми исследователями было предложено в свою очередь разделить еще на два периода. Критерием для разделения послужил индекс аридности, представляющий отношение осадков и потенциального испарения. В соответствии с многолетними изменениями этого индекса было выделено уже 3 периода – 1945 – 1977 годы, 1978 – 2002 годы и 2003 – 2015 годы, которые по мнению авторов в отношении составляющих водного баланса являются стационарными [Григорьев и др., 2018]. Такой подход, по нашему мнению, представляется правомерным, но также недостаточным.

Завершение переходного периода и стабилизация гидрологического режима зависит не только от интенсивности изменений климатических характеристик, но и от степени их влияния на формирование стока. В частности, если количество осадков напрямую влияет на увлажнение территории и ее водный баланс, то воздействие температурного фактора со временем может ослабевать или усиливаться в различных природных зонах.

Отдельно следует сделать несколько замечаний о линейных трендах и средних за отдельные периоды величинах. Их применение носит иллюстративный

характер и полезно для визуализации наблюдаемых за период инструментальных наблюдений количественных изменений отдельных климатических показателей и элементов водного баланса за период наблюдений. Рассматривать их как свидетельство полной стабилизации гидрологического режима и фактического установления нового квазистационарного периода представляется преждевременным для большинства регионов страны, о чем будет сказано ниже.

2.3 Изменения режима элементов водного баланса и определяющих их факторов

Речной бассейн относится к разряду открытых систем, которые характеризуются постоянным обменом массой и энергией с окружающей средой и обладают свойством саморегуляции, то есть стремлением к достижению такого состояния, когда устанавливается баланс между этими потоками [Chorley, Kennedy, 1971].

В результате климатических изменений возникли условия для существенного изменения режима формирования стока воды и других составляющих водного баланса. При этом перестройка во всей системе тепло- и влагооборота речных бассейнов даже небольшого размера, и достижение ею в ходе саморегуляции равновесного состояния может занимать длительный период в силу различного временного и пространственного масштаба происходящих на нем процессов. Особенно длительный период, по-видимому, требуется для перестройки в системе влагообмена поверхностных и подземных вод. Эта ситуация не позволяет на основе уже имеющихся данных наблюдений надежно и достоверно оценить вероятные тренды в процессах влагооборота без осуществления их дальнейшего мониторинга на воднобалансовых станциях.

Общие тенденции изменения климатической ситуации к потеплению и росту осадков не отменяют того факта, что на этом фоне могут иметь место отдельные годы и группы лет с холодными зимами без оттепелей или с пониженным количеством осадков.

Изменения режима поступления атмосферных осадков на водосборы воднобалансовых станций, которые являются приходной составляющей водного баланса, проанализированы в разделе 2.2. Ниже рассмотрены изменения режима основных расходных и переменных составляющих водного баланса – испарения, динамики влаги в верхнем слое аэрации, а также промерзания почвы, как одного из основных стокоформирующих факторов, определяющих слой стока весеннего половодья, уровней грунтовых вод и стока воды.

2.3.1 Изменения испарения с поверхности почвы и воды

Основными метеорологическими факторами, прямо влияющими на испарение с поверхности воды и почвы, являются ветровой режим, поступление солнечной радиации и дефицит влажности воздуха. Косвенным метеорологическим фактором воздействия на величину испарения является режим температуры воздуха, от которого зависит продолжительность этих процессов в течение года.

На испарение с почвы влияет также наличие в ней доступной для испарения влаги. В зоне избыточного и достаточного увлажнения иссушение верхних горизонтов почвы обычно происходит реже и на менее продолжительный период, чем в полуаридной зоне, но это явление наблюдается и там, о чем будет сказано ниже в разделе, посвященном изменениям режима динамики влаги в зоне аэрации.

Уменьшение средней скорости ветра в приземном слое в конце 1990-х – начале 2000-х годов отмечалось в работах Э. Г. Богдановой и А. В. Мещерской [Богданова и др., 2014; Говоркова и Павлова, 2014].

В работе [Хлебникова, Махоткина, Салль, 2014] отмечено увеличение в последние десятилетия общей облачности. Снижение поступления прямой солнечной радиации на ЕТР в этой же работе зафиксировано вплоть до 1990-го года, после чего начался ее рост. В 2000-х годах величины приходящей на земную поверхность прямой солнечной радиации стабилизировались, но не достигли уровня 1960-х годов. Современное состояние климатической ситуации на территории Российской Федерации достаточно подробно освещается в ежегодных докладах, подготавливаемых профильными институтами Росгидромета [Доклад, 2021].

В зоне достаточного и избыточного увлажнения (лесная зона) изменения испарения с почвы в среднем происходят пропорционально изменениям испарения с поверхности воды, хотя в отдельные годы их изменения носят разнонаправленный характер. По данным наблюдений ВФ ГГИ (которые в конце 1980-х – начале 1990-х годов были прекращены) за период с 1950 по 1992 год испарение с поверхности воды уменьшилось в среднем на 30 мм, а с почвы по тенденции – на 30 – 40 мм (*рисунок 2.8*). Поэтому для зоны достаточного и избыточного увлажнения с большой степенью уверенности можно полагать изменения осредненных величин испарения с поверхности почвы эквивалентными изменениям его осредненных величин с поверхности воды.

В 2000-х годах по данным водно-испарительной сети в зонах избыточного и достаточного увлажнения произошло повышение испарения до уровней, близких к величинам испарения, наблюдавшегося в 1950-е – 1960-е годы, хотя и несколько ниже этих уровней. Соответственно, пропорционально испарению с поверхности воды в среднем возросло и испарение с поверхности почвы.

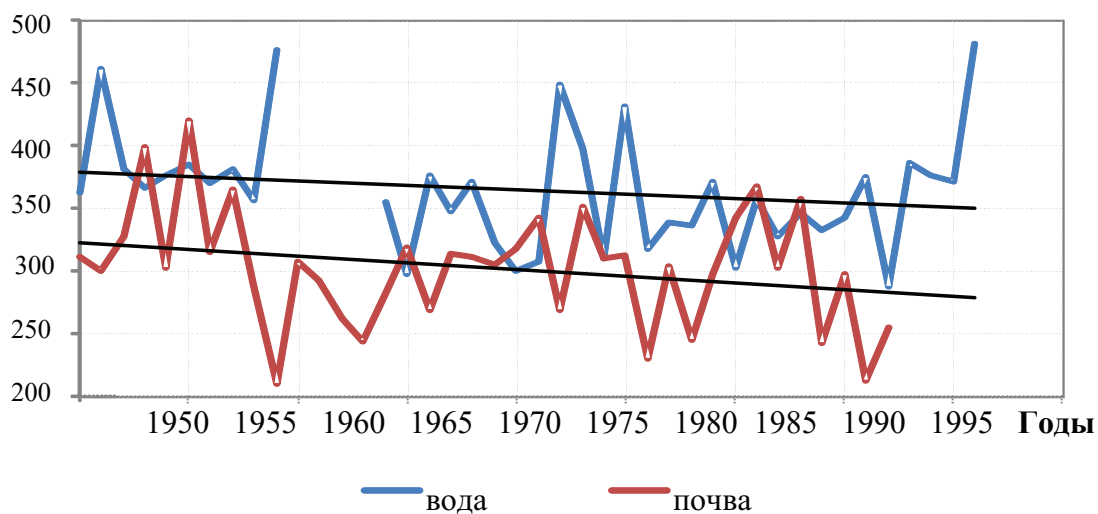


Рисунок 2.8. Многолетние изменения испарения с поверхности воды (синяя линия) и почвы (красная линия) по данным наблюдений ФБГУ «ВФ ГГИ» (наблюдения были прекращены)

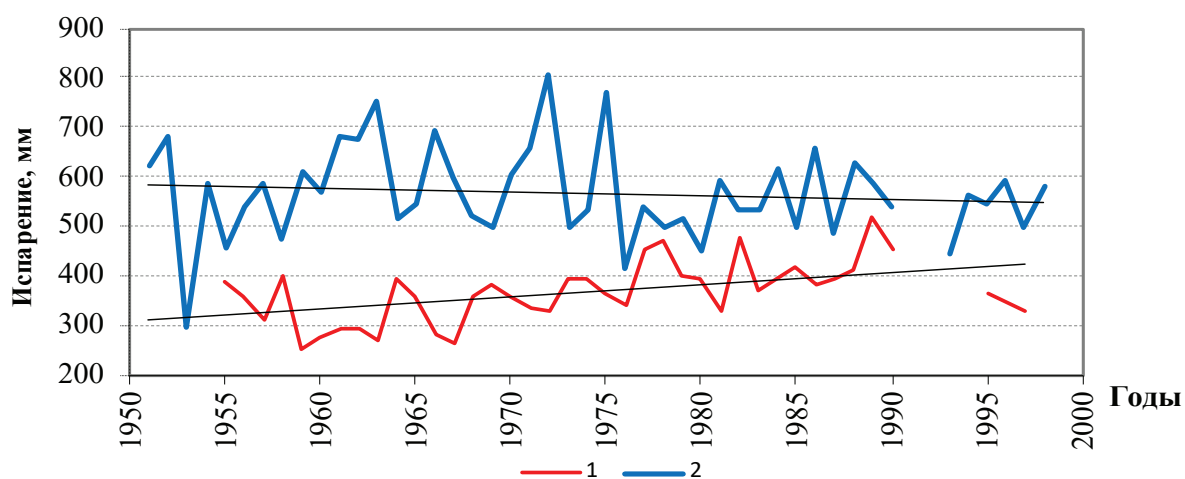


Рисунок 2.9. Испарение с поверхности почвы (1) и воды (2) по данным наблюдений НДВБС (лесостепная зона) в период с 1951 по 1998 год

В полуаридной зоне снижение прихода энергии сказывается на испарении в меньшей степени, поскольку ее в любом случае достаточно для формирования интенсивного испарения. В результате увеличения осадков и подъема уровней грунтовых вод верхнего горизонта (и капиллярной каймы) близко к поверхности в почве появилась доступная для испарения влага. По этой причине снижение величин испарения с поверхности воды до середины 1970-х годов сопровождалось ростом испарения с поверхности почвы, причем к середине 1990-х годов для лесостепной зоны они были близки по величине, что для наглядности показано на *рисунке 2.9*. Такое явление наблюдалось не только на воднобалансовых станциях полуаридной

зоны России, но и в других сходных по природным условиям регионах мира [Голубев и др., 2002]. Эффект был отмечен еще в 1960-х годах и назван «взаимодополняющим соотношением» [Morton, 1965].

Величины испарения с почвы в лесостепной зоне (Нижнедевицкая ВБС) фактически стабилизировались уже со второй половины 1970-х годов на уровне 420 мм в среднем, что превышает средние величины испарения за предыдущий период на 70 – 80 мм (рисунк 2.10). Испарение с поверхности воды во второй половине 1990-х годов вновь начало повышаться с уровня 430 – 440 мм в год и стабилизировалось в 2000-х годах на уровне 550-560 мм, что несколько ниже, чем в период 1950-х – 1960-х годов.

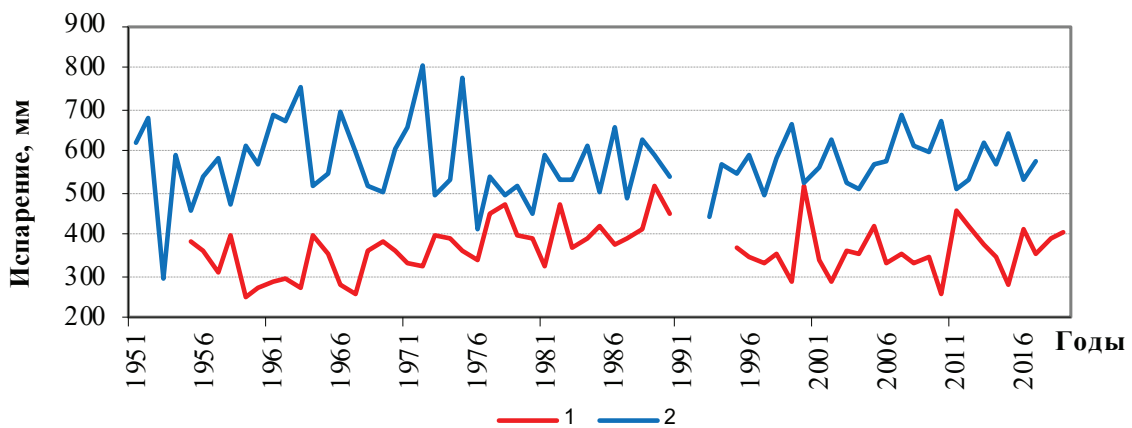


Рисунок 2.10. Многолетние изменения испарения с поверхности почвы (1) и воды (2) по данным наблюдений НДВБС (лесостепная зона) за период наблюдений до 2019 года

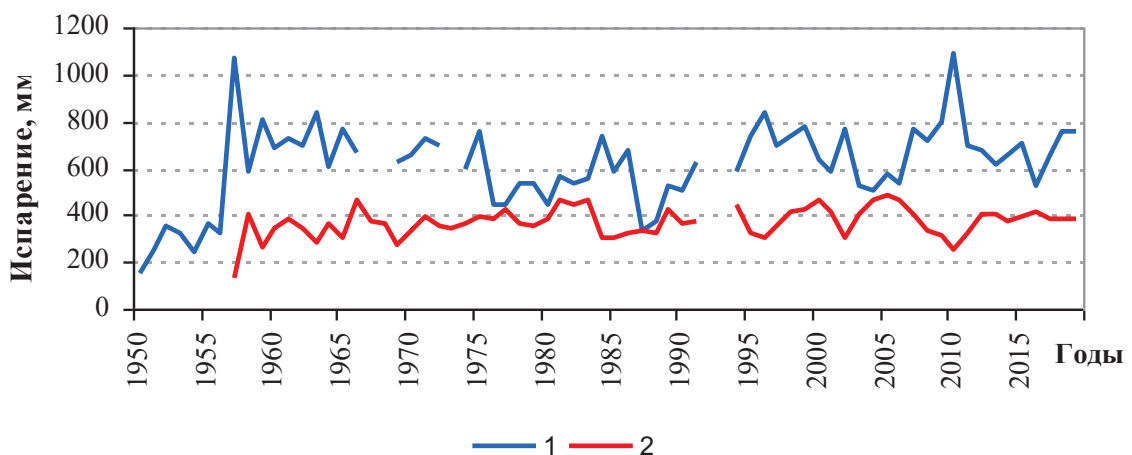


Рисунок 2.11. Многолетние изменения испарения с поверхности воды (1) и почвы (2) по данным наблюдений ВБС Каменная Степь (степная зона) до 2019 года

В степной зоне (ВБС Каменная Степь) наблюдалась сходная картина, но с некоторыми особенностями. Во-первых, испарение с почвы здесь всегда было ниже, чем испарение с воды, ввиду более низкого увлажнения почво-грунтов (*рисунок 2.11*). Во-вторых, изменения испарения с почвы стабилизировались здесь только с середины 1990-х годов и составили в среднем 380 – 390 мм в год, что на 90 – 100 мм больше, чем в 1950 – 1960-е годы. Испарение с поверхности воды в 2000-х годах восстановилось на уровнях, близких к уровням первого квазистационарного периода.

Следует отметить, что определенную роль в увеличении испарения с поверхности воды и почвы в полуаридной зоне сыграло увеличение продолжительности периода с положительными температурами воздуха, когда эти явления наблюдаются. Характерный период в последние десятилетия имеет продолжительность с апреля по ноябрь, а в 2002 году он включал в себя даже март. Разумеется, случаи повышенной продолжительности периода испарения с поверхности воды и почвы в течение года в этой зоне встречались и раньше, но они не носили систематического характера.

Данные наблюдений воднобалансовых станций вполне согласуются с материалами наблюдений за испарением с поверхности воды и почвы, полученными на испарительной сети, расположенной на Европейской территории России [Научно-прикладной справочник, 2021]. Это свидетельствует о том, что ВБС достаточно хорошо отражают основные зональные тенденции многолетних изменений испарения.

2.3.2 Запасы влаги в почве

Запасы влаги в верхнем метровом слое почвы по данным наблюдений на ВБС в зонах избыточного и достаточного увлажнения (лесная зона) в среднем возросли в течение всего года, что согласуется с данными наблюдений агрометеорологической сети. При этом в отдельные зимние и весенние месяцы величина влагозапасов в метровом слое почво-грунтов может превышать величину наименьшей полевой влагоемкости. Пример изменения внутригодового распределения содержания влаги в почве на полевом участке Подмосковной ВБС приведен на *рисунке 2.12*.

Косвенным показателем повышенной увлажненности почв может служить расширение заболоченных и переувлажненных территорий в лесной зоне (как таковой, так и смешанных лесов), хотя в последние годы отмечаются также участки с дефицитом увлажнения, где наблюдается усыхание леса. Последнее свидетельствует о некорректности сравнения увлажнения почво-грунтов осредненного за длительные периоды времени.

Возросшее общее увлажнение почвы, особенно в осенне-зимне-весенний период, сопровождается учащением формирования периодов с пониженным содержанием влаги в июне-июле и июле-августе, когда в течение декады и более содержание влаги может приближаться к влажности завядания ($W_{вз}$). Это явление

показано на примере 2002 года, когда запасы влаги в верхнем метровом слое почво-грунтов снижались до величин менее 200 мм.

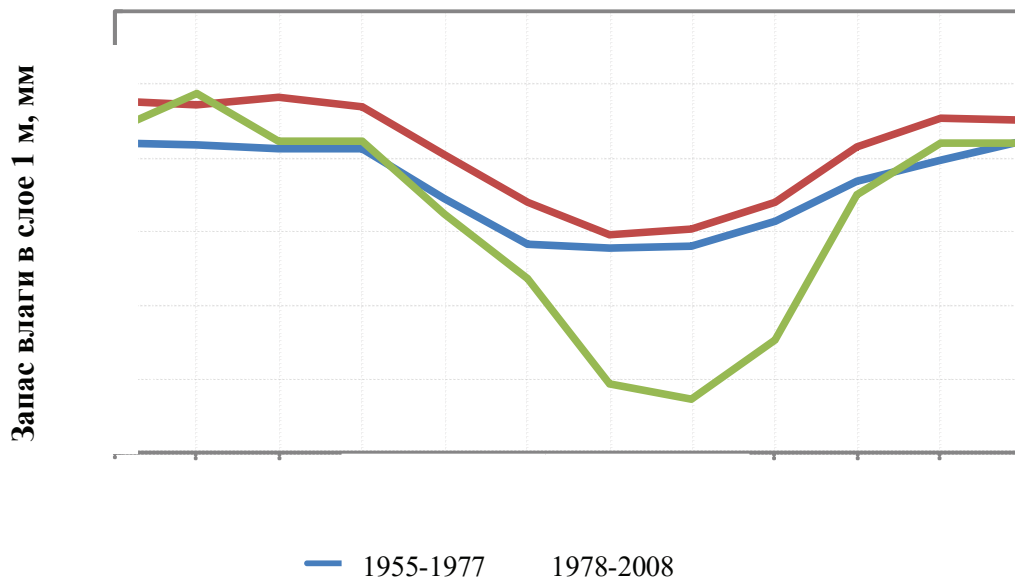


Рисунок 2.12. Внутригодовое распределение запасов влаги в почво-грунтах в слое 1 м на ПВБС, площадка 4 (синяя линия – среднее за период 1955 – 1977 годы; красная линия – среднее за период 1978 – 2008 годы; зеленая линия – по наблюдениям в 2002 году)

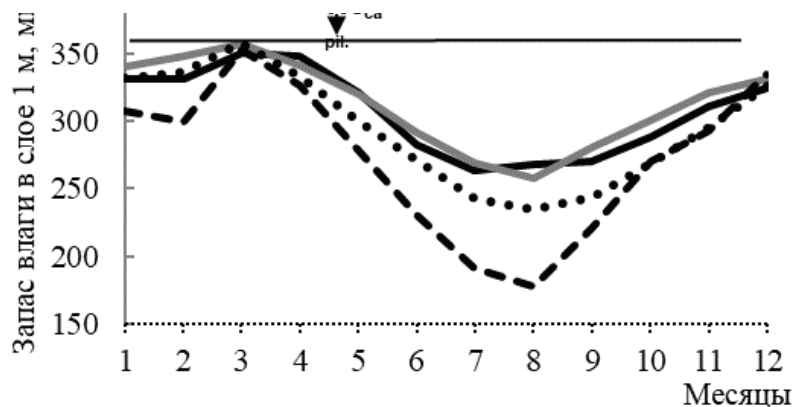


Рисунок 2.13. Внутригодовое распределение запасов влаги в почво-грунтах в слое 1 м на логу Долгий (Нижедевицкая ВБС): среднее за период 1955 – 1977 гг. (1); среднее за период 1978 – 2017 гг. (2); по наблюдениям в 2010 г. (3); среднее за период 2007 – 2017 гг. (4)

Запасы влаги в почве в полуаридных лесостепной и степной зонах по данным наблюдений на ВБС в среднем также возросли в течение всего года, за исключением апреля и августа в случае осреднения за периоды с начала наблюдений до 1977 года и с 1978 года по настоящее время. Незначительное снижение увлажнения верхнего метрового слоя почво-грунтов в апреле связано с более ранними сроками

завершения снеготаяния, а август, в среднем, стал более засушливым, чем в предыдущий период. При этом в отдельные зимние и весенние месяцы величина влагозапасов здесь может превышать величину наименьшей полевой и капиллярной влагоемкости. Пример изменения осредненного внутригодового распределения содержания влаги в метровом слое почвы по данным наблюдений на логу Долгом Нижнедевицкой ВБС приведен на *рисунке 2.13*.

В полуаридной зоне также формируются продолжительные периоды с пониженным содержанием влаги в течение июля – августа. На *рисунке 2.13* (график 3) для примера показано внутригодовое распределение содержания влаги в метровом слое почво-грунтов на логу Долгом в 2010 году, когда влагозапасы в верхнем метровом слое в эти месяцы опускались до значений всего в 180 – 190 мм (до уровня влажности завядания). При этом участились случаи, когда в полуаридной зоне на фоне среднего повышения увлажнения в осенне-зимний период после засушливых лета и осени значительные дефициты влагозапасов в почве могут наблюдаться и зимой.

Следует отметить, что в последнее десятилетие в полуаридной зоне происходит иссушение верхнего метрового слоя почво-грунтов в теплый период года (*рисунок 2.13*, график 4). Это еще раз подчеркивает недостаток упрощенного анализа изменений гидрологического режима посредством сравнения двух периодов – до и после 1978 года, без отдельного учета времени перестройки системы влагооборота водосборов и ее стабилизации.

На графике видно, что в 2008 – 2017 годах снижение осредненного увлажнения верхнего слоя почво-грунтов наблюдается начиная с апреля и достигает минимальных значений в 240 – 250 мм в июле-августе и восстанавливается только к концу декабря.

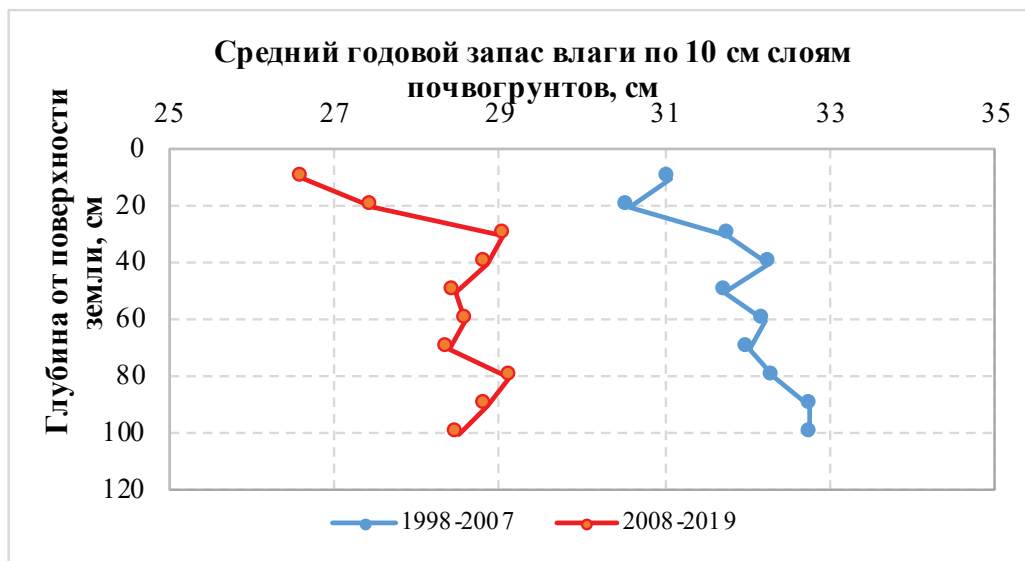


Рисунок 2.14. Осредненные профили запасов влаги в метровом слое почво-грунтов по данным наблюдений на водосборе балки Степная (ВБС Каменная Степь) за периоды 1998 – 2007 и 2008 – 2017 годы

Основными причинами наблюдаемых изменений являются внутригодовое перераспределение осадков и повышение температуры воздуха, в результате чего возросла продолжительность периода испарения с поверхности почвы, о чем было сказано выше, а питание верхнего слоя почво-грунтов капиллярной влагой в условиях снижения уровней верхнего водоносного горизонта на 3 – 5 м прекратилось или снизилось до незначительных величин (см. раздел 2.3.4).

Промерзание почво-грунтов в зимний период в последнее десятилетие не наблюдается или оно незначительно, что, во-первых, не вызывает миграцию влаги в верхний слой к фронту промерзания [Калюжный, Лавров, 2012], и, во-вторых, создает благоприятные условия для фильтрации влаги в более глубокие горизонты в зимний и весенний периоды.

Таким образом, в центральной части и на юге европейской территории России формируются периоды с высоким дефицитом увлажнения почвы, нередко перерастающие в почвенные засухи, причем опасность их возникновения в последние годы повысилась. По данным наблюдений на ВБС повторяемость этих явлений возросла в среднем с 1 случая в 10 – 15 лет до 1 случая в 5 – 7 лет.

Необходимо обратить внимание на то, что после полного схода снега и оттаивания почвы ее увлажнение во всех природных зонах достигает значений, превышающих наименьшую влагоемкость примерно на 10% [Вершинина и др., 1985]. Это явление более четко выражено в полуаридных зонах и сглажено в зонах достаточного и избыточного увлажнения.

Данные наблюдений за влагозапасами в почво-грунтах в последние десятилетия ограничиваются верхним метровым слоем, в котором их изменение наиболее динамично. В 1970-х годах наблюдения в некоторых пунктах воднобалансовых станций производились до глубины 1,5 – 3 м. Однако, когда было установлено, что ниже глубины почвы 0,8 – 1 м и до верхней границы стояния капиллярной каймы, влажность грунтов меняется мало, эти наблюдения были прекращены ввиду их трудоемкости. Кроме того, работы проводились преимущественно с целью корректного установления величины наименьшей полевой влагоемкости по профилю почво-грунтов, что не требовало продолжительных систематических наблюдений.

В настоящее время информация о динамике влагосодержания во всей зоне аэрации была бы очень полезна для оценки реального количества удерживаемой в ней влаги в условиях изменений климата и механизмов взаимодействия с насыщенной зоной. Необходимо отметить, что зона аэрации почво-грунтов в степной зоне может в зависимости от глубины залегания уровня грунтовых вод контролироваться до 1200 мм слоя воды, о чем свидетельствуют зависимости, приведенные на *рисунке 2.15*. Эти зависимости были получены в ходе работы Донской экспедиции ГГИ и опубликованы в работе В. Е. Водогрещкого и О. И. Крестовского [Водогрещкий и Крестовский, 1975].

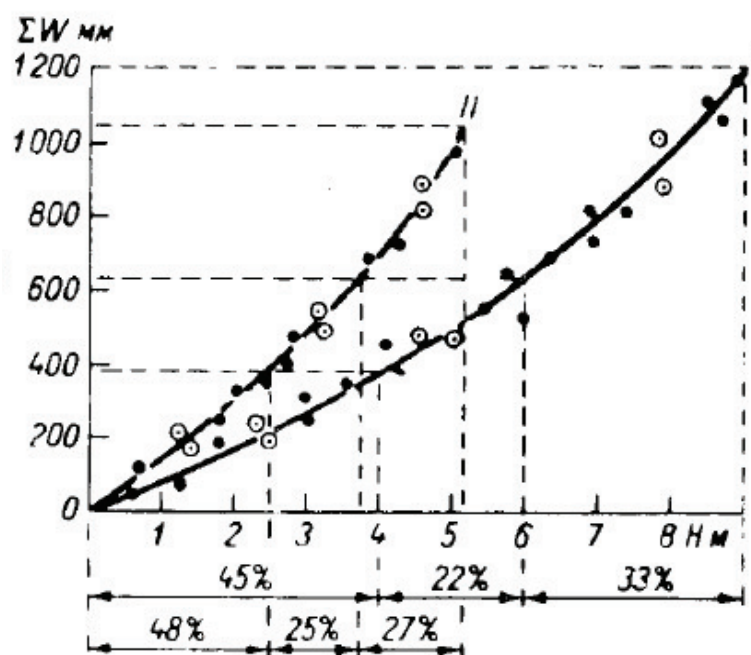


Рисунок 2.15. Зависимость величины влагозапасов в почвогрунтах зоны аэрации W от глубины залегания грунтовых вод H на степной водосборе: I – зона аэрации сложена суглинками; II – зона аэрации сложена супесями

В годы, когда в зимне-весенний период формируется мощный мерзлый «запирающий» слой почво-грунтов, величина инфильтрации в ходе весеннего половодья может снижаться до 20-25 мм, и питание зоны аэрации практически отсутствует, в результате чего возникает дефицит насыщения во всей ее толще, который может переходить на следующий гидрологический год. При наличии талых или слабо промерзших почво-грунтов инфильтрация в период формирования весеннего половодья может превышать 120 мм [Вершинина и др., 1985].

2.3.3 Промерзание почво-грунтов

Промерзание почво-грунтов является одним из важнейших факторов, влияющих на формирование стока весеннего половодья. Сочетание промерзания почво-грунтов с их увлажнением определяет льдистость почвы, формирование так называемого «запирающего» слоя, как в течение холодного периода года, так и в результате замерзания талой воды в верхних слоях почвы на начальном этапе снеготаяния при наличии достаточно большого запаса холода в ней [Лавров, Калюжный, 2016]. Наличие или отсутствие «запирающего» слоя определяет водопроницаемость почво-грунтов, формирование поверхностного стока талой воды и водопоглотительную способность водосборов.

Процессы промерзания почво-грунтов были подробно изучены на водосборах в период работы Донской и Вятской экспедиций ГГИ в 1970-е годы, в ходе

лабораторных экспериментов на монолитах, проведенных Гидрофизической лабораторией института, а также на водосборах воднобалансовых станций, где эти наблюдения продолжаются в ограниченном объеме. Результаты этих исследований подробно изложены в монографиях Л. К. Вершининой с соавторами [Вершинина и др., 1985], И. Л. Калюжного и С. А. Лаврова [Калюжный, Лавров, 2012]. Процессы промерзания исследовали также специалисты Гидрометцентра, в частности В. Д. Комаров, В. И. Корень и др. Ряд авторов разработал модели промерзания почвы, которые могут использоваться автономно [Калюжный, Лавров, 2012] или в качестве блока гидрологической модели формирования стока воды [Виноградов, 1988; Корень, 1991; Мотовилов, Гельфан, 2018].

Проведенными исследованиями был установлен ряд закономерностей процессов промерзания почвы, о которых следует упомянуть, и которые были характерны для рассмотренного периода. Во-первых, наиболее интенсивно промерзание происходило в декабре-январе, когда высота снежного покрова была относительно невелика и менее затруднен отток тепла, выделяемого при кристаллизации влаги. В дальнейшем, с возрастанием высоты снежного покрова и уменьшением оттока тепла с фронта промерзания, процесс замедлялся, и глубина промерзания стабилизировалась.

Увлажнение почв до значений, близких к наименьшей полевой влагоемкости, в сочетании с ее глубоким промерзанием приводила к образованию «запирающего» водонепроницаемого слоя. Образование этого слоя происходило при понижении температуры верхних слоев почвы ниже -2°C . Между глубиной промерзания почвы и мощностью «запирающего» слоя была установлена зависимость, которая свидетельствует, что при средней глубине промерзания на водосборе менее 30 см водонепроницаемый слой не образуется. При средней глубине промерзания в 60 см его мощность составляет 25 см, а участки с тальми и слабо промерзшими почвами на водосборе отсутствуют.

В современных климатических условиях в большинстве случаев наблюдается сходная ситуация хода формирования промерзания, но глубина промерзания почвогрунтов в среднем заметно уменьшилась. В то же время наблюдаются отдельные случаи, когда в результате продолжительных и частых оттепелей высота снежного покрова зимой уменьшается, а на отдельных участках снег может полностью отсутствовать. При наступлении морозной погоды формируется глубокое промерзание в феврале и даже в начале марта. В частности, такие случаи отмечены на Нижнедевицкой воднобалансовой станции и ВБС Каменная Степь в 2003 и 2010 годах.

На *рисунке 2.16* показаны многолетние изменения максимальной годовой глубины промерзания по данным наблюдений на мерзлотомере № 1, расположенном на водосборе лога Малютка (Нижнедевицкая ВБС). В период с 1964 до 1987 года здесь в 8-и случаях наблюдалось промерзание почвогрунтов до 150 см и более (глубина установки мерзлотомера составляет 150 см), и всего 3 случая промерзания

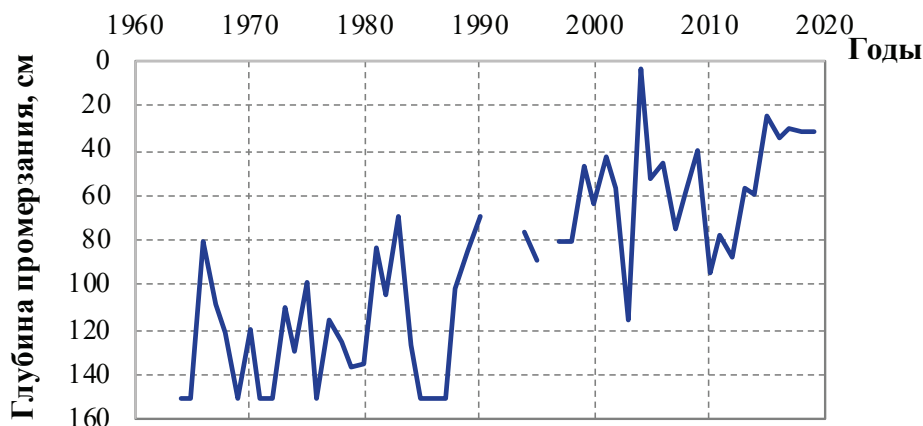


Рисунок 2.16. Многолетние изменения максимальной годовой величины промерзания почво-грунтов по данным наблюдений на логу Малютка, мерзлотомер №1, Нижнедевицкая ВБС, за период с 1964 по 2019 год

менее 100 см. С 1988 до 2017 года были отмечены только 2 случая, когда промерзание здесь превысило 100 см.

В упомянутой статье С. А. Лаврова и И. Л. Калюжного отмечено, что для южной части бассейна р. Волги промерзание почво-грунтов снизилось в последние десятилетия в среднем на 50 см.

На представленном для примера графике приведена глубина максимального промерзания только по одному мерзлотомеру, причем на этом приборе отмечались наибольшие глубины промерзания на водосборе р. Девицы. Очевидно, что в последние десятилетия даже в благоприятных для промерзания почвы условиях, ее максимальная глубина в этом пункте редко превышала 60 см. Это свидетельствует о существенном сокращении случаев возникновения водонепроницаемого слоя почвы на водосборах, который, как было отмечено выше, возникает при *средних* глубинах промерзания на водосборе в диапазоне от 40 до 60 см и более.

Необходимо отметить, что полученная Л. К. Вершининой с соавторами соотношение доли площади водосбора с тальми и слабо промерзшими почвами в зависимости от средней глубины промерзания на водосборе, основанная на обобщении большого объема экспедиционных данных, совпала с полученной ранее В. Д. Комаровым аналогичной зависимостью на основе данных воднобалансовых станций. На этом основании был сделан вывод, что «это еще раз указывает на репрезентативность воднобалансовых станций для характеристики распределения глубины промерзания почвы в пределах окружающих водосборов средних размеров».

Значение влагозапасов и глубины промерзания в зоне аэрации становится наиболее очевидным при рассмотрении водных балансов весеннего половодья, что рассмотрено в Главе 3.

2.3.4 Изменение уровней и запасов грунтовых вод

Динамика уровней грунтовых вод связана с условиями их питания и разгрузки. Этот сложный процесс зависит от множества факторов, в числе которых режим поступления влаги на поверхность водосборов, условия инфильтрации и фильтрации воды в зоне аэрации и насыщенной зоне, определяемые механическим составом почво-грунтов, глубиной залегания водного зеркала, его уклоном и динамичностью режима, условиями разгрузки при различных уровнях воды в дренирующих водотоках при открытом русле и при наличии ледового покрова.

По данным наблюдений на воднобалансовых станциях уровни и, соответственно, запасы грунтовых вод в последние десятилетия претерпели существенные изменения во всех водоносных горизонтах, начиная с верхнего локального горизонта, который часто не имеет сплошного распространения (собственно грунтовые воды).

На *рисунке 2.17* показаны многолетние изменения уровней грунтовых вод в скважине № 12 на логу Таежном (ВФ ГГИ), которые свидетельствуют, что в последнее десятилетие наблюдаются стабильно высокие уровни воды верхнего горизонта, но без выхода воды на поверхность, и с уменьшенной амплитудой колебаний в течение года.

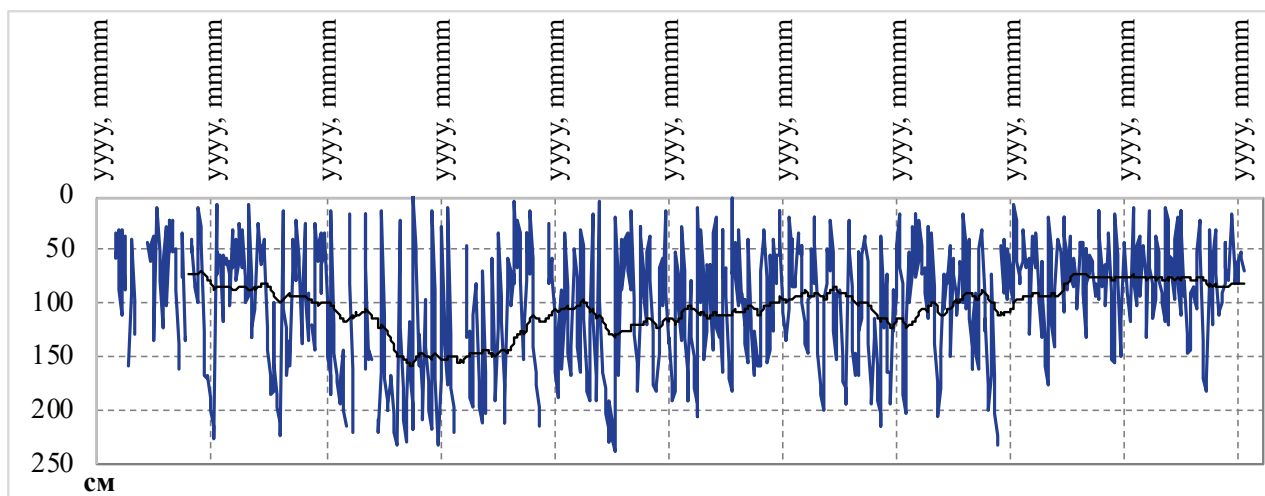


Рисунок 2.17. Многолетние изменения уровня воды в скважине № 12, лог Таежный, ВФ ГГИ (уровни воды приведены в см от поверхности)

По данным наблюдений Подмосковной воднобалансовой станции и ВФ ГГИ уровни грунтовых вод за период с конца 1950-х годов до начала 1990-х годов на водосборах этих станций выросли в разных водоносных горизонтах на 1 – 3 м. К сожалению, этот вид наблюдений на Подмосковной ВБС был прекращен и изменения уровней грунтовых вод после 1990 года неизвестны.

Возросли и в течение длительного времени сохраняли стабильно высокие уровни грунтовые воды также в лесостепной и степной зонах.

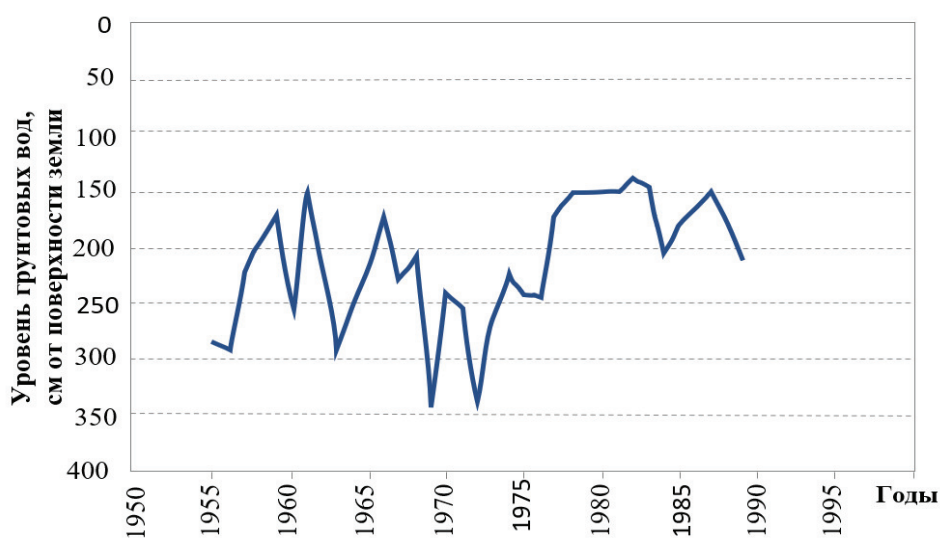


Рисунок 2.18. Многолетние изменения средних годовых уровней воды верхнего водоносного горизонта по данным наблюдений на НДВБС за период с 1955 по 1990 год

На *рисунке 2.18* показаны изменения средних годовых уровней воды в верхнем водоносном горизонте на Нижнедевицкой ВБС (лесостепная зона). Уровень грунтовых вод верхнего горизонта со времени минимума 1972 года поднялся здесь в 1980-х годах на 1,5 – 2 м к отметкам 1,5 – 2 м от поверхности земли, но к началу 1990-х годов вновь упал ниже 2 м.

На *рисунке 2.19* показаны изменения уровней воды в основном постоянном водоносном горизонте водосбора р. Девица, относящиеся к подземным водам. Уровни этого основного водоносного горизонта начали подниматься с 1978 года и к 2008 году выросли на 2,4 – 2,8 м, что составляет увеличение запаса воды на 200 – 250 мм. В относительно засушливый период после 2008 – 2009 гг. произошло снижение уровней грунтовых вод этого горизонта на 0,4 – 0,8 м (то есть запас уменьшился на 50 – 70 мм), но это явление связано скорее с предшествующим периодом снижения инфильтрации 1996 – 2007 годов, которое отразилось на режиме изменений уровней данного горизонта с большой задержкой.

Литологический разрез скважины № 14, расположенной на бровке левобережного склона в нижней части водосбора лога Долгий (отметка 186,9 м), показывает, что ниже полуметрового слоя почвы, сложенного черноземом, до глубины 2,7 м залегает средний суглинок, ниже него до глубины 16,5 м слабо плотный мел с прослойкой суглинка на глубине 6 м. Далее на глубину до 30 м залегает мелкозернистый кварцевый песок с включениями песчаника, коэффициент водоотдачи которого составляет 0,15. Примерно такой же литологический разрез имеет скважина № 18. Литологические разрезы скважин, расположенных в приводораздельных частях водосборов, свидетельствуют о наличии водовмещающих песков

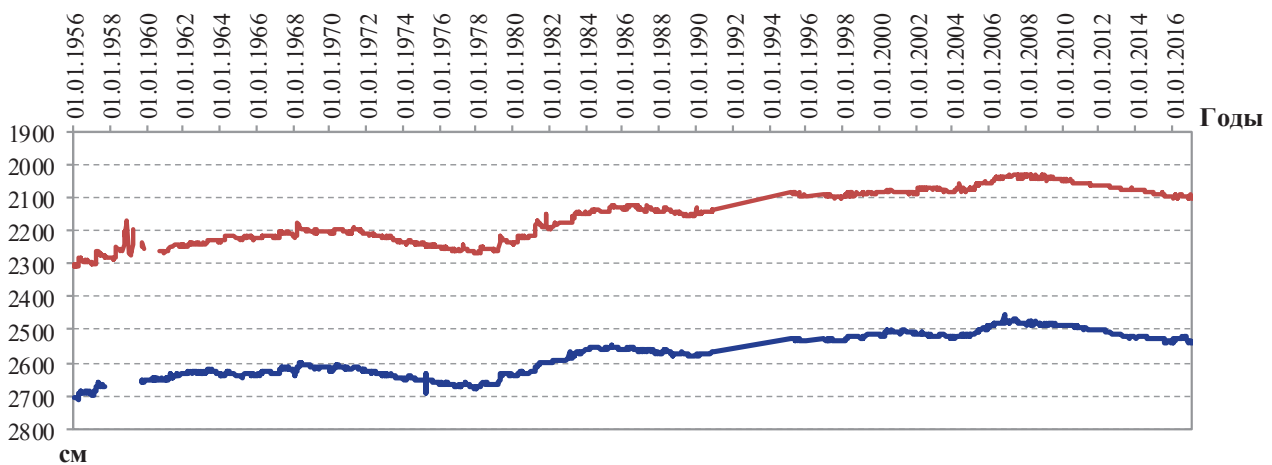


Рисунок 2.19. Многолетние изменения средних годовых уровней воды основного водоносного горизонта по данным наблюдений на НДСБС (скважины №№ 14 и 18) за период с 1956 по 2016 год

с глубины 7 – 9 м от поверхности мощностью 6 – 7 м, подстилаемых водоупорными глинами. Диапазон колебаний уровней воды подземных горизонтов составляет не более 3 м, тогда как остальная часть толщи водовмещающих пород сохраняет дефицит насыщения. Таким образом, ненасыщенная зона почво-грунтов может существенно превышать глубину 10 – 15 м, увеличивая регулируемую емкость зоны аэрации, что характерно для лесостепной зоны.

Анализ совмещенных графиков изменений средних годовых уровней воды в верхнем и нижнем водоносных горизонтах показывает сдвиг по времени циклов их многолетних колебаний (рисунок 2.20).

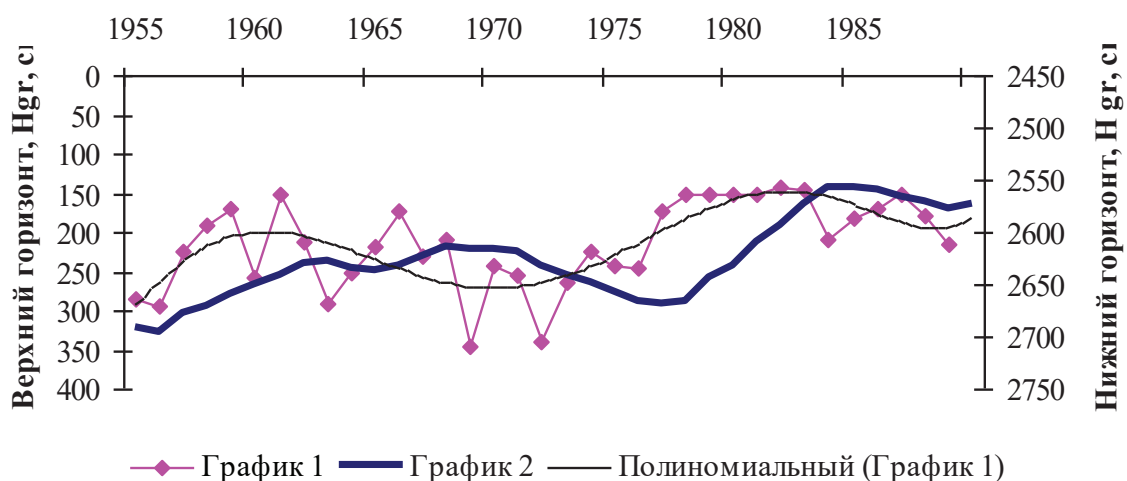


Рисунок 2.20. Ход средних годовых уровней воды верхнего (1) и нижнего (2) водоносных горизонтов на НДСБС за период с 1955 по 1990 год (тонкой сплошной линией показан сглаженный ход средних годовых уровней воды верхнего водоносного горизонта)

Такая оценка является довольно приблизительной, но она свидетельствует, что время миграции влаги от верхнего полупроницаемого водоносного горизонта в нижний постоянный водоносный горизонт составляет около 6-7 лет и более. Соответственно, на этот срок сдвигается время реакции уровней и запасов воды нижнего горизонта на периоды повышенной и пониженной инфильтрации поверхностных вод в почво-грунты. На этом основании можно также полагать, что повышенное питание рек данного района грунтовыми водами из постоянного водоносного горизонта сохранится в течение как минимум в течение периода сдвига даже при условии продолжительного снижения его питания.

Исследования влагооборота на водосборах с применением изотопов также свидетельствует о том, что в стоке воды данного гидрологического года до 40% ее объема и более имеет возраст свыше года [Herrmann, 1999; Sokolov et al., 1999] и, таким образом, сформировалось вне пределов данного гидрологического года. Надо иметь в виду, что изотопный анализ позволяет оценить вклад подземных вод различного возраста в формирование стока, но установить точный объем воды данного гидрологического года невозможно, поскольку при замедленном водообмене поступление воды в водоносный горизонт и ее расход происходят по принципу замещения.

На рисунке 2.21 показаны многолетние изменения уровней верхнего водоносного горизонта за период с 1930 по 2011 год по данным наблюдений на скважине в районе ВБС Каменная Степь. На графике видно, что в 1975 – 1977 годах уровни грунтовых вод повысились на 1 – 2 м и в отдельные периоды достигали отметок менее 2-х м от поверхности земли. В дальнейшем уровни воды в скважине колебались в пределах 1,5 – 4 м от поверхности земли, в отдельные годы опускаясь до 5 – 5,5 м.

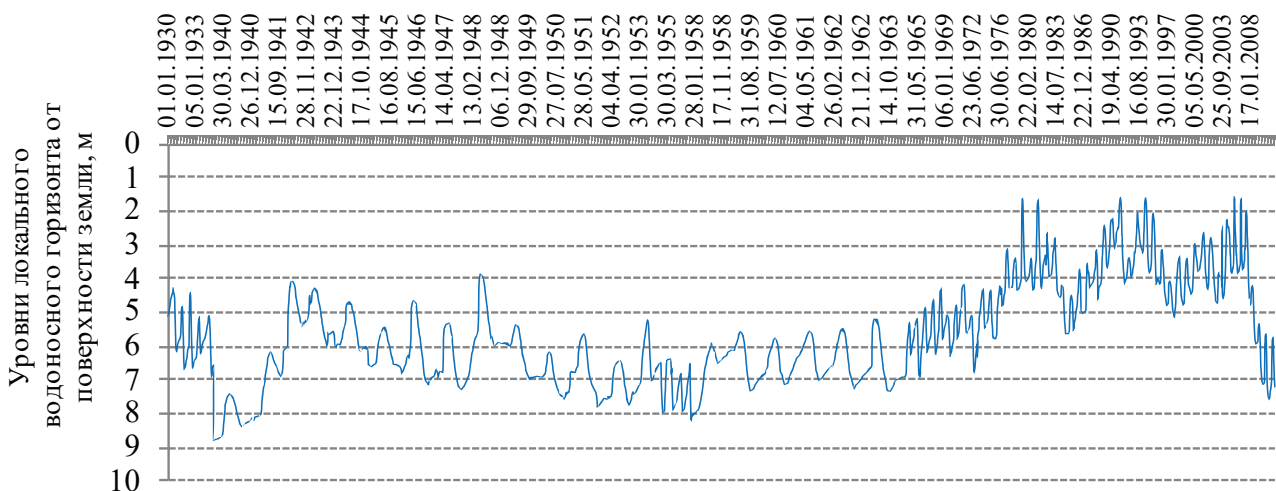


Рисунок 2.21. Многолетние изменения средних годовых уровней воды верхнего водоносного горизонта по данным наблюдений на ВБС Каменная Степь за период с 1930 по 2011 год

В 2007 – 2011 годах произошло их резкое падение (на 5 м), что связано с уменьшением величин годовых осадков в этот период, поскольку верхний водоносный горизонт в полупустынной зоне очень чувствителен к погодным условиям и такие колебания вполне возможны при общей климатической ситуации, способствующей активному питанию грунтовых вод. Понижение уровней грунтовых вод и, соответственно, верхней границы капиллярной каймы неизбежно должно было понизить и величину испарения с поверхности почвы.

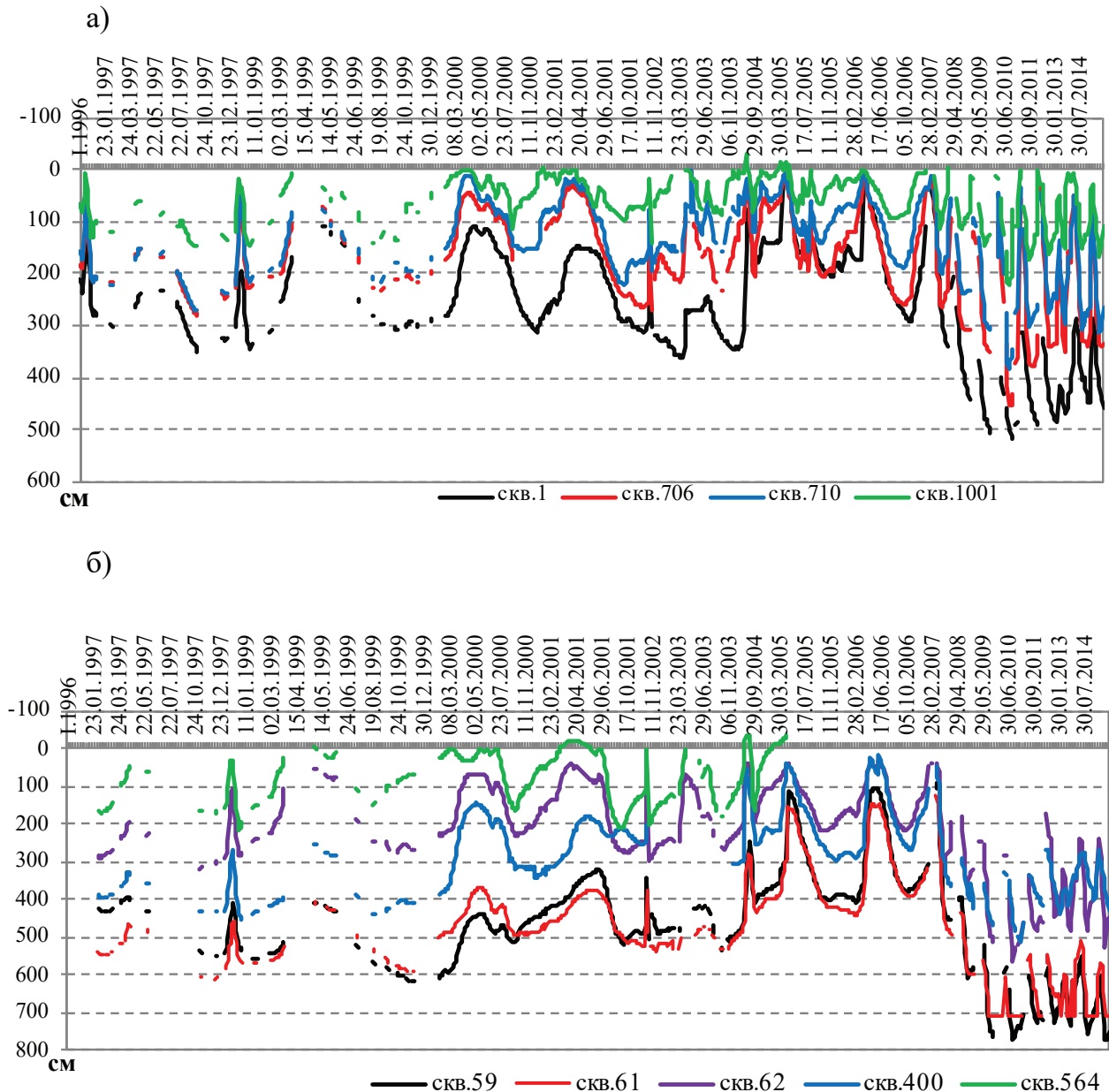


Рисунок 2.22. Многолетние изменения уровня воды по скважинам, расположенным на водосборах балок Солонцы (а) и Степная (б) на ВБС Каменная Степь за период с 1996 по 2015 год

На *рисунке 2.22* приведены многолетние изменения уровня воды по скважинам, расположенным на водосборах балок Степная и Солонцы (ВБС Каменная Степь) за период с 1996 по 2015 год. Все эти скважины имеют неглубокое заложение и отражают динамику уровней верхнего водоносного горизонта. До 2003 года уровни воды колебались с амплитудой 1,5 – 2 м. При этом даже на скважинах, расположенных в приводораздельных и верхних частях склонов уровни воды продолжительное время находились в 1 – 1,5 м от поверхности, а в нижних частях склонов – менее метра. На скважинах, расположенных в зоне разгрузки, в период весеннего половодья в отдельные годы наблюдался выход воды на дневную поверхность. Наиболее высоко уровни грунтовых вод стояли в 2003 – 2006 годах.

В 2008 году началось падение уровней воды, наиболее значительное в верхних частях склонов, где уровни опустились в среднем на 3 – 4 м и более. В нижних частях склонов и притальвежной части падение уровней было меньше и составило от 0,5 до 1,5 – 2 м.

Причинами роста уровней грунтовых вод являются возросшие в районах расположения воднобалансовых станций осадки и благоприятные условия фильтрации воды в зимний и весенний периоды, связанные с многочисленными зимними оттепелями и слабым промерзанием почво-грунтов в последние годы. В зоне избыточного увлажнения этому способствовало также снижение испарения. Определенный вклад в поддержание высоких уровней подземных вод могут вносить относительно высокие меженные уровни воды в водотоках за счет снижения уклонов горизонтов грунтовых вод.

Однако нельзя не учитывать, что в природной системе одновременно начинают более активно работать механизмы, которые препятствуют избыточному питанию грунтовых вод. В частности, в лесной зоне (по крайней мере, на полевых участках водосборов) значительно возрос сток внутрипочвенной верховодки при оттепелях и в весенний период, что является прямыми потерями питания грунтовых вод. В полуаридных зонах, в периоды высокого стояния уровней верхнего горизонта подземных вод, увеличенное испарение с почвы также частично снижает питание грунтовых вод верхнего горизонта за счет оттока влаги в зону капиллярной каймы.

Более активному питанию рек подземными водами, а, следовательно, и снижению их уровней, способствует сокращение периодов ледостава, под которым нередко формируется зона повышенного давления.

Таким образом, оценка ситуации с динамикой уровней и запасов подземных вод должна учитывать весь комплекс факторов, которые влияют на их режим.

2.3.5 Оценки изменения режима стока воды на водотоках воднобалансовых станций

Сток воды является интегральным показателем составляющих водного баланса бассейна. Он зависит от соотношения поступающей на поверхность водосбора влаги и режима ее преобразования этой сложной природной системой в вертикальные и горизонтальные потоки.

Анализ многолетнего хода стока воды больших и средних рек ЕТР, основанный на данных наблюдений стандартной гидрометрической сети, свидетельствует о значительных изменениях всех его компонентов – годового, максимального и минимального стока, внутригодового распределения [Георгиевский, 2015, Основные гидрологические характеристики рек ..., 2015; Основные гидрологические характеристики водных объектов ..., 2021].

Данные наблюдений за стоком воды малых водотоков показывают, что на них также произошли изменения, зачастую более значительные, чем на крупных и средних реках, которые интегрируют сток, сформированный преимущественно на водосборах малых рек. К сожалению, информация о режиме этого класса водотоков весьма ограничена, особенно в отношении логов, балок, ручьев и рек с площадями менее 1000 км².

На рисунках 2.23 – 2.26 представлены примеры осредненных типовых гидрографов малых рек зоны южной европейской тайги (р. Полометь – п. Яжелбицы, ВФ ГГИ), смешанных лесов (р. Медвенка – выше впадения р. Закзы, ПВБС) и лесостепной зоны (р. Девица – п. Товарня и р. Девица – п. Девица).

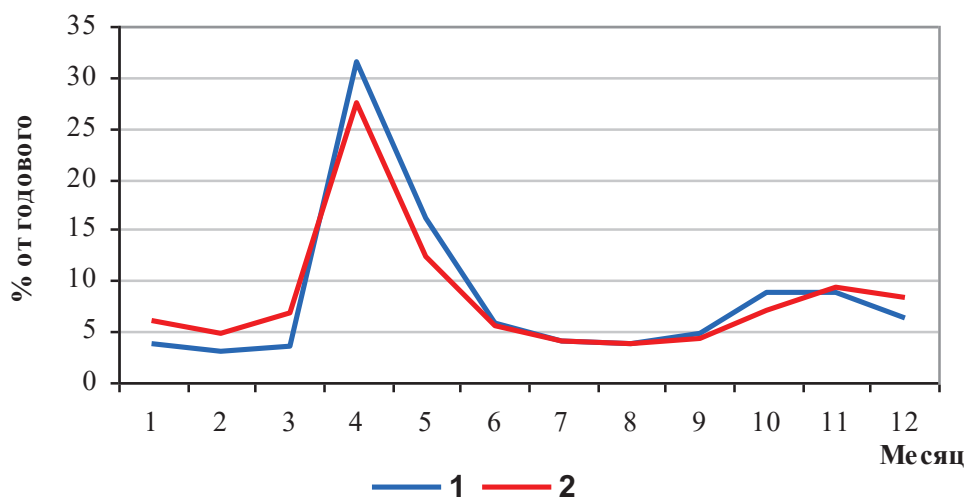


Рисунок 2.23. Осредненный типовой гидрограф стока для малых рек зоны смешанных лесов для периодов 1952 – 1977 годы (1) и 1977 – 2019 годы (2) на примере р. Полометь – п. Яжелбицы, ВФ ГГИ, А=631 км²

В зонах избыточного и достаточного увлажнения конфигурация годового гидрографа на малых реках в целом сохранилась (рисунки 2.23, 2.24). Наибольший объем стока по-прежнему формируется в период прохождения основной фазы весеннего половодья в апреле, хотя его доля в процентах от годового стока снизилась. В зоне южной европейской тайги это снижение составило в среднем всего около 5%, а в зоне смешанных лесов 15 – 20%. При этом общий объем половодья, если и уменьшился, то незначительно, за счет более раннего его начала и увеличения продолжительности. Одновременно возрос минимальный сток, в первую очередь в зимний период.

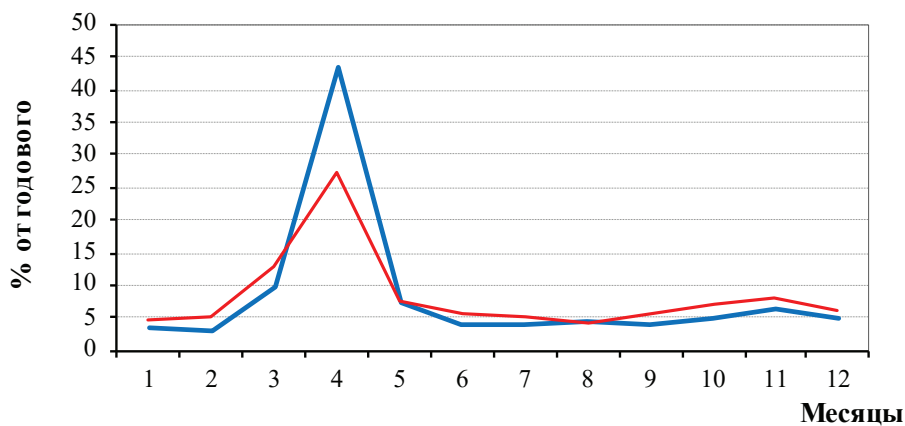


Рисунок 2.24. Осредненный типовой гидрограф стока для малых рек зоны смешанных лесов для периодов 1955 – 1977 годы и 1977 – 2012 годы на примере р. Медвенка – выше впадения р. Закзы, ПВБС, А=21.5 км²

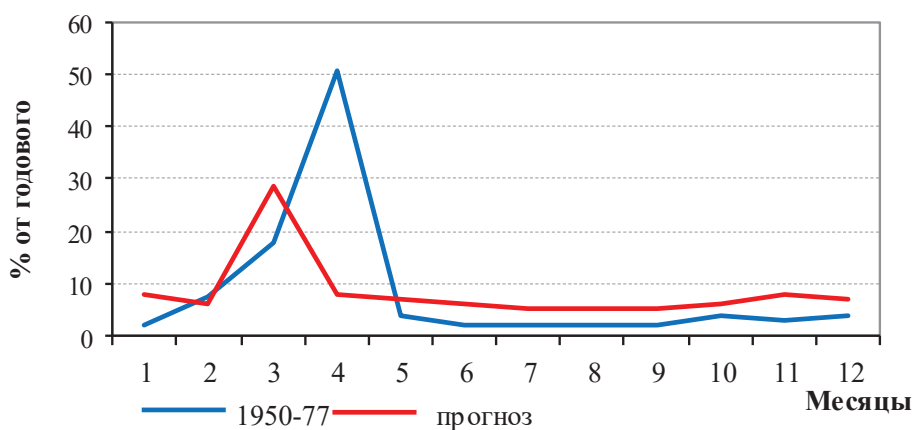


Рисунок 2.25. Осредненный типовой гидрограф стока для постоянных водотоков начального звена гидрографической сети лесостепной зоны (до 100 – 200 км²) на примере р. Девица – п. Товарня для периодов 1955 – 1977 и 1978 – 1993 годы, А=103 км² (с 1994 года пост закрыт)

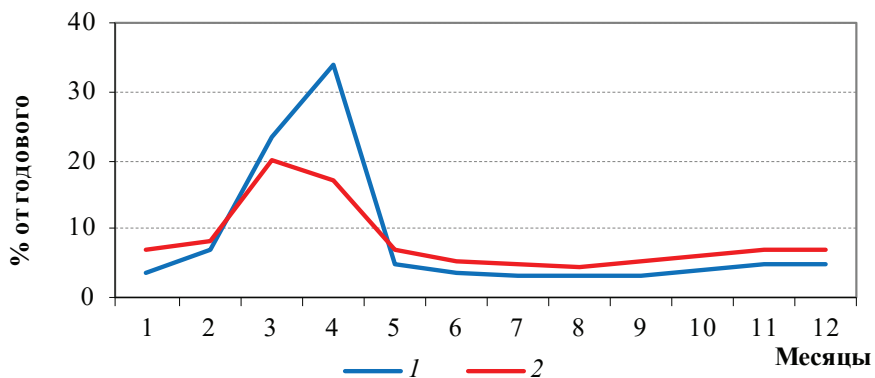


Рисунок 2.26. Осредненные гидрографы годового стока р. Девица – п. Девица ($A=1490 \text{ км}^2$) за периоды 1956 – 1977 (1) и 1978 – 2016 годы (2)

В зоне недостаточного увлажнения фаза максимального стока (половодья) сдвинулась с апреля на март, а его доля в процентах от годового снизилась с 35 – 50% до 20 – 30% в сочетании с 2 – 3-кратным увеличением минимального стока. При этом на реках и водотоках с площадями водосборов до $100 – 200 \text{ км}^2$ половодье формируется чаще всего в феврале – апреле (рисунок 2.25). На реках с большими площадями водосборов половодье обычно проходит, как и в предыдущие десятилетия, в марте–мае, но наибольшая водность наблюдается в марте (рисунок 2.26).

Устойчивость современной конфигурации внутригодового распределения стока воды малых рек, в условиях стабилизации климатической ситуации, представляется достаточно надежной на ближайшую перспективу, хотя соотношения различных фаз водности могут претерпевать некоторые трансформации. Это связано с большой инерционностью перестройки такой сложной системы, какой является речной водосбор.

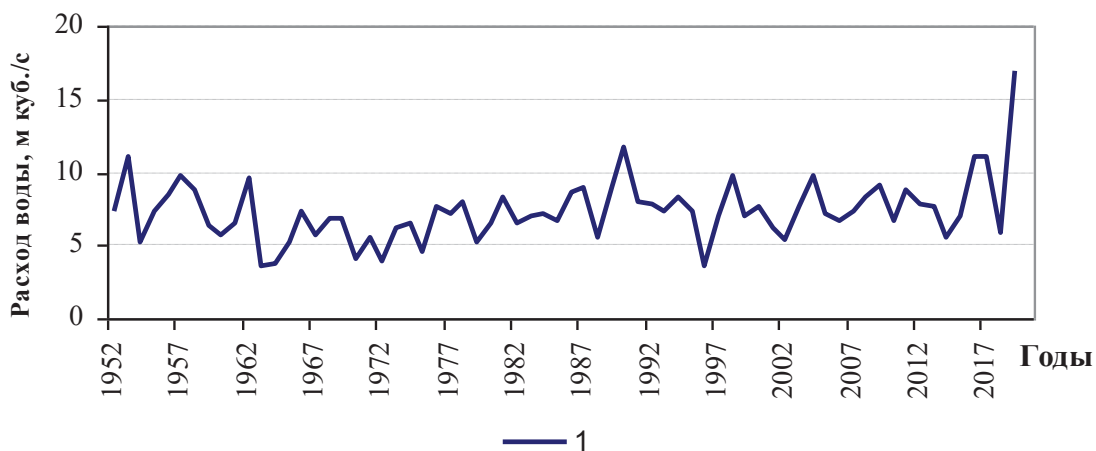


Рисунок 2.27. Многолетние изменения средних годовых расходов воды р. Полometry – п. Яжелбицы (1, $A=631 \text{ км}^2$) с 1952 по 2019 год

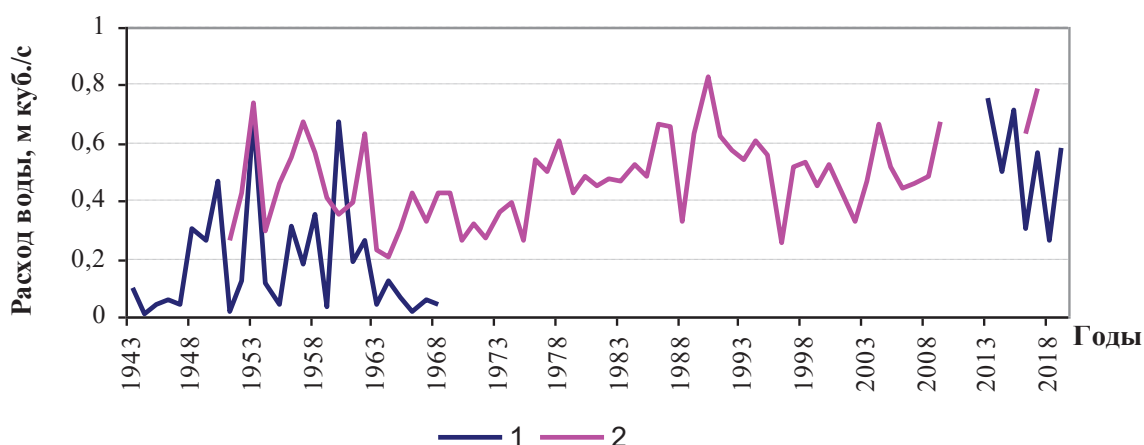


Рисунок 2.28. Многолетние изменения средних годовых расходов воды р. Соминка – п. Дворец (1, $A=33,9 \text{ км}^2$) и р. Лонница – п. Мосолино (2, $A=48,3 \text{ км}^2$)

Годовой сток реки Полометь, водосбор которой расположен на Валдайской возвышенности, в период с 1978 по 2019 год возрос в среднем на 50-60 мм по сравнению с предыдущим периодом (рисунок 2.27), что несколько ниже увеличения осадков за счет повышения в последние десятилетия испарения в регионе. Материалы наблюдений за стоком воды на малых притоках реки Полометь показывают такое же или даже большее увеличение годового стока, что, по-видимому, зависит от гидрогеологических условий конкретного водосбора (рисунок 2.28).

В условиях пусть и незначительного снижения стока весеннего половодья весь прирост стока р. Полометь обусловлен увеличением преимущественно зимнего стока, который возрос в 1.5-2 раза по сравнению с величинами зимнего стока в 1950-е – 1970-е годы (рисунок 2.29).

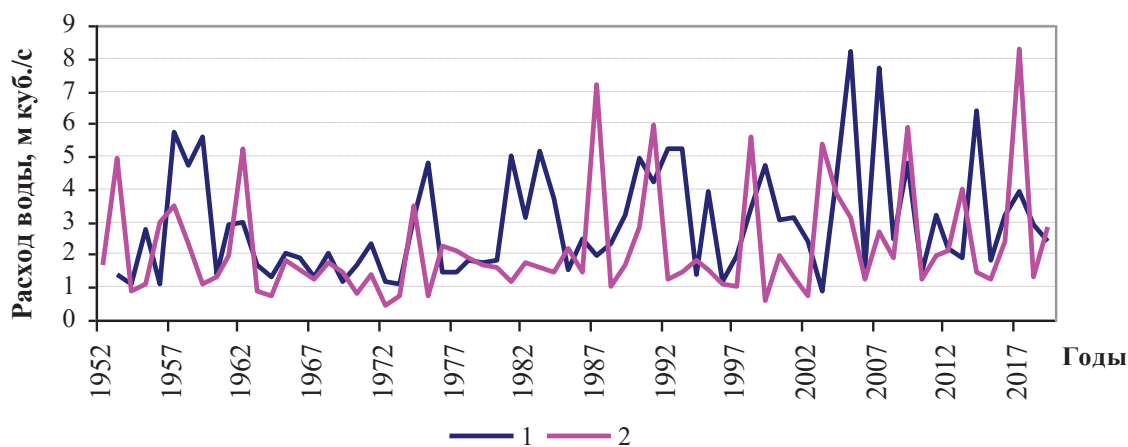


Рисунок 2.29. Многолетние изменения минимальных месячных расходов зимней (1) и летней (2) межени р. Полометь – п. Яжелбицы ($A=631 \text{ км}^2$)

При этом необходимо отметить некоторое снижение стока в сентябре-октябре. Обращают на себя внимание участвовавшие в последние десятилетия случаи исключительно высокого минимального месячного стока воды, особенно в зимний период. При этом устойчивая зимняя и летняя межень в классическом понимании «периодов внутри годового цикла, в течение которых наблюдается низкая водность, возникающая вследствие резкого уменьшения притока воды с водосборной площади», когда «преобладающее значение в речном стоке имеют подземные воды, дренируемые гидрографической сетью» [Чеботарев, 1978], в отдельные годы и даже группы лет может отсутствовать. Такие случаи наблюдались и до 1977 года, но они были сравнительно редкими, в то время как в современных условиях эти явления значительно участились.

Годовой сток р. Медвенка – основного водотока ПВБС (зона смешанных лесов), как и на других реках региона, в течение 1970-х годов скачкообразно возрос со средней величины 170 мм за период с 1947 по 1977 год до 220 мм за период с 1978 по 2011 год (рисунок 2.30). Фактически и здесь налицо квазистационарный и переходный период, что свидетельствует об изменении процессов формирования стока воды.

В 2012, 2013 и 2016 годах на замыкающем створе ПВБС наблюдался исключительно высокий годовой сток воды, не имевший место ранее за весь период наблюдений и достигавший в 2013 году 655 мм. Такой значительный сток можно было бы отнести на счет урбанизации территории водосбора и антропогенного воздействия, в первую очередь сброса сточных вод, особенно значительно возросшего после 2012 года. Однако похожие явления наблюдались в эти годы и на других малых водотоках региона (рисунок 2.31). Кроме того, высокий годовой сток в течение 1-3 лет на этих реках сменяется быстрым падением до минимальных значений, что вряд ли может быть обусловлено прекращением сбросов воды. Поэтому для таких случаев требуется более подробный анализ причин их возникновения.

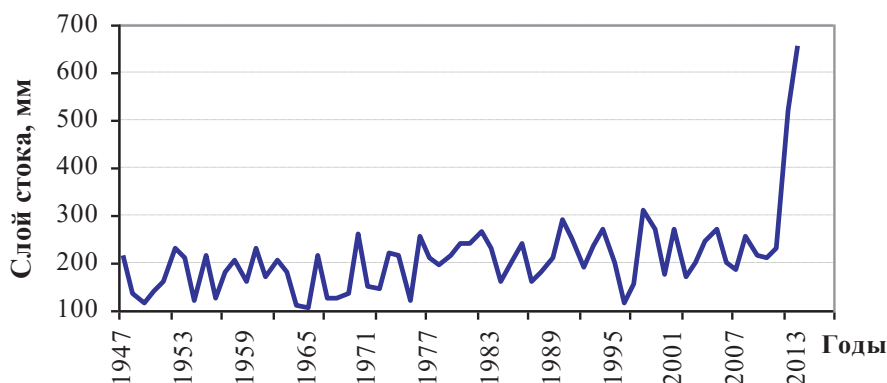


Рисунок 2.30. Многолетние изменения годового стока р. Медвенка – выше впадения р. Закзы ($A=21.5 \text{ км}^2$) за период 1947 – 2016 годы (зона смешанных лесов)

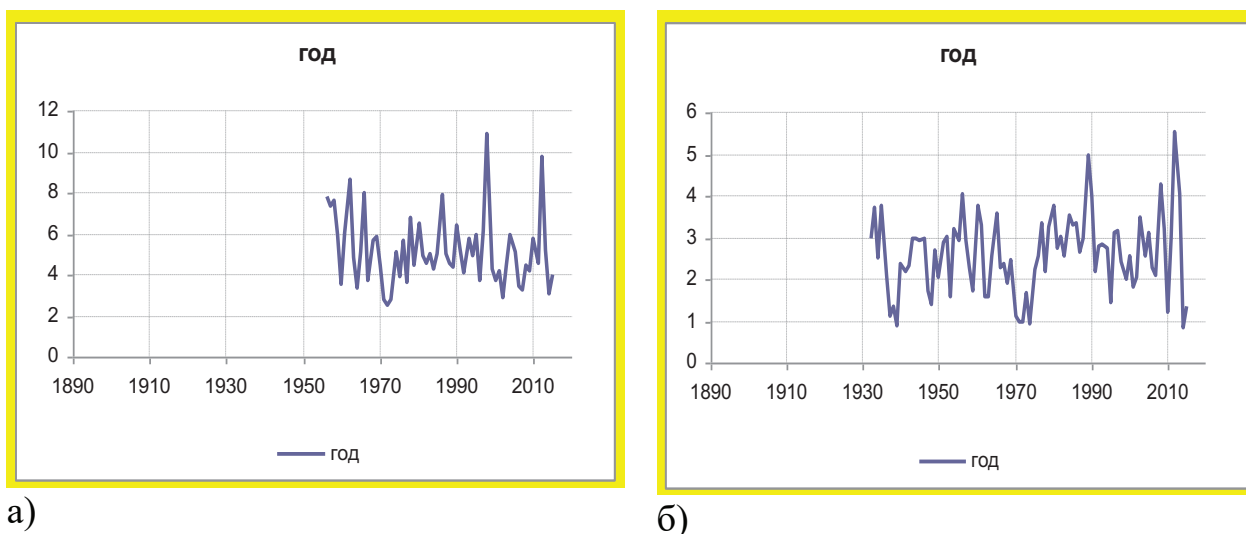


Рисунок 2.31. Многолетние изменения годового стока р. Соть – д. Верхний Жар (а, $A=683 \text{ км}^2$) и р. Молога – д. Ильицыно (б, $A=396 \text{ км}^2$)

Повышение температуры воздуха в холодный период года и, как следствие, снижение глубины промерзания почв привели к росту потерь стока весеннего половодья в последние десятилетия, несмотря на увеличение влагозапасов в почвогрунтах. Распластывание половодья и уменьшение коэффициентов его стока повлекло снижение в 2 – 3 раза модулей максимальных расходов воды половодья, суточные величины которых в последние 20 лет на р. Медвенка – выше впадения р. Закзы не превышают 200 – 300 л/с км² (рисунок 2.32). Коэффициенты стока весеннего половодья р. Медвенки снизились в среднем с 0,5 – 0,8 до 0,3 – 0,4. В отдельные годы, например в 1999 г., высокие коэффициенты стока по-прежнему возможны, хотя и при сравнительно невысоких максимальных расходах. Потери стока весеннего половодья одновременно являются источником дополнительного питания подземных вод и причиной повышения меженного стока.

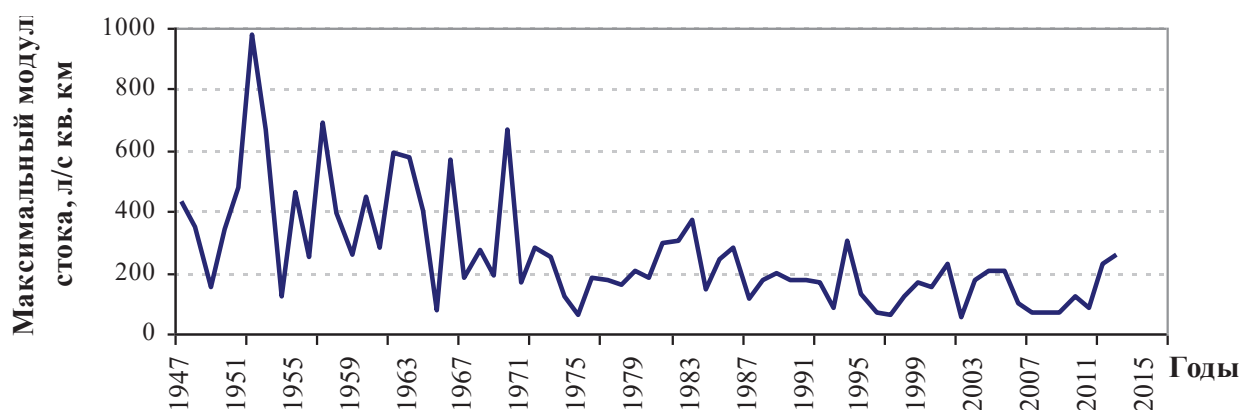


Рисунок 2.32. Изменения максимального модуля стока весеннего половодья р. Медвенка – выше впадения р. Закзы за период с 1947 по 2016 год

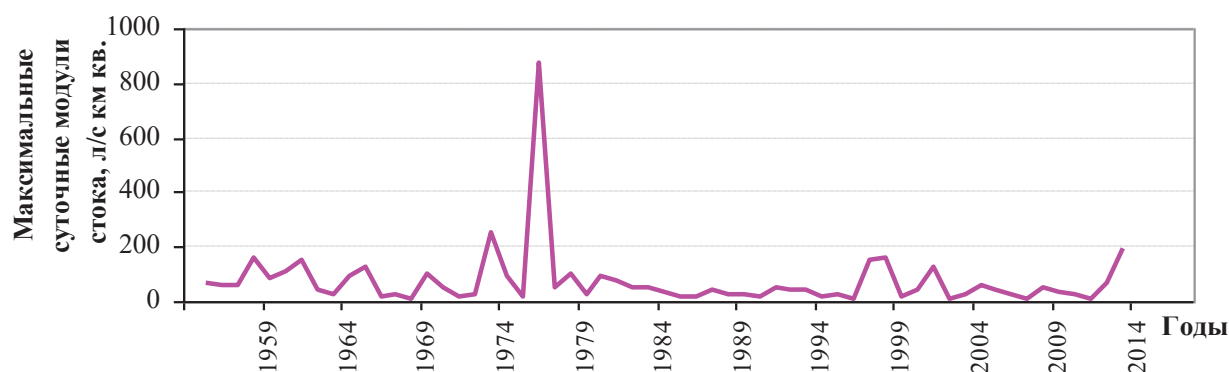


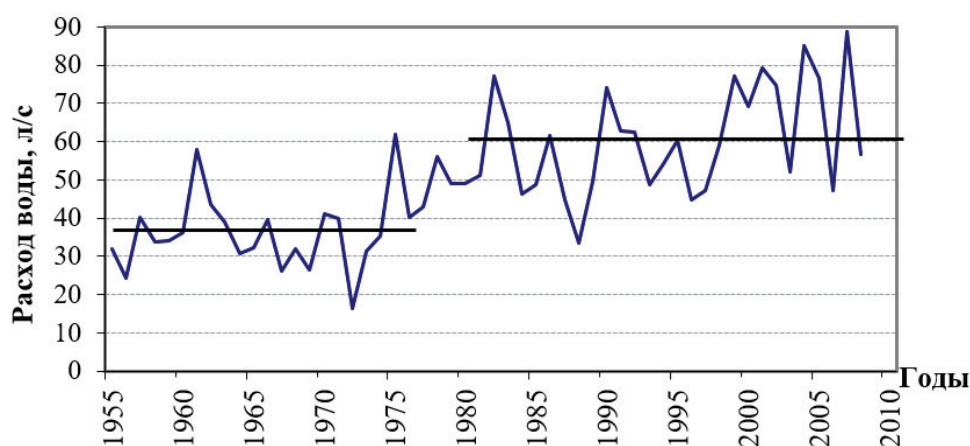
Рисунок 2.33. Изменения максимального суточного максимального модуля стока дождевых паводков р. Медвенка – выше впадения р. Закзы

В то же время максимальные расходы дождевых паводков в последние годы становятся здесь вполне сопоставимыми с весенними максимумами. Необходимо отметить, что в случае выпадения ливневых осадков, близких по слою и интенсивности осадкам 19.07.1976 г., в современных условиях уменьшения свободной емкости бассейна можно ожидать формирование максимального расхода, приближающегося по величине к максимальным расходам весеннего половодья (рисунок 2.33).

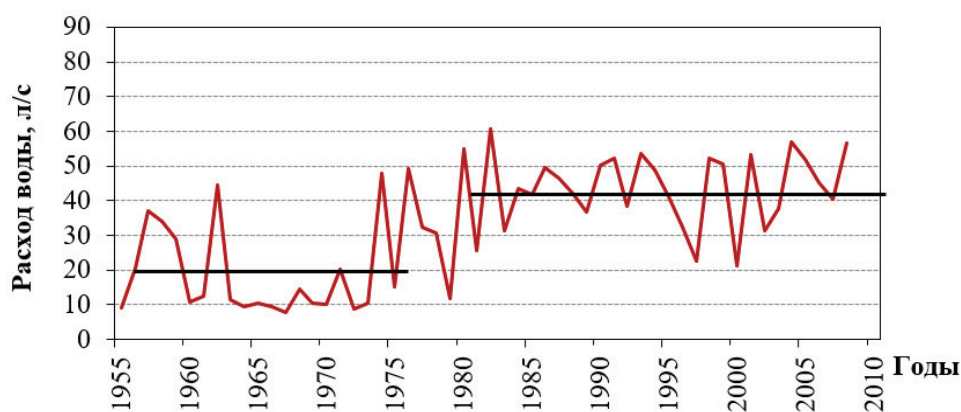
Устойчивая летне-осенняя межень в последние десятилетия наблюдается только в отдельные годы, а ее продолжительность колеблется от нескольких суток до двух – трех недель. Даже в аномально жаркое и засушливое лето 2010 года устойчивая летняя межень продолжалась всего около месяца.

Наиболее значительное увеличение меженного стока в районе ПВБС наблюдается в зимний период. На рисунке 2.34 приведены изменения минимальных летних и зимних месячных расходов воды за период с 1955 по 2009 год. В период 1978 – 2009 гг. средние месячные минимальные расходы возросли в среднем до 50 – 80 л/с. Зимняя межень при оттепелях в последние десятилетия прерывается невысокими, но многочисленными зимними паводками, во время которых средние суточные расходы воды превышают 100 л/с. Необходимо отметить значительное повышение изменчивости минимального стока в 1980-е – 2000-е годы. В отдельные годы последнего десятилетия, как уже отмечалось выше, зимняя и летне-осенняя межень также отсутствует. Поэтому для сохранения наглядности минимальные зимние и летне-осенние месячные минимумы ряда последних лет на рисунок 2.32 не помещены.

Минимальные зимние и летние суточные расходы воды также увеличились в 2 – 3 раза, что свидетельствует о возросшей доле подземного питания. Даже в период засухи 2010 года минимальные летние расходы воды не опускались ниже 30 л/с, что в 1.5 – 2 раза выше, чем в 1950-е – 1970-е годы.



а)



б)

Рисунок 2.34. Динамика многолетних изменений наименьших зимних (а) и летних (б) месячных расходов воды в створе р. Медвенки – выше впадения р. Закзы по наблюдениям с 1955 по 2010 год

Средняя разница между минимальными зимними и летними расходами стабильна и составляет более 10 л/с, что вызвано расходом влаги на испарение с поверхности почвы летом и повышенным внутripочвенным стоком зимой. Суточные минимальные расходы воды менее стабильны, чем месячные, однако и они в последние десятилетия не опускались ниже 20 л/с, а с 2005 года – ниже 40 л/с.

Общая тенденция большего возрастания минимальных зимних расходов воды сравнительно с летними минимумами связана с дополнительным питанием стока за счет формирования внутripочвенной верховодки при оттепелях, которая формируется на границе почвенных горизонтов (иллювиальный слой здесь имеет водопроницаемость 0,002-0,005 мм/мин). В качестве примера формирования внутripочвенного стока на рисунке 2.35 приведен график хода средних суточных температур воздуха и стока воды на полевой воднобалансовой площадке ПВБС в зимний и начальный весенний период 2006-2007 годов.

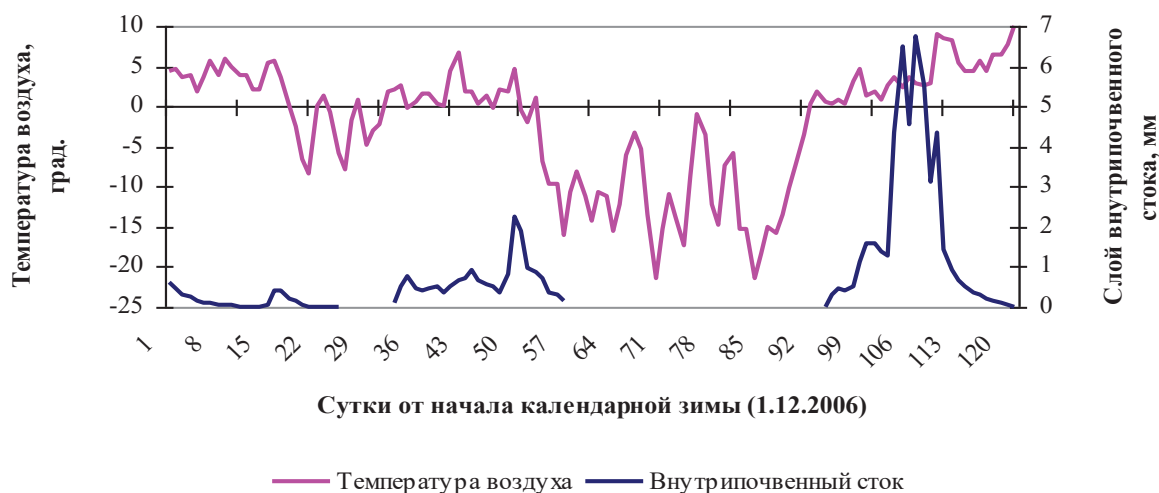


Рисунок 2.35. Внутрипочвенный сток на полевой площадке ПВБС в период с 1.12.2006 г. по 31.03.2007 г.

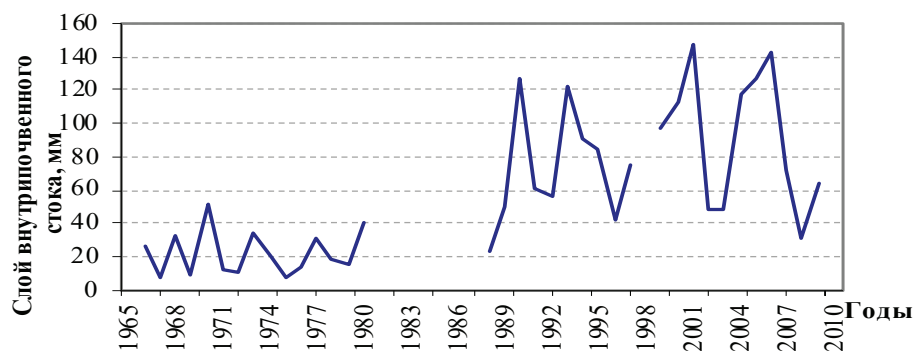


Рисунок 2.36. Многолетние изменения годового слоя внутрипочвенного стока по данным наблюдений на полевой воднобалансовой площадке ПВБС

Вклад внутрипочвенной верховодки в формирование стока воды с полевых участков возрос в среднем почти в 3 раза, а в отдельные годы и существенно более (рисунок 2.36).

При этом основная часть внутрипочвенного стока по-прежнему формируется в период весеннего половодья при условии, когда поступление тепла из нижних слоев почво-грунтов в течение достаточно продолжительного периода превышает поток холода с поверхности, и при наличии избыточного увлажнения зоны аэрации. Поэтому основным фактором формирования верховодки, наряду с интенсивностью, является продолжительность оттепелей. Повышение содержания влаги в зоне аэрации привело к более частым случаям формирования верховодки

на полевых участках (хотя и в незначительных объемах) также и в летний период года. Только в особо засушливые годы это явление в июне-августе не наблюдается.

Внутрипочвенный сток в лесах при интенсивных оттепелях также формируется, но он заметно ниже стока с полевых частей водосборов за счет повышенной скважности почв, что подтверждается данными наблюдений на лесной воднобалансовой площадке ПВБС. Интенсивное развитие верховодки является препятствием для питания грунтовых вод, поэтому в зоне питания подземных вод в приводораздельных частях водосборов можно наблюдать отсутствие роста их уровня в зимний период, а в отдельные годы даже снижение. В то же время на залесенных частях водосборов в периоды оттепелей питание грунтовых вод возрастает.

Необходимо напомнить, что наблюдения за внутрипочвенным стоком по данным воднобалансовых площадок дают завышенную его величину, особенно при небольших размерах площадок, как было указано в Главе I, и могут рассматриваться только как индикатор изменений этой составляющей стока. Надо также иметь в виду, что формирование внутрипочвенного стока в лесах различного видового состава зависит от сочетания мощности и механического состава элювиального и иллювиального горизонтов почв, наличия или отсутствия орштейнового горизонта и т.д.

Важным показателем гидрологического режима являются спадовые кривые. Кривая спада в интегральной форме описывает, как различные факторы на водосборе влияют на формирование стока воды в сухие периоды. Поэтому она используется во многих областях: для управления водными ресурсами, при прогнозировании низкого стока на реках, где имеются наблюдения, а также в качестве индекса дренирующей способности в моделях «осадки–сток», как показатель регулирующей способности водосбора в региональных регрессионных моделях, при анализе гидрографа для выделения различных компонентов стока, и в статистическом анализе для оценки индексов низкого стока. В нашем случае спадовые кривые представляют интерес как показатель регулирующей способности водосбора.

На рисунке 2.37 представлены осредненные спадовые кривые стока р. Медвенка – выше впадения р. Закзы за периоды 1955-1977 годы и 1978-2010 годы. В последние десятилетия свободная емкость этого водосбора снизилась примерно на 50 мм за счет заполнения горизонтов подземных вод (что подтверждается также и повышением уровней грунтовых вод на 1,5-2,0 м в период действия скважин грунтовых вод до начала 1990-х годов), а также в связи с повышением увлажнения зоны аэрации. Следует отметить, что эта величина соответствует средней величине увеличения осадков. Снижение свободной регулирующей емкости водосбора, определяющей формирование поверхностного стока, неизбежно ведет к тому, что снижаются потери осадков на пополнение дефицита влаги и усиливается чувствительность его реакции на поступление талых вод и выпадение жидких осадков.

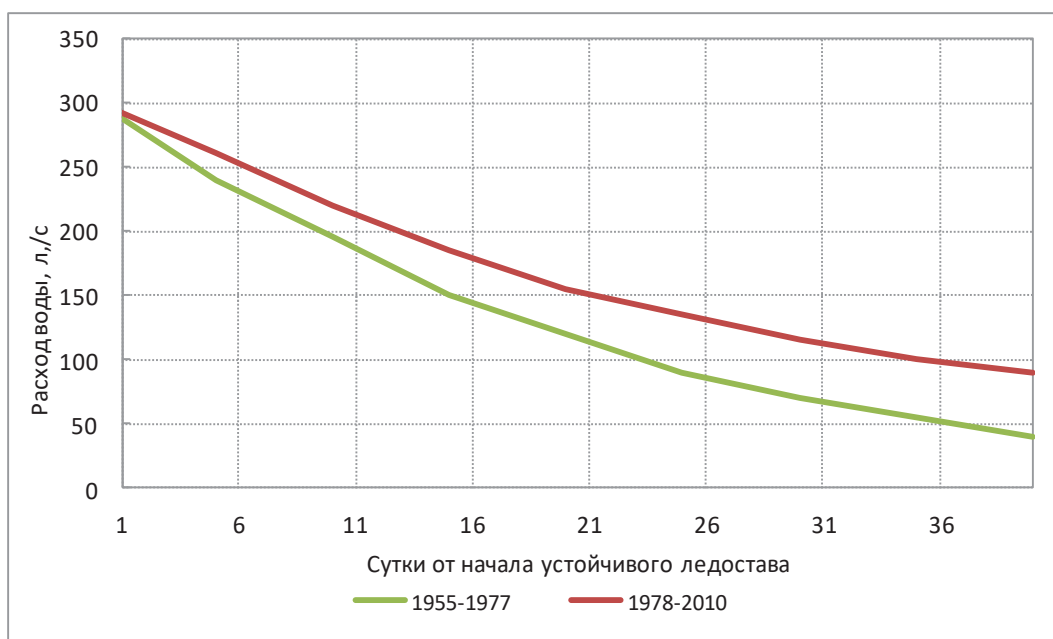


Рисунок 2.37. Осредненные спадовые кривые весеннего половодья р. Медвенка – выше впадения р. Закзы за периоды 1955-1977 годы (зеленая кривая) и 1978-2010 годы (коричневая кривая)

При этом объем общей, регулирующей сток воды, емкости бассейна увеличился на такую же величину.

Уравнения спада в общем виде обычно имеют вид $Q_t = Q_0 e^{-at}$, где Q_t – расход воды в момент t , Q_0 – начальный расход, e – основание натурального логарифма, a – постоянная. Для осредненного спада гидрографа весеннего половодья для периодов 1955 – 1977 годы и 1978 – 2010 годы эти уравнения имеют вид, соответственно:

$$Q_t = 297 e^{-0.5t} \quad (2.1)$$

$$Q_t = 313 e^{-0.3t}, \quad (2.2)$$

где Q_0 – 297 л/с для первого периода и 313 л/с для второго периода; t – время спада.

В более южных зонах недостаточного увлажнения – лесостепной и степной – на малых реках в целом в течение нескольких десятилетий наблюдались те же процессы значительного увеличения меженного стока, снижения почти в 2 раза максимальных расходов весеннего половодья и расплывания его гидрографа.

Годовой сток на малых водотоках изменился здесь ступенчато, аналогично изменению годового стока в лесной зоне, но только в сторону его снижения (рисунок 2.38). При этом на реках, дренирующих основные постоянно действующие водоносные горизонты, снижение годового стока менее заметно, чем на водотоках начального звена гидрографической сети, которые в последние десятилетия

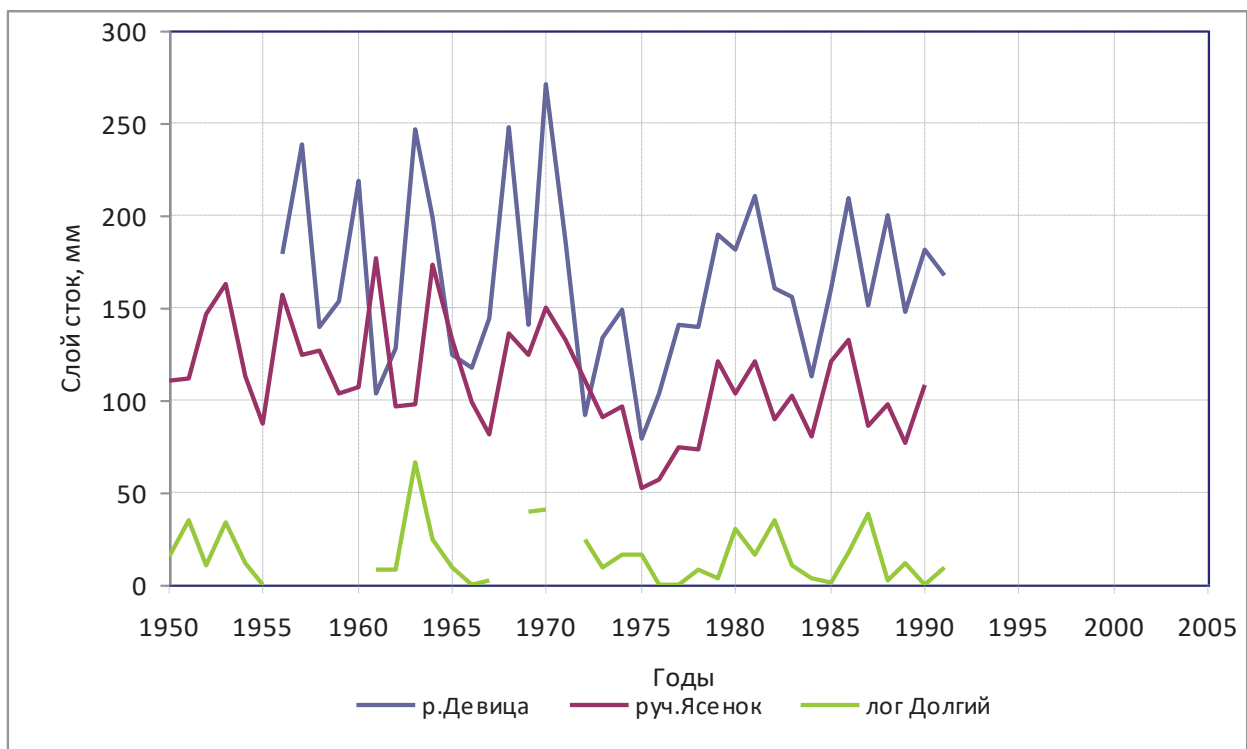


Рисунок 2.38. Многолетние изменения годового стока воды на водотоках Нижнедевицкой ВБС (р. Девица – ст. Товарня, $A=103 \text{ км}^2$; руч. Ясенок, $A=21.7 \text{ км}^2$, закрыты в 1990-м году; лог Долгий $A=2.57 \text{ км}^2$, в последние десятилетия сток воды наблюдался спорадически в отдельные годы)

сильно деградируют. В начальный период формирования современной климатической ситуации с конца 1970-х до середины 1990-х годов в полуаридной зоне на малых реках наблюдался незначительный рост годового стока, в то время как на водотоках с неполным дренированием подземных вод годового стока снижался [Zhuravin, 2002].

Такое различие в тенденциях изменений стока свидетельствует о существенной роли питания малых рек из подземных горизонтов. Другой вывод связан с широко практикуемым при гидрологических расчетах методом аналогии. Как правило, основными критериями при их выборе являются соотношение площадей водосборов, высотные отметки и уклоны. Неполное дренирование обычно компенсируется табличными поправками, которые, во-первых, далеки от истинных значений, и, во-вторых, давно устарели.

На временных водотоках (логах и балках) лесостепной зоны по данным наблюдений Нижнедевицкой ВБС на логу Долгий ($A=2.57 \text{ км}^2$) с 2004 года поверхностный сток не наблюдался даже в период весеннего половодья. Последний раз сток здесь был зафиксирован в 2003 году и составил 17,7 мм. Следует отметить, что 44% водосбора лога Долгий занято лесом.

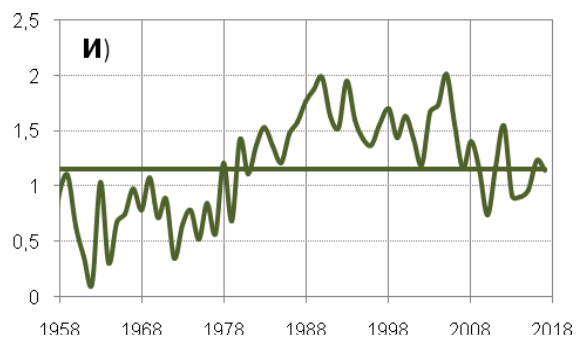
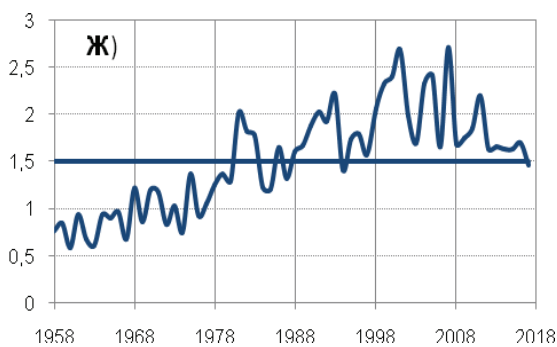
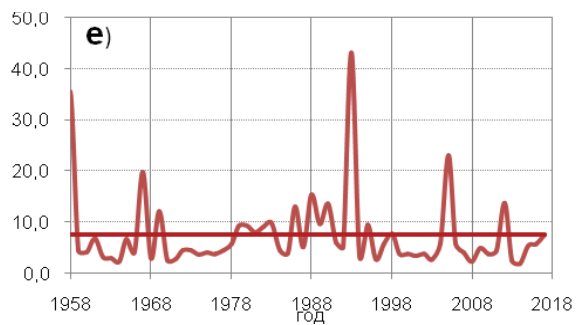
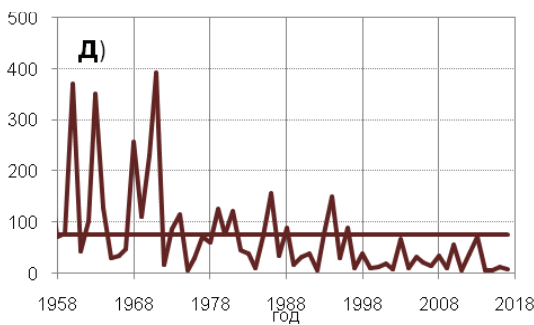
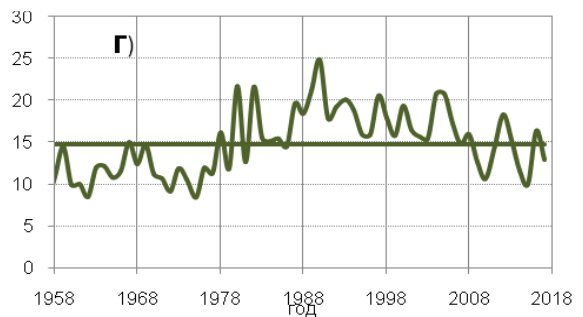
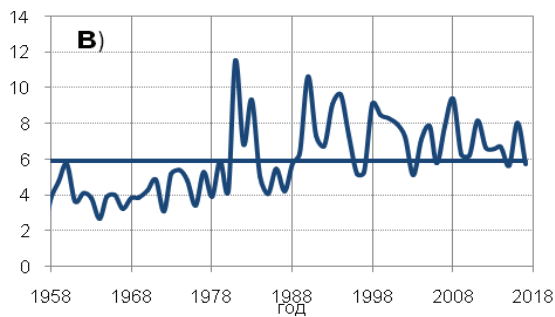
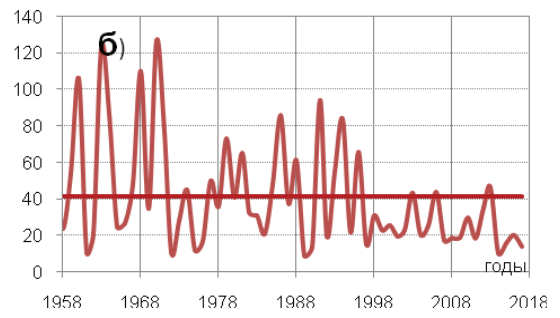
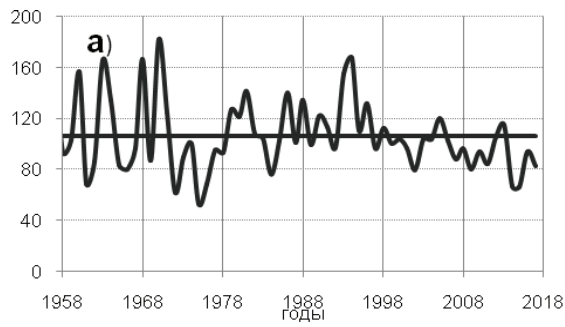


Рисунок 2.39. Изменения различных характеристик стока воды р. Девица – с. Девица ($A=1490 \text{ км}^2$) за период с 1958 по 2017 год: а – годовой слой стока (мм), б – слой стока за половодье (мм), в – слой стока за зимний период (мм), г – слой стока за летне-осенний период (мм), д – максимальный модуль стока весеннего половодья (л/с км^2), е – наибольший модуль стока дождевого паводка (л/с км^2), ж – наименьший модуль стока за зимний период (л/с км^2), и – наименьший расход открытого русла (л/с км^2)

Ввиду прекращения наблюдений на постоянных водотоках Нижнедевицкой ВБС к анализу были привлечены данные наблюдений на п. Девица, расположенном ниже по течению реки, в верховьях которой расположена станция. Многолетние изменения различных характеристик стока р. Девица приведены на *рисунке 2.39*.

В многолетних изменениях годового стока р. Девицы – п. Девица ($A=1490 \text{ км}^2$) прослеживаются два периода (*рисунок 2.39а*). Первый из них имеет продолжительность от начала наблюдений в 1958 году до середины 1970-х годов. Этот период характеризуется чередованием лет низкой и высокой водности со слоями годового стока от 80 до 140 мм. Доминирующей фазой стока является весеннее половодье, доля которого в годовом стоке также колеблется в широких пределах от 20% до 80% его величины (*рисунок 2.39б*). В среднем доля стока весеннего половодья в годовом стоке в этот период превышает 60%. Весеннее половодье часто сопровождалось высокими максимальными модулями суточного стока, достигавшими 300 – 400 л/с км^2 . Слой зимнего меженного стока был низким и составлял 3 – 6 мм (*рисунок 2.39в*). Летний меженный сток был примерно в 2 – 2,5 раза выше (8 – 15 мм) за счет пополнения в ходе формирования половодья верхнего водоносного горизонта и его постепенной сработки в летний сезон (*рисунок 2.39г*).

Второй период начался со второй половины 1970-х годов и длится по настоящее время. Его, в свою очередь, можно разделить на две части. Первая часть периода продолжительностью до конца 1990-х – начала 2000-х годов характеризуется в среднем сравнительно высоким годовым стоком, но с меньшей амплитудой колебаний, преимущественно от 80 до 140 мм (от 70 до 170 мм в отдельных случаях). При этом доля стока весеннего половодья в годовом стоке снизилась до 30 – 40%. Одновременно зимний и летний меженный сток возрос в 1,5 – 2 раза. Максимальные суточные модули стока весеннего половодья не превышали 150 л/с км^2 .

Во второй части периода, в который попадает особо выделенное рядом авторов маловодье 2007 – 2015 годов, наблюдалось постепенное снижение годового слоя стока в среднем до 80 – 90 мм (всего 2 случая годового слоя стока около 120 мм). Доля весеннего половодья в годовом стоке в эту часть периода понизилась до 20 – 25%. Максимальные суточные модули стока составляли в этой части периода не более 80 л/с км^2 . Зимний меженный сток сохранился на стабильно высоком уровне, в то время как летний меженный сток снизился за счет существенного уменьшения питания верхнего водоносного горизонта в теплый период.

В целом ситуация, сложившаяся на водосборе р. Девица, свидетельствует о существенном снижении поверхностного стока и значительном возрастании роли подземных вод в режиме стока реки. Весеннее половодье, несмотря на его снижение, остается наиболее многоводной фазой стока, но основная часть поступающей на поверхность водосборов влаги в период его формирования, расходуется на инфильтрацию и пополнение подземных вод. На фоне снижения стока весеннего

половодья возросла роль дождевых паводков, особенно выпадающих на спаде половодья или сразу после него. Однако максимальные модули их стока в своем большинстве все равно ниже максимальных модулей половодья (для р. Девицы почти на порядок).

На временных водотоках степной зоны значительный поверхностный сток наблюдался вплоть до 2008 года, преимущественно в период весеннего половодья. Особенно значительный сток был в 2004 – 2007 годах, что связано с исключительно высоким уровнем стояния грунтовых вод вплоть до 1,5 м от поверхности даже в зонах питания и транзита подземных вод, с периодическими выходами грунтовых вод на поверхность в зоне их разгрузки (см. раздел, посвященный подземным водам). После 2008 года, вместе с падением уровней грунтовых вод, резко понизился сток воды, который в последние 10 лет не превышал 10 – 20 мм, за исключением 2018 года, когда он составил 66 мм (рисунки 2.40).

В этом году максимальное промерзание почвы по данным наблюдений на мерзлотомерах составило 40 – 45 см, запасы воды в снеге составили 91 мм, а запасы воды в верхнем метровом слое почвы достигали 340 – 370 мм, то есть выше наименьшей полевой влагоемкости. Весеннее половодье характеризовалось высокой интенсивностью снеготаяния и сопровождалось выпадением значительного количества преимущественно жидких осадков (около 25 мм). Сочетание этих факторов привело к формированию такого значительного поверхностного стока воды. То есть погодные «выбросы» и их гидрологические последствия на фоне общих тенденций сохраняют достаточно высокую вероятность. В 2019 году, несмотря на высокие запасы воды в снеге к началу весеннего снеготаяния (около 120 мм), слой стока половодья составил менее 8 мм.

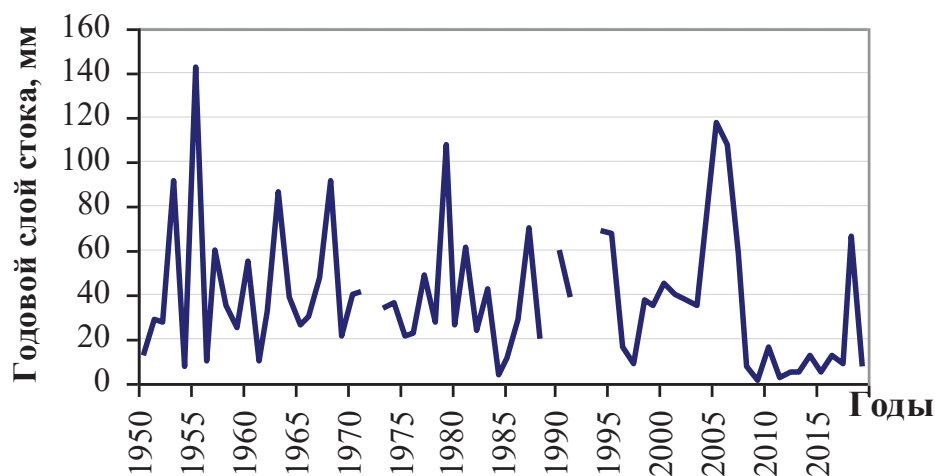


Рисунок 2.40. Многолетние изменения годового стока воды балки Степная ВБС Каменная Степь с 1950 по 2019 год ($A=1.92 \text{ км}^2$)

Следует принять во внимание, что высокий слой стока весеннего половодья при разработке схем его долгосрочного прогноза обычно связывался только с формированием «запирающего слоя» в почве. Высокие уровни стояния грунтовых вод в этих схемах не учитывались [Вершинина и др., 1985; Комаров, 1980 и др.], поскольку такое явление в полуаридной зоне ранее не наблюдалось.

Показателем снижения доли поверхностного стока в полуаридных зонах является деградация начальной гидрографической сети. Снижение ее длины в центральной части ЕТР к середине 1990-х годов в результате антропогенных воздействий и влияния изменений климата составило 15 – 50% [Иванова Н. Н. и Ларионов Г. А., 1996]. Длина имеющего постоянный сток в течение всего года руч. Ясенок на Нижнедевицкой ВБС к 1985 году уменьшилась на 0,8 км с 3 км до 2,2 км [Материалы ..., 1986].

Деградация малых ручьев и рек лесостепной зоны в последние десятилетия подтверждается результатами ландшафтных исследований. В частности, в работе [Дмитриева, Жигулина, 2020] указано, что длина р. Ольшанки (приток р. Девицы) за период с 1964 по 2008 год сократилась на 4 км, а общая длина самой р. Девица к настоящему времени составляет 80 км и с 1964 года уменьшилась на 9 км. Учитывая то обстоятельство, что длина тальвега и русла р. Девицы у ст. Товарня, которая являлась замыкающим створом НДВБС, в конце 1960 – начале 1970-х годов составляла 16,5 км, сейчас она должна быть всего 7,5 км. В статье нет описания методики определения изменения длины водотоков и можно предположить, что приведенные данные могут быть несколько завышены. Однако и в этом случае изменения очень значительны.

Авторы увязывают явление деградации верхних звеньев русловой сети с засушливым периодом 2006-2015 годов. Однако годовые суммы осадков в этот период в среднем были близки по величине или превышали годовые суммы осадков, наблюдавшихся в конце 1940-х – начале 1960-х годов, и причина, по нашему мнению, кроется в перестройке системы влагооборота на снижение доли весеннего стока и возрастание роли грунтовых и подземных вод в питании рек, что особенно сильно сказывается на малых водотоках, дренирующих преимущественно грунтовые воды верхнего горизонта. Такое явление характерно даже в случае глубокого вреза долины и частичного дренирования горизонта подземных вод малым водотоком, что наблюдается, к примеру, на руч. Ясенок.

При этом снижение доли весеннего стока заключается не только в уменьшении его слоя, но и в снижении максимальных расходов, а вместе с ними и размывающих скоростей потоков, что способствует зарастанию и деградации в первую очередь истоков и верхних участков русел водотоков начального звена гидрографической сети. Поэтому при существующей тенденции изменения климата, даже при некотором увеличении осадков, не следует ожидать восстановления гидрографической сети.

Следует напомнить, что в свое время Б. В. Поляковым и Б. П. Пановым была установлена линейная связь между густотой русловой сети и нормой стока для ЕТР

[Поляков, 1946; Панов, 1954]. Позже такие зависимости были получены для Дальнего Востока [Карасев, Лобанова, 1981]. То есть уменьшение густоты русловой сети является косвенным, но неоспоримым свидетельством снижения водности регионов, где оно наблюдается.

Это явление связано с уменьшением доли поверхностного стока, причины которого рассмотрены ниже. В лесной зоне эти процессы менее заметны из-за более высокой водности и существенно меньших по площади распространения полевых участков водосборов.

2.4 Переходный период в перестройке системы влагооборота водосборов

Сложность и инерционность перестройки процессов системы влагооборота на водосборах начального звена гидрографической сети в результате воздействия многолетних изменений климата в полуаридной зоне можно проследить на примере ВБС Каменная Степь за период со времени организации станции в 1950 году по 2017 год. Типичный ландшафт в районе балки Степная представлен на *фото 2.1*.



Фото 2.1. Типичный ландшафт водосборов ВБС Каменная Степь. Район водосбора балки Степная. На первом плане начальник станции Н. С. Кожухарь.

Таблица 2.1 – Соотношения основных составляющих водного баланса (мм) балки Степная, осредненные за 1950 – 1977 годы и отдельные периоды с 1978 по 2017 год

Период, годы	Годовая температура воздуха, °С	Осадки	Испарение с поверхности почвы	Поверхностный сток	Потенциальная инфильтрация	Уровни грунтовых вод, м (скв. на рисунке 2.18)
1950-1977	5,6	537	275	42	220	6,5
1978-1995	6,1	577	315	(44)	(228)	3,5
1996-2007	7,0	636	405	57	174	2,5
2008-2017	7,7	600	356	8	236	5,5

Примечание:

осадки были откорректированы на ветровой недоучет, смачивание и испарение из осадкомерного ведра; в период 1978 – 1995 годы были перерывы в наблюдениях за стоком воды

Элементы водного баланса носят характер индикаторов, поскольку испарение и осадки были измерены на метеоплощадке, а сток воды на балке Степной. Такой подход обусловлен исключительно наличием информации в современный период, но, как мы полагаем позволяет проанализировать причины и следствия изменений процессов формирования стока воды в различные временные отрезки за период наблюдений. При наличии более подробной информации расчет инфильтрационного питания грунтовых вод на водосборе мог быть рассчитан более точно по методу водного баланса зоны аэрации, изложенному в [Вольфцун, 1972].

В *таблицу 2.1* для наглядности общих тенденций за последний период включены данные по 2017 год. В 2018 году, как было отмечено выше, сложились погодные условия, сформировавшие достаточно глубокое промерзание почвы и высокое содержание влаги в верхнем ее слое. Годовая сумма осадков со всеми поправками составила на метеостанции 636 мм, испарение с поверхности почвы – 380 мм, поверхностный сток – 66 мм, потенциальная инфильтрация – 190 мм. Однако в следующем 2019 году выпало всего 532 мм осадков, испарение составило 384 мм, сток был менее 8 мм, в результате чего потенциальная инфильтрация не превысила 140 мм. Обращает на себя внимание то, что инфильтрация в эти годы была существенно ниже средних значений за 2008 – 2017 годы и можно ожидать соответствующую реакцию уровней воды водоносных горизонтов. В среднем за период 2008 – 2019 год годовые суммы осадков составляют 597 мм, испарение – 360 мм, сток – 13 мм, потенциальная инфильтрация – 224 мм.

Следует сделать некоторые уточнения относительно примененного нами термина «потенциальная инфильтрация». Фактически эта величина является простой балансовой разницей между наблюдаемыми осадками, испарением с поверхности почвы и стоком. Реальная величина инфильтрации несколько ниже «потенциальной», поскольку не учтено поверхностное задержание влаги растительным покровом и микрорельефом, хотя, по оценкам разных авторов, безвозвратные потери на поверхностное задержание в условиях пахотных земель лесостепной и степной зон составляет около 5 мм. Кроме того, осадки были приняты по данным наблюдений по осадкомерному пункту, расположенному на метеостанции, где измеренные величины были исправлены на все виды поправок, а испарение – по данным наблюдений на почвенно-испарительной площадке с луговой растительностью, величина которого может быть занижена на 10 – 15% [Бочков, 1974] и не учитывает различия в реальном испарении и транспирации с сельхозкультур. Однако для наших целей важны не столько абсолютные величины изменений балансовых соотношений, хотя это было бы предпочтительней, а тенденции их изменений.

Первый временной отрезок, который считается квазистационарным, имеет продолжительность с начала наблюдений на балке Степная в 1950 году по 1977 год. Этот период характеризуется наиболее низкими средними годовыми и зимними температурами воздуха, невысокими средними годовыми суммами осадков и испарения с поверхности почвы при относительно высоком в среднем поверхностном стоке воды.

Характерные процессы формирования основной фазы стока – весеннего половодья – для этого периода достаточно подробно изучены с использованием материалов наблюдений воднобалансовых станций и Донской экспедиции ГГИ, работавшей в регионе с 1969 по 1975 год, а также лабораторных экспериментов. Они подробно проанализированы в многочисленных статьях, а также в монографиях В. Д. Комарова [Комаров, 1959], Л. К. Вершининой с соавторами [Вершинина и др., 1985] и др. В ряду этих процессов важнейшее место занимают криогенное регулирование процессов миграции влаги, протекающих в зоне аэрации почво-грунтов при ее промерзании, и формирование ледяной корки на поверхности почвы.

Процесс инфильтрации талой воды в мерзлую почву Л. К. Вершининой с соавторами разделен на 4 фазы или стадии: убывающая скорость фильтрации – отсутствие фильтрации – нарастающая скорость фильтрации – установившаяся скорость фильтрации. Для условий талых почво-грунтов характерны только первая и последняя фазы. При формировании «запирающего» слоя наблюдаются также специфические «поршневые» эффекты, которые происходят в период промерзания почвы, когда объем замерзшей воды увеличивается на 9% и часть избыточной влаги отжимается в нижележащие горизонты почво-грунтов [Вершинина и др., 1985]. В то же время ниже

границы промерзания формируется зона пониженного давления, препятствующая фильтрации влаги [Zhuravin, Markov, 2010], а после оттаивания почвы при выравнивании давления происходит всасывание воды из микропонижений в зону аэрации и, по-видимому, поршневое «проталкивание» влаги в нижние слои почво-грунтов и в зону, расположенную ниже верхнего водоносного горизонта, часто не имеющего сплошного распространения. Эти процессы пока еще недостаточно изучены.

Криогенное регулирование формирования стока весеннего половодья, то есть образование «запирающего» слоя в почво-грунтах, даже в период до 1977 года происходило примерно в 50 – 60% случаев (лет). Чередование лет с наличием и отсутствием водонепроницаемого слоя в почве наблюдалось в районе Нижне-девицкой ВБС как в единичные годы, так и сериями по 2 – 3 года подряд. В годы с наличием такого слоя коэффициенты стока весеннего половодья колебались в пределах от 0,70 до 0,92. Только в 1972 году он составил 0,33 ввиду большой продолжительности формирования половодья (67 суток). При отсутствии «запирающего» слоя коэффициенты стока весеннего половодья колебались от 0,22 до 0,50 в зависимости от дружности снеготаяния и наличия ледяной корки на поверхности почвы [Вершинина и др., 1978].

Таким образом, в период до 1977 года происходило чередование лет с высоким поверхностным стоком, низкими величинами инфильтрации и, соответственно, незначительным (до 20-25 мм) питанием зоны аэрации и грунтовых вод при образовании водонепроницаемого слоя в почве, и лет с обратными процессами, которые уравнивали друг друга и сохраняли стабильность многолетних колебаний режима формирования стока и других элементов водного баланса на протяжении нескольких десятилетий.

В период с 1978 до 1995 года началось постепенное повышение средней годовой температуры воздуха, которая в этот временной интервал повысилась в среднем на 0,5°С за счет роста температур холодного периода. Соотношение лет с наличием образования водонепроницаемого слоя и без него начало смещаться в сторону лет с тальми почвами в предвесенний период и увеличением инфильтрации в зону аэрации и грунтовые воды, о чем свидетельствует повышение их уровня как в верхнем, так и в нижележащем горизонтах на 2 – 3 метра. Необходимо отметить, что зона аэрации почво-грунтов в степной зоне в зависимости от глубины залегания уровня грунтовых вод может контролировать до 1200 мм слоя воды, о чем свидетельствуют зависимости, приведенные в разделе 2.3.2 на рисунке 2.15, и более, с учетом более глубоких ненасыщенных горизонтов, о чем было сказано в разделе 2.3.4.

Увеличение годовых сумм осадков практически полностью компенсировалось ростом испарения с поверхности почвы. К сожалению, балансовые соотношения в этот период не вполне корректны ввиду пропусков наблюдений за стоком воды.

В 1996 – 2007 годах происходило дальнейшее повышение средней годовой температуры воздуха в среднем на 0,9°C по сравнению с предыдущим периодом. Уровни грунтовых вод повысились еще на метр и более, в отдельные годы достигая отметок в 1,5 м и менее от поверхности земли даже в зонах их питания и транзита, за счет чего емкость влагозапасов зоны аэрации снизилась до 200 мм. Вследствие уменьшения потерь в ненасыщенную зону возрос поверхностный сток («подпертый сток» по В. В. Бефани [Бефани, 1949]). Потенциальная инфильтрация снизилась в среднем на 50 мм. Увеличение осадков не компенсировало рост испарения. Этот период можно охарактеризовать как период неустойчивого равновесия режима влагообмена, который мог продолжаться только при существенном увеличении осадков. В противном случае его режим должен был измениться.

В 2008 – 2009 годах годовые суммы осадков существенно снизились (вплоть до 470 – 500 мм с учетом всех поправок). Это послужило «спусковым крючком» для обвального снижения уровней грунтовых вод на 3 – 4 м. Одновременно емкость влагозапасов зоны аэрации вновь увеличилась до 600 – 700 мм. Резко возросла величина потенциальной инфильтрации и существенно снизился поверхностный сток. Снижение испарения с поверхности почвы не достигло уровней 1950 – 1977 годов, главным образом за счет, по-прежнему, сравнительно высокого количества летних осадков и увеличения на 1 – 2 месяца продолжительности теплого периода.

Необходимо отметить, что средние годовые суммы осадков в районе ВБС Каменная Степь в 2008 – 2019 годах в среднем были выше, чем в первоначальный период, а в 2013 и 2016 годах годовые суммы осадков достигали 700 мм, что практически не повлияло на процессы снижения поверхностного стока, хотя могло способствовать поддержанию уровней грунтовых вод. Сток воды на балке Степная в 2013 году составил 5,4 мм, а в 2016 году – 12,5 мм. Это свидетельствует о преобладании влияния температурного фактора в отношении криогенного регулирования стока воды. Формирование поверхностного стока воды в этот период происходит, по-видимому, только в нижних притальвежных частях склонов, где уровни грунтовых вод по-прежнему залегают относительно неглубоко и наблюдается явление «подпертого» стока.

Для наглядности данные, приведенные в *таблице 2.1*, представлены в графическом виде на *рисунке 2.41*.

Определенное влияние на процессы формирования стока воды оказало и внутригодовое перераспределение осадков (*таблица 2.2*), хотя структура их внутригодового распределения от периода к периоду на первый взгляд меняется незначительно. В последний период 2008 – 2017 годов обращает на себя внимание снижение, хотя и незначительное, доли летних осадков и более заметное уменьшение доли осенних осадков. Последнее, как представляется, имеет серьезные последствия для формирования стока в течение зимы и в начальный весенний период.

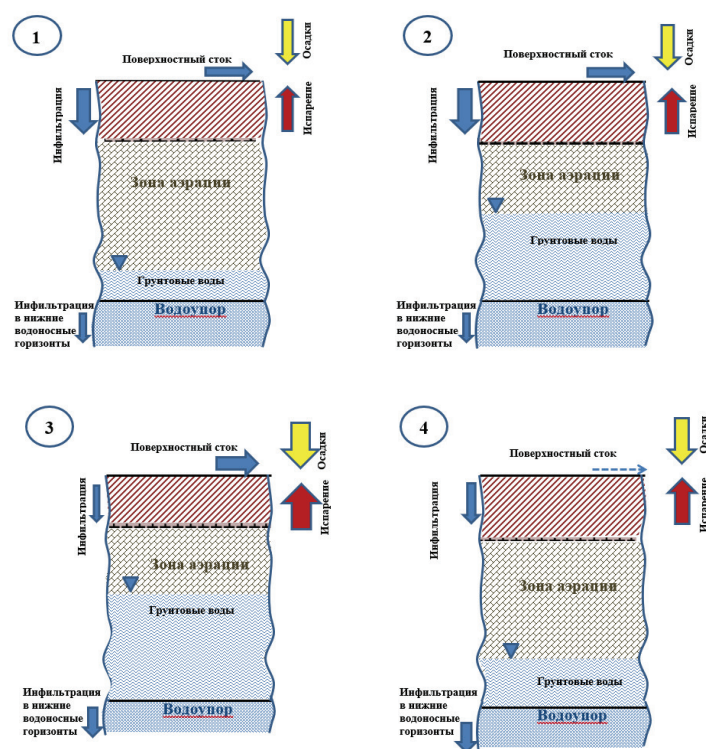


Рисунок 2.41. Осредненные характеристики элементов водного баланса балки Степная для стационарного периода с 1950 по 1977 год и различных этапов переходного периода с 1978 по 2017 год

Таблица 2.2 – Распределение величин сезонных осадков (с поправкой на смачивание) по данным наблюдений на метеостанции ВБС Каменная Степь в различные периоды с 1950 по 2017 год

Период, годы	Сезонные суммы осадков, мм/% от годовой суммы				Средняя годовая сумма осадков, мм
	Зима	Весна	Лето	Осень	
1950 – 1977	94/22,5	95/22,8	127/30,5	101/24,2	417/100
1978 – 1995	104/20,4	110/21,6	151/29,7	144/28,3	509/100
1996 – 2007	107/21,3	107/21,3	152/30,2	138/27,4	504/100
2008 – 2017	116/23	113/22,4	148/29,4	125/24,8	504/100

Снижение осеннего увлажнения за счет уменьшения осадков в сочетании с сезонным ростом испарения с поверхности почвы формирует дефицит влаги в почве, который компенсируется только в конце декабря – начале января. В результате осенью и почти в половине зимнего сезона уменьшается питание грунтовых вод, а при промерзании почвы (если даже оно наблюдается) не формируется «запирающий» слой или его мощность очень мала и распространена на небольшой части водосборов.

Резюмируя сказанное выше, можно отметить, что изменения процессов формирования стока воды на малых реках лесостепной и степной зон имеют сходные

черты. Поверхностный сток, формируемый преимущественно в период весеннего половодья, в рассматриваемых природных условиях снизился повсеместно при одновременном возрастании питания рек грунтовыми и подземными водами. В полуаридной зоне основные постоянные водоносные горизонты подземных вод залегают на значительной глубине, временные масштабы процессов их пополнения занимают годы. Верхние водоносные горизонты, питающие постоянные водотоки начального звена гидрографической сети (ручьи и малые реки), зачастую имеют прерывистый характер и чувствительны к засушливым периодам и криогенным факторам, определяющим режим питания и разгрузки зоны активного водообмена. Поэтому объемы годового стока малых рек и ручьев, особенно с неполным дренированием постоянных водоносных горизонтов, здесь снижаются. С большой долей вероятности можно предполагать, что доля поверхностного стока в годовом снизится до 20 – 30%, при одновременном увеличении доли подземной его составляющей.

Полученные результаты позволяют сделать следующие предварительные выводы. На начальном этапе переходного периода (примерно 20 – 25 лет) рост температуры воздуха сказался на увеличении питания подземных вод и подъеме их уровня, соответственно, и на росте испарения с поверхности почвы. При дальнейшем росте температуры воздуха криогенные явления в почве стали менее выражены и их влияние на процессы тепло-влагооборота в речных бассейнах ослабло. В результате увлажненность зоны аэрации в теплый период снизилась. Испарение с почвы уменьшилось, но его средние годовые величины по-прежнему превышают испарение в первый квазистационарный период в меньшей степени из-за сравнительно высокого количества летних осадков и, главным образом, увеличения продолжительности теплого периода.

Уровни грунтовых вод в зоне питания стали понижаться, так как приходная часть их водного баланса с ростом мощности ненасыщенной зоны и увеличением потерь влаги на покрытие формируемого в этой зоне дефицита влаги, уменьшилась. Сток в логах и балках (то есть поверхностный сток) понизился до незначительных величин. На малых водосборах с залесенностью более 40% в лесостепной зоне сток прекратился полностью даже в период снеготаяния (то же наблюдается на балках степной зоны с большой долей лесополос). Происходит деградация начальных звеньев гидрографической сети.

Нижний (постоянный) водоносный горизонт пока продолжает сохранять высокие уровни подземных вод сравнительно с первым квазистационарным периодом за счет отложенной более интенсивной фильтрации, обеспечивающей его питание, и замедленного водообмена. Однако и они постепенно снижаются.

Сезонная регулирующая роль зоны аэрации и грунтовых вод верхнего горизонта в формировании стока рек существенно возросла. Можно предположить, что основная фаза перестройки системы тепловлагооборота в речных бассейнах в

полуаридной зоне (переходный период) продолжительностью свыше тридцати лет завершилась к концу 2000-х годов. В настоящее время здесь происходит окончательная подстройка системы влагооборота, связанная с процессами установления более стабильного режима верхнего и второго по глубине водоносных горизонтов подземных вод, которые питают ручьи и малые реки. Только после этого можно предположить окончательное наступление современного квазистационарного периода, в котором дальнейший рост температуры воздуха уже имеет менее заметную роль в процессах формирования стока.

Таким образом, главным фактором современных условий формирования стока воды является изменение условий его криогенного регулирования. Под «криогенным регулированием формирования стока воды» для равнинной части ЕТР, мы понимаем весь комплекс процессов, связанных с фазовыми переходами влаги в снег и лед и протекающих в системе «снег – ледяная корка – ледовые образования в почвогрунтах при их промерзании – ледовый покров на водотоках». В криолитозоне в эту систему помимо снега, ледяной корки и речного льда необходимо включать динамику глубины сезонно-талого слоя почвогрунтов, гольцовые и другие виды подповерхностных льдов, наледи, мощность и распространение таликовых зон, то есть все участки водосборов и водотоков, где в течение года происходят фазовые переходы воды, влияющие на гидрологический режим. В горных условиях добавляются ледники и снежники.

В последнее десятилетие в результате повышения температуры воздуха уменьшилось или прекратилось промерзание почво-грунтов, снизилась или прекратилась миграция влаги к фронту промерзания, снизилась удерживающая способность верхнего горизонта грунтовых вод за счет разницы давления воздуха в атмосфере и почво-грунтах ниже фронта промерзания, увеличилась пропускная способность русел ручьев и малых рек при уменьшении толщины льда [Лавров, Марков, 2018; Марков, Гуревич, 2019]. Однако дальнейшее повышение температуры воздуха, как представляется, будет мало влиять на криогенное регулирование стока воды в полуаридной зоне. Основным определяющим фактором формирования стока воды в этот и последующий периоды будут осадки.

Период фазы окончательной подстройки системы влагооборота малых и средних рек к текущей климатической ситуации, которая связана с замедленным изменением ситуации взаимодействия зоны аэрации их водосборов с зонами активного водообмена верхнего горизонта грунтовых вод и нижележащим постоянным водоносным горизонтом, может занимать не менее нескольких лет и более. Начало этого процесса, судя по изменениям минимального стока, по-видимому, уже началось, о чем свидетельствует изменение 30-суточного минимального зимнего стока ряда малых и средних рек полуаридной зоны (*рисунок 2.42*).

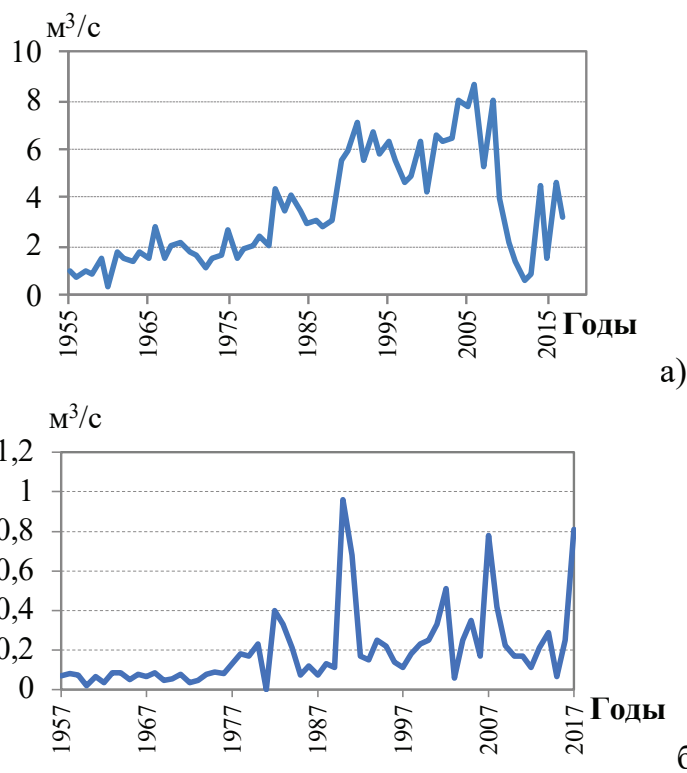


Рисунок 2.42. Многолетние изменения минимального 30-суточного стока ряда рек полуаридной зоны: а) р. Лесной Воронеж – сл. Заворонежская, $A=2000 \text{ км}^2$; б) р. Кардаил - х. Андреевский, $A=1310 \text{ км}^2$

Постепенное уменьшение минимального зимнего стока наблюдается после 2008 – 2009 годов. В зависимости от площади водосбора, глубины вреза русла и гидрогеологических условий процесс снижения минимального стока для разных рек может иметь различную интенсивность. Причинами этого процесса, по нашему мнению, является возросший дефицит влаги в зоне аэрации в теплый период года, который в большинстве случаев в последнее десятилетие покрывается только к концу декабря – началу января, а также более благоприятные условия разгрузки подземных вод в речную сеть.

Гипотетическая величина снижения уровней грунтовых вод верхних горизонтов и, соответственно, минимального стока при сохранении современного количества годовых осадков в полуаридной зоне может в конечном итоге не только достичь величин первого квазистационарного периода, но и опуститься ниже них (рисунок 2.43). В пользу этого предположения говорит также постепенное изменение типов ландшафта со смещением их границ к северу. Для данного региона, в частности, наблюдается постепенное замещение степного типа ландшафта на сухостепной с присущим ему режимом тепло- и влагооборота.

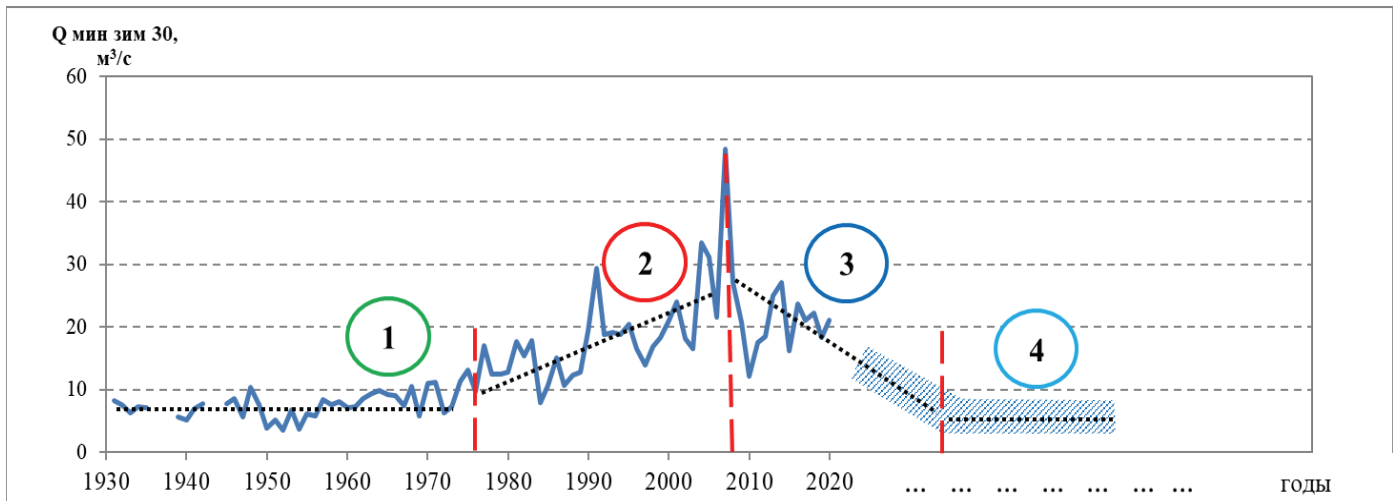


Рисунок 2.43 Многолетние изменения минимального 30-суточного зимнего стока р. Хопер – г. Балашов (1 – первый квазистационарный период до 1978 года; 2 – период роста до 2010 года; 3 – период снижения после 2010 года; 4 – гипотетический равновесный период)

Следует напомнить, что еще А. Р. Константинов отмечал взаимосвязь типов ландшафта с температурой и влажностью воздуха [Константинов, 1978]. Позднее влияние изменений климата на переформирование типов растительности в различных физико-географических зонах было рассмотрено в работах [Анисимов, Жильцова, 2011; Жильцова, Анисимов, 2015]. Модельные расчеты авторов также показали вероятность смещения зон растительных сообществ к северу.

Можно предположить, что изменения процессов формирования стока воды на малых реках зон как избыточного и достаточного увлажнения, так и полупустынных зон имеют сходные черты. Поверхностный сток, формируемый преимущественно в период весеннего половодья, в современных климатических условиях снизился практически повсеместно при одновременном возрастании питания рек грунтовыми и подземными водами.

Однако в более северных районах лесной зоны криогенные процессы более стабильны и менее чувствительны из-за более низких температур воздуха. Осадков, за исключением самых северных регионов, здесь больше, а испарение ниже. При неглубоком залегании верхних водоносных горизонтов и уменьшении свободной емкости водосборов на современном этапе здесь наблюдается увеличение годовых объемов стока. Кроме того, в лесной зоне возросло поступление в реки внутрипочвенной верховодки, которая наиболее интенсивно формируется при многочисленных и продолжительных зимних оттепелях и в весенний период.

Продолжительность основной фазы переходного периода от предшествующего «квазистационарного» периода в водном режиме малых рек зоны смешанных лесов и европейской тайги будет зависеть от фактического роста

температур воздуха и изменения режима других метеорологических факторов (скоростей ветра, дефицита влажности воздуха, радиационного баланса). Расчеты вертикального влагообмена, выполненные С. А. Лавровым для различных условий с применением гидрофизической модели, показали общие тенденции последнего десятилетия к росту в этих природных зонах нисходящих потоков влаги, которые уравнивают баланс между поступлением воды на зеркало грунтовых вод и их повышенную разгрузку в гидрографическую сеть [Лавров, 2021].

Основные выводы

Данные наблюдений воднобалансовых станций показывают, что климатические изменения ведут к значительной перестройке всей системы тепло-влагооборота на их водосборах, которые заключаются в следующем:

1. Общими чертами климатических изменений территории являются: повышение температуры воздуха, особенно значительное в январе-марте, и увеличение осадков (наиболее существенное на возвышенностях). Важная особенность засушливых регионов заключается в изменении внутригодового распределения осадков, суммы которых возросли преимущественно в зимний период, но снизились в летний период и в начале осени.

2. По данным локальных наблюдений на ВБС климатические изменения в этих точках происходили не плавно в течение всего рассматриваемого периода, а сменяя один условный квазистационарный период другим. Переходные между квазистационарными периоды имеют различную продолжительность для тех или иных природных зон. При этом суммы годовых осадков в среднем за последние десятилетия демонстрируют относительную стабильность в рамках естественной изменчивости, в то время как тенденция к повышению температуры воздуха по-прежнему сохраняется, поэтому говорить о завершении переходного периода и наступлении современного квазистационарного периода по этим показателям в отношении климата преждевременно.

3. Система тепло-влагооборота водосборов, следуя климатической ситуации, стремится к соответствующему ей равновесному состоянию, то есть формированию аналогичных переходного и квазистационарных периодов. Пространственные и временные масштабы перестройки процессов формирования стока отличаются, как для различных природных зон, так и для различных процессов в зависимости от интенсивности ослабления воздействия криогенного фактора в результате повышения температуры воздуха.

4. Первый из наблюдавшихся за рассматриваемый временной отрезок квазистационарный период (условно до 1978 года) характеризуется большей свободной

емкостью бассейнов, то есть зоны аэрации и верхней насыщенной зоны, регулирующей формирование поверхностного стока и процессы питания подземных вод. Основная фаза стока воды – весеннее половодье формировалось с более высокими коэффициентами стока, в то время как условия питания рек в межень были более ограниченными. В зоне недостаточного увлажнения в годы, когда в почво-грунтах формировался «запирающий» слой (мерзлые почво-грунты с высоким содержанием замершей воды) наблюдался повышенный сток весеннего половодья при низкой межени и ограниченном питании подземных вод. Чередование групп лет с глубоким и слабым промерзанием почво-грунтов продолжительностью 2 – 4 года, когда преобладал поверхностный сток или инфильтрация, уравнивало долговременные гидрологические процессы.

5. Современный период характеризуется уменьшением свободной емкости водосборов малых рек на начальном этапе с последующим ее увеличением. Доля поверхностного стока в целом снижается, а доля питания грунтовыми водами возрастает. В зонах избыточного и достаточного увлажнения создались благоприятные условия для формирования интенсивного внутрипочвенного стока в период зимних оттепелей на полевых участках, повышенного питания и разгрузки подземных вод. В зоне недостаточного увлажнения увеличение свободной емкости, произошедшее в 2010-х годах, наиболее значительно.

6. Косвенным, но неоспоримым показателем снижения поверхностного стока является деградация первичной гидрографической сети в полуаридной зоне. Первичная гидрографическая сеть, кроме того, является также важным компонентом ландшафта и ее изменение свидетельствует о комплексе изменений в состоянии природной среды в целом.

7. Испарение с поверхности почвы в лесной зоне в среднем изменяется эквивалентно изменениям испарения с поверхности воды. В настоящее время оно после значительного падения до начала 1990-х годов вновь возросло, хотя и не достигло уровней первоначального периода наблюдений. В полуаридной зоне испарение с поверхности почвы увеличивалось с конца 1970-х годов за счет повышения уровня стояния капиллярной каймы грунтовых вод и наличия доступной для испарения влаги, достигнув в среднем величин 390 – 420 мм. Испарение с поверхности воды восстановилось в 2000-х годах на уровнях в среднем 550 – 560 мм в лесостепной зоне и около 650 мм в степной зоне. Рост испарения с поверхности воды и почвы связан также с увеличением продолжительности периодов, когда эти явления наблюдаются, на 1.5 – 2 месяца.

8. Увлажнение почво-грунтов в лесной зоне в среднем выросло на 10 – 40 мм в течение всего года, достигая в переходные и зимний периоды величин, превышающих величину наименьшей полевой влагоемкости. При этом участились случаи формирования периодов с пониженным содержанием влаги в июне – июле

и июле – августе, когда в течение декады и более содержание влаги может приближаться к влажности завядания ($W_{вз}$). В засушливых зонах наблюдается сходная картина, за исключением того, что в последние десятилетия существенное снижение влагозапасов в почве для всего теплого периода является типичным явлением.

9. Динамика уровней грунтовых вод зависит от соотношения интенсивности поступающей в водоносные горизонты влаги и их разгрузки. Уровни грунтовых вод повышались повсеместно с конца 1970-х годов в течение 30 – 35 лет, после чего началось их снижение. В зонах достаточного и избыточного увлажнения снижение было менее заметно и частично связано с ростом внутрпочвенной верховодки, препятствующей питанию грунтовых вод. В полуаридной зоне при условии «выключения» криогенного фактора в условиях возникновения серии маловодных по сумме годовых осадков лет произошло «обрушение» уровней грунтовых вод верхнего горизонта на 3 – 5 м и постепенное снижение уровней основного горизонта, питающего малые реки.

10. Перестройка во всей цепи влагооборота на водосборах малых рек в зоне достаточного и избыточного увлажнения к настоящему времени, очевидно, не завершена. В полуаридных зонах этот процесс занял около сорока лет и, по-видимому, близок к завершению после стабилизации процессов в системе взаимодействия поверхностных и подземных вод. Влияние температурного фактора на современный режим формирования стока здесь ослабло и в дальнейшем сток воды в лесостепной и степной зонах будут определять атмосферные осадки. Поверхностный сток, скорее всего, останется незначительным в большинстве лет, а преобладающим источником питания речного стока станут подземные воды.

В заключение следует отметить, что полученные результаты являются промежуточными и должны постоянно обновляться для контроля ситуации и своевременного выявления развития опасных и неблагоприятных для социального и экономического комплексов тенденций в развитии гидрологических процессов. Кроме того, система наблюдений на воднобалансовых станциях должна обеспечивать полноценный мониторинг гидрологического режима водотоков с различной степенью дренирования грунтовых вод и различным составом типов ландшафтов (с учетом их изменений). Особое внимание должно быть уделено контролю режима подземных вод в зонах их питания, транзита и разгрузки во всех горизонтах, дренируемых водотоками станции.

Неумолимое и постепенное воздействие многолетних климатических изменений на гидрологический режим настоятельно требует продолжения всестороннего мониторинга происходящих процессов, достоверной и полноценной информации о них, взвешенного анализа с учетом развития ситуации. Скоропалительные решения могут вести к не вполне обоснованным и даже ошибочным выводам.

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ВОДНОГО БАЛАНСА МАЛЫХ ВОДОСБОРОВ ВОДНОБАЛАНСОВЫХ СТАНЦИЙ

3.1 Водный баланс малых водосборов

Водный баланс лежит в основе изучения процессов влагооборота в природе, оценки ресурсов поверхностных вод и их рационального использования, расчетов и стока, детерминированного моделирования стока воды, решения многих практических гидрологических задач.

Вопросам водного баланса речных водосборов посвящено большое количество монографий и статей. В контексте данной работы не стоит задача развития этой проблемы в целом. В ее рамках представляется полезным привести примеры расчета и анализа водных балансов для некоторых водосборов воднобалансовых станций. Концептуально расчет водного баланса в масштабе водосбора представляется простой задачей, но в реальности ее реализация в виде достаточно точных численных решений на основе прямых данных наблюдений не столь однозначна [Kane, Yang, 2004]. Однако предварительно целесообразно напомнить некоторые общие положения.

Физической основой водного баланса является частный случай закона сохранения материи. А. Г. Булавко просто и точно сформулировал его гидрологическую интерпретацию следующим образом: «для всякого произвольного ограниченного пространства количество поступившей в него за некоторый период влаги (за вычетом количества влаги, ушедшей из него за тот же период) равняется увеличению или уменьшению первоначального количества влаги, находившейся внутри этого пространства» [Булавко, 1971]. Примерно так же, но применительно к речному водосбору, охарактеризован принцип водного баланса в «Methods for water balance computations» [Methods..., 1974].

По мнению А. П. Бочкова, который в 1934 году впервые в нашей стране выполнил расчеты водного баланса речного водосбора за конкретные интервалы времени, «водный баланс количественно отражает закономерности влагооборота в природе и является результатом взаимодействия климата и подстилающей поверхности... вместе с тепловым балансом он служит физической основой исследований закономерностей формирования гидрометеорологического режима бассейна» [Бочков, 1974].

А. Г. Булавко также отметил, что теоретически можно написать сколь угодно подробное уравнение водного баланса независимо от реальной значимости его компонентов и возможности их количественного определения (зачастую до 15 – 20

элементов и более), после чего неизбежно уравнение приходится упрощать, оставляя только наиболее значимые и подкрепленные реальной информацией компоненты. Поэтому для объектов наблюдений воднобалансовых станций – водосборов малых рек, ручьев и временных водотоков – используется уравнение водного баланса, которое обеспечено непосредственными данными наблюдений за его составляющими.

Для корректного использования метода водного баланса в качестве инструмента изучения гидрологического режима необходимо четко представлять себе возможные пределы его применимости, выявить наиболее слабо изученные составляющие водного баланса, измерение и расчет которых вызывает наибольшие сложности в конкретных физико-географических условиях (Edwards & Rodda, 1972; Hewlett et al., 1969). В частности, для условий Северного Казахстана оценка питания подземных вод атмосферными осадками методом водного баланса как его остаточного члена невозможна, поскольку порядок определяемых величин несопоставим с ошибками определения других компонентов водного баланса [Водогрецкий, Крестовский, 1975].

Вид уравнения водного баланса зависит от поставленных задач и объектов. Расчеты могут выполняться за календарные и генетически однородные интервалы времени – декаду, месяц, сезоны, календарный и гидрологический год, различные фазы гидрологического режима (весеннее половодье в целом и по фазам его подъема и спада, дождевые паводки и межень).

Для условий России расчеты водного баланса водосборов ВБС выполняются обычно для гидрологического года и весеннего половодья, которое является доминирующей водной фазой в годовом распределении стока воды.

Надо упомянуть, что при математическом моделировании в детерминированных моделях водный баланс в зависимости от степени детальности модели рассчитывается для единичного объема почвы, расчетной ячейки пространственно-однородной области (REA), стокоформирующего комплекса (СФК), водосбора [Виноградов, 1988; Мотовилов, Гельфан, 2018, и др.]. Временной масштаб чаще всего составляет сутки.

Критика воднобалансового подхода в его современном состоянии заключается в том, что он является необходимым, но не исчерпывающим при изучении механизма формирования речного стока [Кучмент, 1980], в частности, в отношении взаимодействия отдельных элементов водной среды речного бассейна [Соколов, 1996]. Более того, по небезосновательному мнению некоторых ученых воднобалансовые исследования до сих пор не носят системного характера, предполагающего целостность объяснения скрытой в объекте сущности, хотя и декларируют целостность его изучения как суммы элементов [Павлов, 1977]. Следует признать, что за последние десятилетия эти проблемы не преодолены в полной мере и остаются по-прежнему актуальными.

3.1.1 Гидрологический год

Продолжительность гидрологического года, понятие о котором было введено немецким географом В. Уле [Гельман, 1924], обычно определяется началом устойчивого накопления влаги в бассейне и концом ее сработки, то есть, строго говоря, она не постоянна и меняется от года к году. Однако принятие скользящих или переменных границ гидрологического года влечет за собой много неопределенностей и затруднений. Поэтому обычно принимают фиксированные границы гидрологического года на месячном уровне для средних условий цикла накопления и расходования влагозапасов в рассматриваемом бассейне. Очевидно, что начало накопления влаги в бассейне связано с существенным снижением основной расходной части баланса, то есть стока воды и испарения. На большей части территории России это происходит поздней осенью и зависит от климатических условий региона.

Существует и другой подход к определению гидрологического года. Некоторые авторы предлагали начинать его с месяца с максимальными запасами влаги в бассейне, поскольку это повышает корреляцию между годовыми осадками и стоком. Однако для России, где формирование максимальных запасов влаги в бассейне связано преимущественно со снегонакоплением, такой подход нецелесообразен из-за существенной нестабильности периода образования максимальных запасов воды в снеге, особенно в последние десятилетия.

Для более обоснованного назначения периода гидрологического года, наряду с климатическими характеристиками, обычно используют интегральные кривые элементов водного баланса. Важным аспектом при этом, как отмечали А. П. Бочков, А. Г. Булавко и ряд других авторов, является расчетный период, для которого вычисление месячных за каждый год и средних за этот период значений элементов водного баланса должно производиться с возможно более высокой точностью. Такой период чаще всего, по их мнению, составляет не менее 13 – 15 лет.

Примеры назначения границ гидрологического года, расчета и анализа интегральных кривых для различных физико-географических условий приведены в разделе 3.1.2.

3.1.2 Примеры расчета водного баланса водосборов воднобалансовых станций

Расчеты водных балансов выполнялись для водосборов Нижнедевицкой и Колымской воднобалансовых станций за периоды с наиболее полными и надежными гидрометеорологическими наблюдениями.

3.1.2.1 Примеры расчета водного баланса водосборов Нижнедевицкой воднобалансовой станции

Для водосборов Нижнедевицкой воднобалансовой станции расчеты водных балансов были выполнены за период с 1973 по 1988 год.

Объектами расчетов для Нижнедевицкой ВБС были водосборы р. Девицы – с. Товарня (основной водосбор НДВБС), руч. Ясенок (приток р. Девицы) и лога Долгий (приток руч. Ясенок). В *таблице 3.1* приведены основные характеристики этих водосборов. Схема размещения объектов и пунктов наблюдений на Нижнедевицкой ВБС показана в разделе 1.4.1 на *рисунке 1.4*. На *фото 3.1* представлен типичный ландшафт водосборов станции.

Исходная информация. Программа работ НДВБС включала все виды наблюдений, предусмотренные «Руководством воднобалансовым станциям».



Фото 3.1. Типичный ландшафт водосборов Нижнедевицкой воднобалансовой станции (водосбор лога Вершинин, в настоящее время закрыт). Слева начальник станции В. С. Морозов

Учет стока воды производился по данным гидрометрических наблюдений на гидростворах перечисленных выше водотоков. На р. Девица – с. Товарня был оборудован свайный пост с гидрометрическим мостиком, на руч. Ясенок – гидрометрический лоток, на логу Долгом – донный контроль. Все гидростворы были также оборудованы самописцами уровня воды.

Метеорологические наблюдения проводились на одной метеоплощадке, расположенной в с. Нижнедевицк по программе метеостанции первого разряда. Высота площадки над уровнем моря 186 м.

Наблюдения за атмосферными осадками проводились ежесуточно с применением осадкомеров с защитой Третьякова и плювиографов. Всего в бассейне р. Девицы в расчетный период действовали 7 осадкомерных пунктов, 5 осадкомерных пунктов на водосборе руч. Ясенок и 1 осадкомерный пункт на водосборе лога Долгий. Два осадкомерных пункта (в том числе на логу Долгий) были расположены на поляне в лесу.

Запасы воды в снеге, ледяной корке слое воды на поверхности почвы оценивались по данным маршрутных снегосъемок, которые охватывали все типы подстилающей поверхности. Высота снега на маршрутах измерялась ежелекнедекадно через каждые 10 м, плотность – через 100 м. В точках определения плотности снега оценивались также толщина ледяной корки и высота слоя воды под снегом (если они наблюдались). Для водосбора р. Девицы общая протяженность снегомерных маршрутов достигала 20600 м, руч. Ясенок – 9200 м, лога Долгий – 4200 м.

Испарение с поверхности почвы и снега принималось по данным наблюдений на почвенно-испарительной и снего-испарительной площадках, соответственно, расположенных вблизи метеостанции. Почвенно-испарительная площадка была оборудована испарителями ГГИ 500 – 100 и почвенным дождемером. Наблюдения проводились с момента оттаивания верхнего слоя почвы до начала установления снежного покрова (обычно со второй-третьей декады апреля до конца октября – начала ноября). Снего-испарительная площадка была оснащена испарителями ГГИ 500-6. Наблюдения проводились в период, когда было возможно зарядить снежные монолиты (т.е. высота снега была 6 см и более).

Динамика запасов влаги в 1-м слое почво-грунтов на водосборах р. Девицы и руч. Ясенок определялась в 24-х постоянных пунктах, расположенных в различных частях склонов (от водоразделов до подошвы склонов) и на различных угодьях (лес, луг, пашня под различными сельскохозяйственными культурами). На водосборе лога Долгий таких пунктов было одиннадцать. Наблюдения проводились 1 раз в конце месяца в холодный период и ежелекнедекадно в теплый период.

Изменения уровней грунтовых вод наблюдались в створах 8-и скважин, расположенных в бассейне руч. Ясенок и лога Долгий. Скважины были заложены на глубины от 7.5 до 30 м и отражают динамику изменений уровней верхнего

(первого) и нижнего водоносных горизонтов, дренируемых постоянными водотоками станции. Наблюдения проводились 8, 18 и 28 числа каждого месяца с помощью хлопущки и рулетки с делением 1 см. В период весеннего снеготаяния наблюдения проводились учащенно 1 раз в 1-2 дня.

Уравнение водного баланса за гидрологический год для конкретных условий водосбора р. Девницы принято в следующем виде:

$$P - E - R = \pm \Delta W_s \pm \Delta W_{res} \pm \Delta U_{gr} \pm \eta \quad (3.1),$$

где P – осадки, выпадающие на поверхность водосбора, E – суммарное испарение с поверхности водосбора, R – сток воды, $\pm \Delta W_s$ – изменение запаса воды в почве, $\pm \Delta W_{res}$ – изменение запасов воды в водохранилище, $\pm \Delta U_{gr}$ – изменение запасов влаги в грунтовых водах, $\pm \eta$ – невязка водного баланса.

При расчетах годового водного баланса также целесообразно контролировать изменения запасов воды в снеге, ледяной корке и слое воды под снегом $\pm \Delta W_{sn}$, поскольку в отдельные годы при наступлении ранней зимы они могут формировать переходящие запасы, что повышает невязку водного баланса за принятый и последующий гидрологические годы.

Определение величин составляющих водного баланса. Величины атмосферных осадков определялись как среднее арифметическое для водосборов р. Девницы и руч. Ясенок (из показаний 7-и и 5-и осадкомеров, соответственно), для водосбора лога Долгого были приняты величины осадков, измеренные по одному осадкомеру, расположенному на этом водосборе.

Ошибки осреднения месячных сумм осадков по площади при наличии 1 осадкомера на 10 км², как это имеет место на НДВБС, не превышают 4% [Голубев, 1981]. Надежность оценки осадков – приходной части водного баланса – определяется точностью измерения и достаточной освещенностью наблюдениями рассматриваемой территории.

Как известно, реальные осадки, выпадающие на поверхность водосбора, отличаются от измеренных на величину погрешности измерения и величину перехвата осадков растительностью. Погрешность измерения складывается из суммарных случайной и систематической погрешности, которые обусловлены конструкцией измерительной части прибора, микроклиматическими особенностями пункта наблюдений и методом корректировки осадков.

Специальные исследования [Коновалов и др., 2001] показали, что для суточных сумм осадков в диапазоне от 10 до 200 мм погрешность измерений составляет

8%, возрастая до 90% для осадков в диапазоне 0,1 – 0,5 мм. По оценкам Голубева суммарная случайная погрешность измерения сезонных осадков составляет около 4% измеренной величины [Голубев, 1981].

Систематическая погрешность измерения осадков складывается из потерь влаги на смачивание осадкомерного ведра, испарение осадков из него и воздействие на учет осадков аэродинамических факторов (ветровой недоучет, ложные осадки) [Голубев и др., 1997].

Потери влаги на смачивание осадкомерного ведра в соответствии с принятой методикой [Наставление, 1969] компенсируются путем введения специальных поправок на каждый случай измерения осадков слоем более 0.05 мм. Для условий НДВБС поправка на смачивание составляет от 4% до 7% суммы учтенных годовых осадков. Потери жидких осадков на испарение из осадкомерного ведра обычно составляют в среднем 0.1 – 0.2 мм/сут для осадкомера Третьякова и менее 0.1 мм/сут для почвенного дождемера и могут составлять в среднем около 4% от суммы жидких осадков. Потерями твердых осадков на испарение из ведра можно пренебречь ввиду их незначительности для данного региона [Бочков, 1974; Голубев, 1981].

Величина ветрового недоучета осадков в условиях Нижнедевицкой ВБС может быть довольно значительной. В отдельные дни скорость ветра при порывах достигает в районе станции 30 м/сек, а средние суточные скорости ветра превышают 10 м/сек. Сравнение величин сезонных и годовых сумм осадков, измеренных осадкомером на логу Долгом, расположенном на поляне в лесу, с данными осадкомеров, расположенных на открытых пространствах, показывают, что различие между ними составляет 5-10%. Специальные оценки потерь осадков на ветровой недоучет с применением временного эталона ВМО (осадкомер с защитой Третьякова в двойной заборной защите) на НДВБС не проводились. Поэтому при расчетах водных балансов для корректировки осадков применялись средние для региона поправки на ветровой недоучет, равные 10% измеренной величины месячных осадков в холодный период и 5% – в теплый период [Методические Указания, 1974]. Для осадкомеров, установленных на поляне в лесу, поправки на ветровой недоучет не вводились.

Запас воды в снеге (W_{sn}) определялся как сумма запасов воды в снеге, ледяной корке и воде под снегом:

$$W_{sn} = H_{sn}\rho_{sn} + 0.7H_{ice} + H_w \quad (3.2),$$

где H_{sn} и ρ_{sn} – высота и плотность снега, соответственно, H_{ice} и H_w – слои ледяной корки и воды в мм.

Величины запасов воды в снеге рассчитывались как средневзвешенные для каждого из водосборов, с учетом доли площади поля и леса.

Большая протяженность маршрутных снегосъемок на всех исследуемых водосборах, покрывающих основные типы подстилающей поверхности, позволяет достаточно надежно оценивать величину запасов воды в снеге. По данным [Вершинина, 1981] максимальные запасы воды в снеге оцениваются, как правило, со средней квадратической ошибкой около 15% (при колебаниях от 7 до 22%) в зависимости от густоты сети и площади водосбора. Наибольшие погрешности при оценке запасов воды в снеге в условиях лесостепной зоны России связаны с измерениями снегозапасов в оврагах, а также с определением плотности неоднородного снега с прослойками льда или снега, насыщенного водой.

Для оценки *суммарного за гидрологический год испарения* на НДВБС использовались комбинированные прямые и косвенные методы: за периоды наличия устойчивого снежного покрова высотой более 6 см проводились прямые наблюдения испарения с применением весовых снежных испарителей ГГИ 500-6. Также проводились прямые наблюдения за испарением с почвы с применением весовых испарителей ГГИ 500-100 – с момента схода снежного покрова и оттаивания почвы до установления снежного покрова. В переходные периоды для расчета испарения использовались эмпирические формулы. Для оценки испарения со снега применялась формула П. П. Кузьмина [Кузьмин, 1974]:

$$E = 0.37 \Sigma d \quad (3.3),$$

а для периода пестрого ландшафта и избыточного увлажнения формула А. Н. Постникова [Постников, 1977]:

$$E = 0.44 \Sigma d \quad (3.4),$$

где Σd – сумма средних суточных дефицитов влажности воздуха за период.

Испарение с поверхности почвы для расчетов водных балансов принималось по данным наблюдений на одной почвенно-испарительной площадке, что снижает точность расчета водных балансов, поскольку не учитываются особенности испарения с различных сельскохозяйственных культур. Сопоставление данных наблюдений за испарением с различных сельхозкультур и луговой поверхности показало, что суммарная величина испарения с разных видов культур чаще всего несколько ниже величины испарения, полученной на основной луговой площадке, хотя в отдельные месяцы, сезоны и в целом за год она может заметно отличаться.

Наблюдения за испарением на полях под озимой пшеницей и ячменем в 1970-х – 1980-х годах показывают, что в период активной вегетации в мае-июне месячные суммы испарения с этих культур в 1.5 – 2 раза выше, чем с луговой поверхности. В июле-августе наоборот, испарение с залежи в такой же степени больше, чем на сельскохозяйственных полях.

Наряду с использованием весовых испарителей на НДСБС за период с мая по октябрь величины испарения с почвы оценивались по методу теплового баланса на одной площадке вблизи метеостанции. Годовые и сезонные величины испарения, полученные по уравнению теплового баланса, оказались близки величинам испарения, полученным по данным наблюдений на испарительной площадке (разница колеблется в пределах $\pm 10\%$), что послужило основанием использовать при расчетах водного баланса данные почвенных испарителей. Следует, однако, отметить, что по данным многочисленных оценок, систематизированных в работе [Вершинин и др., 1980], при использовании весовых испарителей имеет место занижение величины испарения с почвы. Величина занижения месячных величин испарения составляет для лесостепной зоны около 10% измеренной величины испарения, а случайная составляющая погрешности измерений находится в диапазоне $\pm (16\div 23)\%$.

Сток воды – наиболее точно измеряемая составляющая водного баланса, особенно при использовании гидрометрических лотков и водосливов. Непрерывные записи уровней воды в сочетании с достаточным количеством измеренных расходов воды позволяет получать надежные зависимости расхода от уровня. При расчетах стока воды возникают некоторые проблемы, связанные с зарастанием русел водотоков и ледовыми явлениями, особенностями эксплуатации гидрометрических сооружений в полевых условиях при периодическом промерзании и оттаивании почво-грунтов, но в целом сток воды определялся в пределах необходимой точности.

Увлажнение зоны аэрации играет очень большую роль в водном балансе водосборов лесостепной зоны. Изменения влагозапасов в почво-грунтах баланса оценивались по данным наблюдений на 18-и постоянных участках на р. Девица и руч. Ясенок и 11-и пунктов наблюдений на логу Долгом. Из этих постоянных пунктов 4 расположены на целинных участках (естественный травяной покров), 5 – в лесу, остальные на сельскохозяйственных полях под различными культурами (озимая пшеница, кукуруза, горох, ячмень, сахарная свекла и др.).

Для оценки увлажнения на каждом выбранном участке пробы почвы отбирались буром послойно через 10 см до глубины 1 м и определялась влажность образца $W\%$. Для определения влагозапасов в почве на участках отбора проб определялась также плотность почво-грунтов ρ ($\text{кг}/\text{м}^3$). Запас влаги в каждом слое почвы определялся по формуле:

$$W = W_{\%} \rho h / 10 \quad (3.5),$$

где h – расчетный слой почвы в см, 10 – коэффициент для перевода запаса влаги в мм слоя. Затем путем суммирования послойных значений оценивался запас влаги для всей метровой толщи почво-грунтов.

Необходимо отметить большую однородность водно-физических свойств почво-грунтов в бассейне р. Девицы. Поэтому пространственная изменчивость влагозапасов здесь невелика ($C_v \approx 0.09$) и определяется в основном рельефом местности, определяющим положение уровня грунтовых вод.

Наблюдения за влагозапасами в зоне аэрации на НДВБС освещали динамику влаги только в верхнем метровом слое почво-грунтов. Это обусловлено тем, что по данным сравнительных измерений в слоях от 0 – 20 см до 0 – 300 см, именно в метровом слое почвы происходят наиболее динамичные изменения влагозапасов, хотя для целей корректного расчета водного баланса измерения должны проводиться во всей толще зоны аэрации.

Для оценки средних по водосбору влагозапасов в зоне аэрации вначале определялись средние влагозапасы на однородных по типу подстилающей поверхности участках (поле, лес), а затем вычислялись средние взвешенные величины для всего водосбора, с учетом доли площади, занятой данным типом поверхности.

По данным [Леонова, 1977] погрешность измерения запасов влаги в слое 1 м для условий лесостепной зоны составляет 6-9% измеренной величины.

Определение доли участия грунтовых вод в балансе водосборов НДВБС производилось по данным материалов наблюдений на сети скважин, количество которых для водосбора р. Девицы составляло 8, для водосборов руч. Ясенок и лога Долгий 7 и 3, соответственно.

Изменения запасов грунтовых вод для каждого из водоносных горизонтов определялись по формуле:

$$\Delta U_{gr} = 10 \mu \Delta H_{gr} \quad (3.6),$$

где μ – коэффициент водоотдачи, ΔH_{gr} – изменение уровня грунтовых вод.

Изменения уровня грунтовых вод определялось по данным наблюдений, а величины коэффициентов водоотдачи μ назначались для каждой скважины по описанию водоносных горизонтов и на основании лабораторных определений с использованием образцов (от 0.04 до 0.15).

По данным [Капотова, 1981] суммарная ошибка определения изменений запасов грунтовых вод на площади 100 – 200 км² составляет для песчаного грунта 14 мм, для суглинистого – 8 мм. Необходимо отметить, что сеть скважин на водосборе р. Девницы даже в 1970 – 1980-х годах была недостаточна для полноценной оценки динамики грунтовых вод.

Изменение запасов воды в водохранилище. Водоохранилище на р. Девнице имеет максимальный объем 0.0015 км³, причем 1/3 его составляет «мертвый объем». Таким образом, при полной сработке водохранилища до уровня «мертвого объема» оно способно максимально аккумулировать либо сбросить около 10 мм слоя стока. В отдельные годы это может сказаться на внутрисезонном, а иногда и межсезонном регулировании стока воды р. Девницы. Среднее годовое испарение с поверхности зеркала водохранилища составляет 557 мм. Учитывая, что максимальная площадь зеркала водохранилища составляет около 0.6% площади водосбора р. Девницы у с. Товарня, его влиянием на суммарное испарение с водосбора можно пренебречь.

Учитывая сказанное, а также отсутствие систематических наблюдений за режимом водохранилища, данный компонент при расчетах водных балансов водосбора р. Девницы не учитывался.

В *таблицах 3.2 – 3.4* приведены водные балансы по трем названным выше водосборам за 1979 – 1980 и 1983 – 1984 гидрологические годы – годы с наибольшей и наименьшей суммой годовых осадков, а также средние за расчетный период балансы для этих водосборов. В ряду наблюдений с 1948 года наименьшие суммы годовых осадков расчетного периода имеют обеспеченность для разных водосборов от 90% до 97.5%, а наибольшие – обеспеченность от 11% до 2.5%.

Режим отдельных составляющих водного баланса. Режим выпадения **осадков** на водосборах Нижнедевицкой ВБС характеризуется значительными колебаниями от года к году и большой неравномерностью их внутригодового распределения. Выпадение твердых осадков на НДВБС в разные годы наблюдается с конца октября – начала января до марта (иногда апреля). Их сумма в среднем составляет 33% от годовой суммы осадков. Выпадение жидких осадков может наблюдаться в любой месяц года. Месячные суммы осадков в среднем за период наблюдений во все месяцы года составляют 30 – 60 мм, но в отдельные годы могут достигать 119 мм в холодный период (декабрь 1966 года) и 154 мм в теплый (июль 1984 года). Минимальные месячные суммы осадков могут составлять 1 – 4 мм в феврале, в летние месяцы и сентябре, и 8 – 12 мм в другие месяцы года.

Устойчивый **снежный покров** образуется в период с октября по январь, как правило, в ноябре-декабре. Его высота ко времени максимального снегонакопления в среднем составляет 50 – 70 см в поле и 80 – 100 см в лесу. Однако в отдельные годы высота снега не превышает 4 – 7 см (1968 – 1969 годы). В эти годы отмечается перемешивание снега с пылью в результате развития эоловой эрозии.

Таблица 3.2 – Водные балансы водосбора р. Девицы (А=103 км²) за годы с максимальными и минимальными суммами годовых осадков и средний за 1973 – 1988 годы

Элемент баланса, мм	Зима	Весна	Лето	Осень	Год	% от Р
	XII-II	III-V	VI-VIII	IX-XI	XII-XI	
<i>Водный баланс водосбора р. Девицы за 1979 – 1980 гидрологический год (максимальный)</i>						
Осадки, Р	130	143	303	240	816	100
В том числе поправка Р	21	21	33	31	106	13
Сток R	21	72	22	31	146	18
Испарение, E	5	119	265	59	448	55
В снежном покрове, $\Delta W_{\text{сн}}$	68	-68			0	
В почве в слое 1 м, $\Delta W_{\text{s100см}}$	29	-28	11	25	37	5
В грунтовых водах, ΔU	-2	18	-16	15	15	2
Невязка абс. η , мм	9	30	21	110	170	
Невязка относит. η , %	7	21	7	46	21	
<i>Водный баланс водосбора р. Девицы за 1983 – 1984 гидрологический год (минимальный)</i>						
Осадки, Р	98	111	204	73	486	100
В том числе поправка Р	14	17	24	15	70	14
Сток R	19	29	22	35	105	23
Испарение, E	6	150	209	77	442	97
В снежном покрове, $\Delta W_{\text{сн}}$	52	-52			0	
В почве в слое 1 м, $\Delta W_{\text{s100см}}$	6	-52	-8	79	25	5
В грунтовых водах, ΔU	-3	9	-5	-11	-10	-2
Невязка абс. η , мм	18	27	-14	-107	-76	
η , %	18	24	-7	-147	-16	
<i>Водный баланс водосбора р. Девицы средний за 1973 – 1988 годы</i>						
Осадки, Р	136	122	215	136	609	100
В том числе поправка Р	21	18	25	18	82	13
Сток R	24	69	19	26	138	23
Испарение, E	6	153	229	60	448	74
В снежном покрове, $\Delta W_{\text{сн}}$	73	-77		4	0	
В почве в слое 1 м, $\Delta W_{\text{s100см}}$	22	-44	-36	52	-6	-1
В грунтовых водах, ΔU	3	16	-15	2	6	1
Невязка абс. η , мм	8	5	18	-6	23	
Невязка относит. η , %	6	4	8	-4	3	

Таблица 3.3 – Водные балансы водосбора руч. Ясенок ($A=21.7 \text{ км}^2$) за годы с максимальными и минимальными суммами годовых осадков и средний за 1973 – 1988 годы

Элемент баланса, мм	Зима XII-II	Весна III-V	Лето VI-VIII	Осень IX-XI	Год	% от P
<i>Водный баланс водосбора руч. Ясенок за 1979 – 1980 гидрологический год (максимальный)</i>						
Осадки, P	142	143	299	236	820	100
В том числе поправка P	26	20	34	32	112	14
Сток R	14	49	18	20	101	12
Испарение, E	5	119	265	59	448	55
В снежном покрове, ΔW_{sn}	81	-81			0	
В почве в слое 1 м, ΔW_{s100cm}	30	-26	10	34	48	6
В грунтовых водах, ΔU	-3	22	-13	15	21	3
Невязка абс. η , мм	15	60	19	108	202	
Невязка относит. η , %	11	42	6	46	25	
<i>Водный баланс водосбора руч. Ясенок за 1983 – 1984 гидрологический год (минимальный)</i>						
Осадки, P	70	65	235	129	499	100
В том числе поправка P	11	8	24	14	57	11
Сток R	18	27	17	18	80	16
Испарение, E	6	150	209	77	442	89
В снежном покрове, ΔW_{sn}	45	-45				
В почве в слое 1 м, ΔW_{s100cm}	8	-53	-12	76	19	4
В грунтовых водах, ΔU	-2	7	-6	-8	-9	-2
Невязка абс. η , мм	-5	-21	27	-34	-33	
Невязка относит. η , %	-7	-32	11	-26	-7	
<i>Водный баланс водосбора руч. Ясенок средний за 1973 – 1988 годы</i>						
Осадки, P	145	123	214	139	621	100
В том числе поправка P	25	18	25	18	86	14
Сток R	18	46	15	17	96	15
Испарение, E	6	153	229	60	448	72
В снежном покрове, ΔW_{sn}	73	-78		5	0	
В почве в слое 1 м, ΔW_{s100cm}	20	-40	-42	51	-11	-2
В грунтовых водах, ΔU	3	18	-13	-2	6	1
Невязка абс. η , мм	25	24	25	8	82	
Невязка относит. η , %	17	20	12	6	13	

Таблица 3.4 – Водные балансы водосбора лога Долгий ($A=2.57 \text{ км}^2$) за годы с максимальными и минимальными суммами годовых осадков и средний за 1973 – 1988 годы

Элемент баланса, мм	Зима	Весна	Лето	Осень	Год	% от Р
	XII-II	III-V	VI-VIII	IX-XI		
<i>Водный баланс водосбора лога Долгий за 1979 – 1980 гидрологический год (максимальный)</i>						
Осадки, Р	143	151	294	236	824	100
В том числе поправка Р	6	13	18	17	54	7
Сток R	0	13	3	1	17	2
Испарение, E	5	119	265	59	448	54
В снежном покрове, $\Delta W_{\text{сн}}$	78	-78			0	
В почве в слое 1 м, $\Delta W_{\text{s100см}}$	14	-15	1	33	33	4
В грунтовых водах, ΔU	0	20	-5	10	25	3
Невязка абс. η , мм	46	92	30	133	301	
Невязка относит. η , %	32	61	10	56	37	
<i>Водный баланс водосбора лога Долгий за 1983 – 1984 гидрологический год (минимальный)</i>						
Осадки, Р	74	71	227	127	499	100
В том числе поправка Р	4	6	17	12	39	8
Сток R	0	1	0	0	1	<1
Испарение, E	6	150	209	77	442	89
В снежном покрове, $\Delta W_{\text{сн}}$	54	-54			0	
В почве в слое 1 м, $\Delta W_{\text{s100см}}$	6	-47	-24	71	6	2
В грунтовых водах, ΔU	2	9	0	-9	2	0
Невязка абс. η , мм	6	12	42	-12	48	
Невязка относит. η , %	8	17	18	-9	10	
<i>Водный баланс водосбора лога Долгий средний за 1973 – 1988 годы</i>						
Осадки, Р	145	127	219	142	633	100
В том числе поправка Р	10	11	16	12	49	8
Сток R	<1	12	<1	0	12	2
Испарение, E	6	153	229	60	448	71
В снежном покрове, $\Delta W_{\text{сн}}$	83	-88		5	0	
В почве в слое 1 м, $\Delta W_{\text{s100см}}$	20	-27	-41	45	-3	<-1
В грунтовых водах, ΔU	-1	14	-4	-4	5	1
Невязка абс. η , мм	37	62	35	37	171	
Невязка относит. η , %	26	49	16	26	27	

За рассматриваемый период максимальные запасы воды в снеге колебались от 34 мм в 1982 – 1983 гидрологическом году до 124 мм в 1984 – 1985 гидрологическом году. Необходимо отметить, что на режим снегонакопления большое влияние оказывают многочисленные зимние оттепели, в то время как испарение со снега относительно невелико и составляет в среднем 10 – 15% величины выпавших в холодный период осадков.

Сток воды. Питание водотоков в основном снеговое. Сток воды на основных водосборах НДВБС – р. Девице и руч. Ясенок – наблюдается в течение всего года. На самых малых водосборах логов, не дренирующих водоносные горизонты, сток наблюдается только в период прохождения весеннего половодья и, в отдельные годы, после прохождения продолжительных сильных дождей, а также в конце осени – начале зимы, когда потери влаги на испарение малы. По данным наблюдений годовые величины стока воды колебались на р. Девица от 85 до 208 мм при норме 130 мм (23% величины средних годовых осадков), что соответствует районной норме стока [Water Balance Maps, 1984] на тот период. На руч. Ясенок годовой сток изменялся от 58 до 140 мм при норме 111 мм (20% величины средних годовых осадков) и на логу Долгий – от 0 до 38 мм при норме 19 мм (около 3% величины средних годовых осадков).

Испарение за гидрологический год в условиях Нижнедевицкой ВБС является основным расходным компонентом водного баланса, в три-пять раз превышающем величину стока воды. Суммарное испарение складывается из испарения со снега в холодный период и в начале теплого периода, испарения в период пестрого ландшафта, испарения с поверхности почво-грунтов и транспирации растительного покрова. В среднем за год, по данным наблюдений на испарительной площадке в районе НДВБС, за расчетный период испарялось 448 мм, максимальное испарение составило 522 мм (1977 – 1978 гидрологический год), минимальное – 384 мм отмечалось в 1975 – 1976 гидрологическом году. За холодный период испарялось в среднем 9 мм (от 4 мм в 1987-1988 гидрологическом году до 19 мм в 1974 – 1975 гидрологическом году). Распределение испарения в теплый период года соответствует распределению прихода солнечной радиации и наличия доступной для испарения влаги в почве в конкретном году. Поэтому в отдельные засушливые годы испарение в весенний период близко величине испарения в летний период и даже может превосходить его (1982 – 1983 гидрологический год).

Наибольшей изменчивостью от года к году отличаются **запасы влаги в почво-грунтах** в летний период. В засушливые годы они могут снижаться до величин, близких влажности завядания ($W_{ВЗ}$ – 210 – 220 мм для метрового слоя), а во влажные – достигают значений, близких наименьшей полевой влагоемкости ($W_{НВ}$ – 310 – 330 мм). Таким образом, летом амплитуда изменений влагозапасов в метровом слое почво-грунтов в районе НДВБС может составлять 120 – 150 мм.

В осенний период, одновременно с резким уменьшением испарения, влагозапасы возрастают, достигая в 60 – 70% случаев (лет) наименьшей полевой влагоемкости. В зимний период (особенно в его первую половину) влагозапасы в верхних слоях почвы на полевых участках, в результате поступления талой воды при оттепелях и миграции влаги с уровня стояния капиллярной каймы к фронту промерзания, в 85 – 90% случаев возрастают до величин 1 – 1.2 W_{HB} . На лесных участках влажность почвы в зимний период меняется мало [Вершинина и др., 1985].

В весенний период, в ходе протаивания почво-грунтов и сброса избыточной влаги из зоны аэрации в грунтовые воды, а также в результате резкого возрастания испарения в мае (нередко испарение в мае наибольшее в году), влагозапасы в метровом слое почво-грунтов снижаются по сравнению с предвесенними на 100 – 120 мм.

За рассматриваемый период в 10-и случаях из 15-и к концу гидрологического года наблюдалось иссушение метрового слоя почво-грунтов, достигавшее – 98 мм (1973 – 1974 гидрологический год). Увлажнение метрового слоя почвы также может достигать значительной величины – до 91 мм (1976 – 1977 гидрологический год).

Динамика запасов грунтовых вод верхнего горизонта имеет четко выраженный внутригодовой цикл: пополнение запасов грунтовых вод происходит в весенний период (как правило, в марте-апреле), а сработка – летом. В зимний и осенний периоды может наблюдаться как незначительное пополнение грунтовых вод, так и их сработка. Лишь в отдельные годы, особенно при оттепельных зимах и слабом промерзании почв, внутригодовое распределение может быть нарушено. Так в 1980 – 1981 гидрологическом году пополнение запасов грунтовых вод зимой составило 20 мм, а в весенний период всего 6 мм. Наоборот, при сильном промерзании хорошо увлажненных почво-грунтов ($W_i \geq 0.7W_{HB}$) и образовании так называемого «запирающего» слоя, питание грунтовых вод в зимний период практически прекращается и происходит только их сработка [Комаров, 1980; Вершинина и др., 1985].

В годовом водном балансе изменения запасов грунтовых вод по данным измерений играют на НДСБС меньшую роль по сравнению с другими составляющими водного баланса. Их предельные значения в годовых водных балансах составляют – 15 мм и 25 мм (1987 – 1988 и 1977 – 1978 гидрологические годы, соответственно).

Величины изменений запасов грунтовых вод, полученные по весьма ограниченному количеству скважин, могут рассматриваться, скорее, как «индексные» величины. Кроме того, как было показано выше, колебания средних годовых уровней грунтовых вод верхнего и второго водоносного горизонта имеют сдвигку в несколько лет. Поэтому в балансе вод второго (основного) водоносного горизонта участвуют воды, поступившие на поверхность водосбора в предыдущие годы.

Исследования влагооборота на водосборах с применением изотопов также свидетельствует о том, что в стоке воды данного гидрологического года до 40%

ее объема и более имеет возраст более года [Herrmann, 1998; Sokolov et al., 1998] и, таким образом, сформировалось вне пределов рассматриваемого гидрологического года. Надо иметь в виду, что изотопный анализ позволяет оценить вклад подземных вод различного возраста в формирование стока, но установить точный объем воды данного гидрологического года невозможно, поскольку при замедленном водообмене поступление воды в водоносный горизонт и ее расход происходят по принципу замещения.

Для анализа *изменения структуры и невязок водного баланса* малых водосборов НДВБС, а также для корректного установления границ гидрологического года были использованы графики интегральных сумм приходных и расходных составляющих баланса основного водосбора р. Девицы, а также данные о характерном распределении средних месячных температур воздуха.

Температура воздуха в районе станции относительно устойчиво переходит в область отрицательных значений в декабре (*рисунок 3.1*). Ноябрь является переходным месяцем, со средними температурами воздуха, близкими к нулевой отметке ($-0,4^{\circ}\text{C}$).

Интегральные кривые основных характеристик водного баланса водосбора р. Девица – п. Товарня, построенные по результатам расчетов водных балансов приведены на *рисунке 3.2*. Показателями для определения гидрологического года являются приходная и основная расходная части водного баланса, то есть осадки (P), сток воды и испарение ($R+E$), а также увлажнение почво-грунтов (W_s).

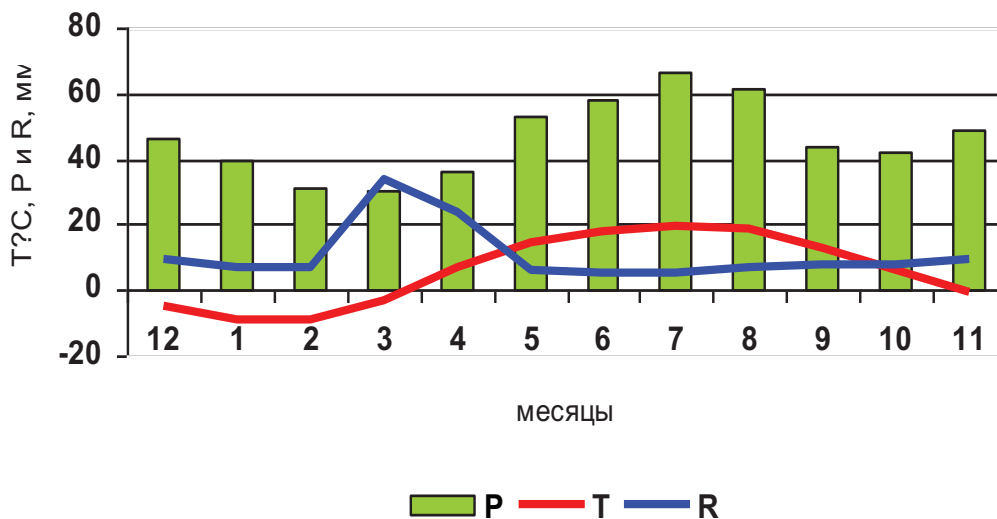


Рисунок 3.1. Внутригодовое распределение средних месячных температур воздуха ($T^{\circ}\text{C}$), средних месячных сумм осадков (P) и слоев стока (R) на водосборе р. Девица – с. Товарня за расчетный период

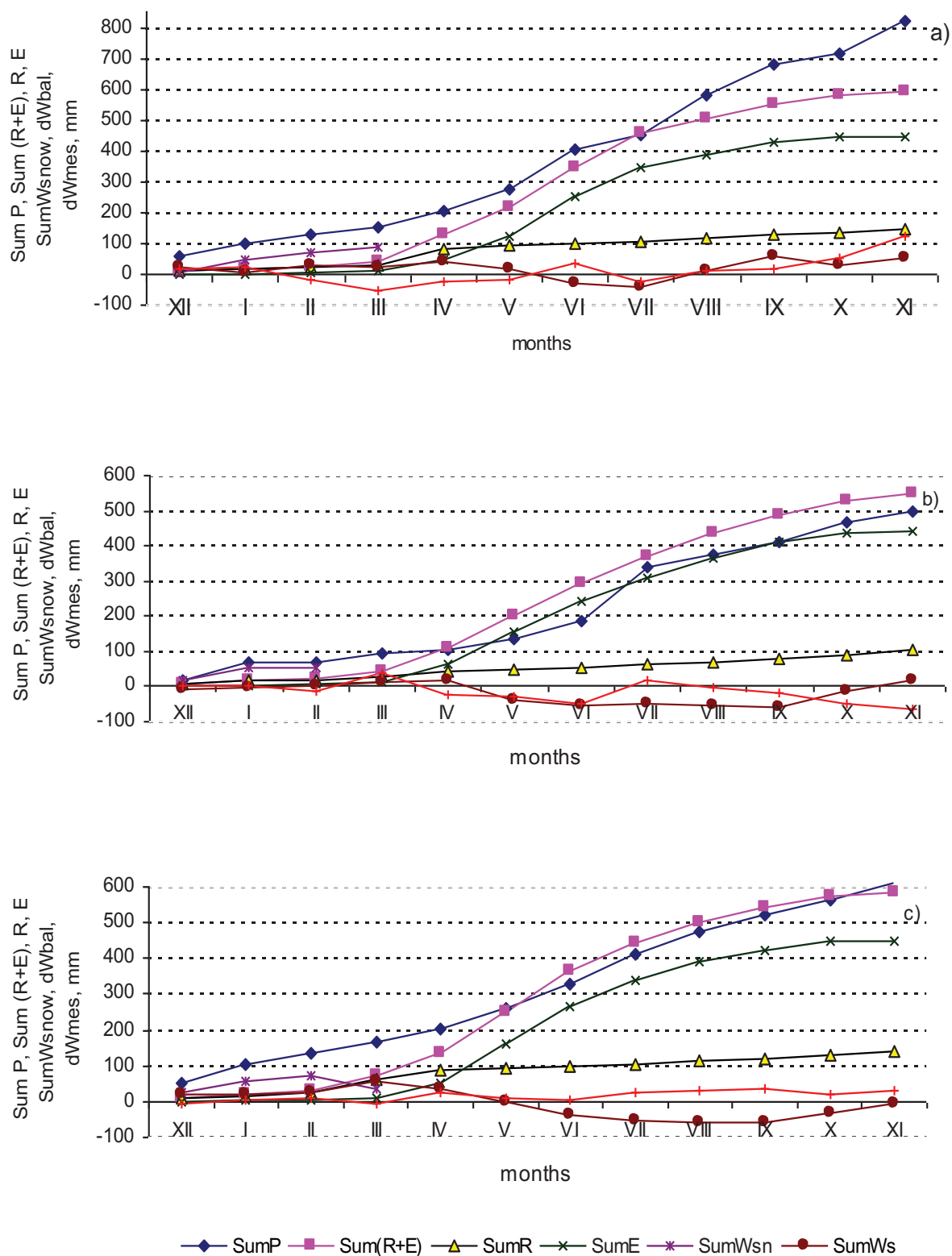


Рисунок 3.2. Распределение интегральных сумм компонентов водного баланса внутри наиболее увлажненного 1979 – 1980 (а), наиболее сухого 1983 – 1984 (б) гидрологических годов и осредненных за период 1973 – 1988 год для водосбора р. Девица – с. Товарня (красным цветом показан ход интегральных сумм невязок)

В наиболее влажном из рассмотренных 1979 – 1980 гидрологическом году, когда сумма годовых осадков с учетом всех видов поправок составила 816 мм (около 2.5% вероятности превышения) накопление влаги на водосборе происходило до июля, когда суммарный расход влаги лишь незначительно превзошел ее поступление на водосбор (*рисунок 3.2a*). В последующий период накопление влаги возобновилось и к концу гидрологического года превысило расходную часть на 200 мм. При этом запасы влаги в верхнем метровом слое почвы восстановились только к концу августа, а к концу ноября увеличились всего на 50 мм. Между тем, рассмотрение интегральной кривой изменения бассейновых запасов влаги, полученной по данным измерений динамики запасов влаги в верхнем метровом слое почвы и грунтовых водах, показывает истощение запасов в этих компонентах с начала июня до начала августа. Сток воды в 1979 – 1980 гидрологическом году лишь на 8 мм превзошел среднее значение, а испарение было равно средней за рассматриваемый период величине.

Недостаточно хороший учет влаги, профильтровавшейся ниже метрового слоя почвы и верхнего водоносного горизонта, послужил причиной значительных невязок баланса в зимний, весенний и, особенно, осенний сезоны (19%, 21% и 46% сезонных сумм осадков, соответственно). В результате невязка годового баланса составила 21% суммы годовых осадков.

В наиболее засушливом из рассмотренных 1983 - 1984 году, когда выпало 499 мм осадков (менее 90% вероятности превышения), аккумуляция влаги на водосборе происходила только в холодный период, до первой декады апреля (*рисунок 3.2b*). После этого наблюдалось стабильное превышение расхода влаги над ее приходом. По данным наблюдений иссушение бассейна началось с третьей декады апреля и продолжалось до конца октября. Невязки водного баланса в начальные сезоны составили 18% зимой, 24% весной и –7% летом, что относительно немного для сезонов. Наблюдавшееся возрастание увлажнения верхнего метрового слоя почвы в осенний период, очевидно, не отразило реальный дефицит увлажнения водосбора в этот сезон – превышение стока и испарения над осадками составило 39 мм, тогда как запасы влаги в верхнем метровом слое почвы возросли на 79 мм (при уменьшении запасов грунтовых вод на 11 мм). Переходящий на следующий гидрологический год дефицит влаги составил около 50 мм. Это предопределило очень значительную сезонную невязку в –147% от суммы осенних осадков и повлияло на увеличение годовой невязки до –16%.

На *рисунке 3.2c* представлен годовой ход интегральных сумм приходных и расходных составляющих баланса и изменения бассейновых запасов влаги, усредненный за весь период 1973 – 1987 годов. Аккумуляция влаги в бассейне происходила всю зиму и большую часть весны (до начала мая) и возобновлялась в середине октября. Запасы влаги в верхнем слое почво-грунтов восстанавливались

только к концу ноября, причем измерения влагозапасов в почве в этом месяце производятся в последних его числах и отражают конечный результат увлажнения почво-грунтов за месяц. Интегральная кривая бассейновых запасов влаги переходит в область отрицательных значений с начала мая до середины – конца ноября, что свидетельствует о том, что для средних условий увлажнения за выбранный период гидрологического года – с декабря по ноябрь осуществляется полный цикл влагооборота.

Очевидно, что полный цикл накопления и расходования влаги в бассейне происходит только в гидрометеорологических условиях, близких к средним значениям. В случаях экстремально влажных или засушливых лет формируются, соответственно, значительные переходящие избыточные величины запасов влаги или их дефицит.

Следует отметить, что гидрологический год для водосборов Нижнедевицкой воднобалансовой станции может быть установлен как с ноября по октябрь, так и с декабря по ноябрь следующего года. В публиковавшихся в ежегодниках Нижнедевицкой ВБС водных балансах границы гидрологического года были приняты по более ранним наблюдениям в 1950-е – 1960-е годы с ноября по сентябрь включительно. По нашему мнению, это не вполне отвечает климатическим условиям рассматриваемого расчетного периода, а, тем более, современным условиям с учетом произошедших со второй половины 1970-х годов климатических изменений, о чем сказано в разделе 2.1. Исходя из этих соображений, а также с учетом характера восстановления влагозапасов в верхнем слое почво-грунтов, нами был принят гидрологический год с декабря по ноябрь включительно. Такие временные рамки гидрологического года, кроме того, облегчают оценку сезонных водных балансов.

Очевидно, что временные рамки гидрологического года не являются постоянными и долговременные климатические изменения не могут не оказывать влияния на них, прежде всего в более южных зонах недостаточного увлажнения ЕТР.

Следует еще раз подчеркнуть, что в экстремально влажные годы переходящие запасы влаги в бассейне для Нижнедевицкой ВБС могут превышать 100 мм. Это неизбежно повышает величину невязки не только в данный год, но и увеличивает невязку водного баланса в следующем гидрологическом году. Переходящие дефициты влаги в наиболее засушливые годы составляют около 50 мм, что оказывает меньшее влияние на невязку водного баланса следующего гидрологического года.

Сезонные невязки водного баланса бассейна р. Девицы – п. Товарня, осредненного за период 1973 – 1988 годы, колеблются в пределах от 10% до –4% сезонных сумм осадков, невязка годового баланса составляет менее 5%, что свидетельствует об удовлетворительной точности расчета водного баланса (Бабкин, Вуглинский, 1982).

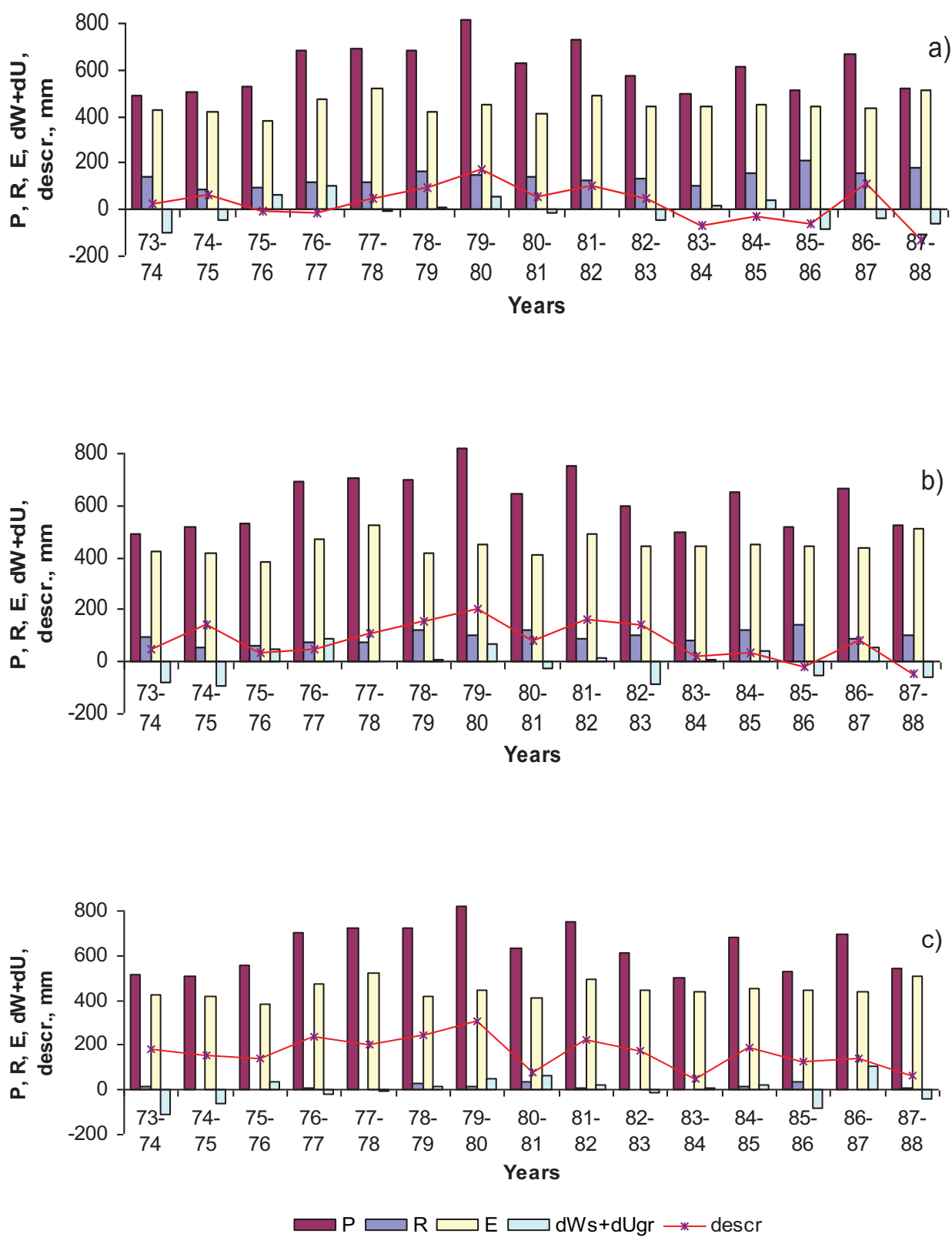


Рисунок 3.3. Изменение компонентов и невязок годовых водных балансов водосборов р. Девицы (а), руч. Ясенок и лога Долгий (с) за 1973-1987 гидрологические годы

Анализ изменений невязок годового водного баланса малых водосборов Нижнедевицкой ВБС показывает, что для водосбора р. Девыцы (*рисунок 3.3а*) невязки колеблются в пределах от -20% до 15% годовых сумм осадков, причем в 5-и случаях из 15-и рассмотренных наблюдаются отрицательные величины невязок. Чаще всего они наблюдаются в более сухие годы, тогда как наибольшие по величине положительные невязки годовых балансов, как правило, приурочены к наиболее влажным годам.

По мере уменьшения площади водосбора и, соответственно, полноты дренирования водоносных горизонтов, невязки годовых балансов возрастают по абсолютной величине. Незначительные по величине отрицательные невязки годовых водных балансов руч. Ясенок наблюдаются в 4-х случаях из 15-и (*рисунок 3.3б*), а в целом невязки для этого водосбора колеблются от -11% до 27% суммы годовых осадков.

А. П. Бочков предлагал приближенно оценивать преуменьшение величины стока малых водотоков за счет неполного дренирования подземного стока по разности между годовым стоком, измеренным на них, и ближайших более крупных реках региона с полным дренированием. В качестве примера им приведены расчеты для водосборов Нижнедевицкой ВБС [Бочков, 1974]. В частности, для руч. Ясенок величина недоучета составила в среднем за период с 1948 по 1969 год 8 мм. По нашим данным за рассмотренный в нашем случае период разность составила 42 мм, то есть более, чем в 5 раз выше, чем по расчетам А. П. Бочкова. Это свидетельствует о том, что питание подземными водами малых водотоков весьма изменчиво даже при осреднении за относительно продолжительные периоды, особенно в условиях климатических изменений.

Для водосбора лога Долгий невязки годовых балансов имеют только положительные значения (*рисунок 3.3с*) и колеблются в пределах $9 - 36\%$ суммы годовых осадков. Это свидетельствует о возрастании роли правильного учета динамики увлажнения зоны аэрации и грунтовых вод для водосборов начального звена водотоков, а также неучтенного в уравнении водного баланса элемента – инфильтрации воды в горизонты подземных вод. Необходимо иметь в виду, что в трех случаях имели место переходящие запасы воды в снеге, что сказалось на величине сезонных и годовых невязок в 1973 – 1974, 1981 – 1982 и 1987 – 1988 годах.

Сезонные водные балансы водосбора р. Девыцы в целом отражают внутригодовые циклы тепло- и влагооборота в лесостепной зоне. Наибольший сток воды наблюдается в весенний период, вторым по водности является зимний сезон. В летний и осенний сезоны сток ниже зимнего и примерно одинаковый по величине. В течение зимы в результате оттепелей, при незначительном испарении, происходит пополнение влагозапасов в почве и грунтовых водах.

Наиболее интенсивное пополнение грунтовых вод осуществляется в весенний период при оттаивании почвы и интенсивном просачивании в нее талой воды. В то же время в этот период испарение резко увеличивается, происходят наиболее значительные потери влаги из зоны аэрации. Летний период характеризуется дальнейшим возрастанием испарения и продолжением иссушения почвы, причем потери влаги из зоны аэрации в этот период по абсолютной величине в среднем меньше, чем в весенний период из-за недостатка доступной для испарения влаги. Летние осадки, как правило, не компенсируют испарение с поверхности водосборов, питание грунтовых вод ограничено и происходит их сработка. С уменьшением прихода солнечной радиации осенью испарение снижается в три-пять раз по сравнению с испарением в летний сезон, возрастают влагозапасы в почво-грунтах, а сток грунтовых вод чаще всего компенсируется их пополнением.

Уравнение водного баланса весеннего половодья имеет следующий вид:

$$P - E - R = \pm \Delta W_{sn} \pm \Delta W_s \pm \Delta U_{gr} \pm \eta \quad (3.7),$$

где P – осадки, выпадающие на поверхность водосбора в период формирования половодья, E – суммарное испарение с поверхности водосбора за период половодья, R – слой стока половодья, $\pm \Delta W_{sn}$ – максимальные предвесенние запасы воды в снеге, ледяной корке и слое воды под снегом (если наблюдается), $\pm \Delta W_s$ – изменение запаса воды в почве за период половодья, $\pm \Delta U_{gr}$ – изменение запасов влаги в грунтовых водах за период половодья, $\pm \eta$ – невязка водного баланса.

Расчеты были выполнены для максимального по слою стока половодья 1986 года и минимального по слою стока половодья 1976 года по трем водосборам НДВБС (Таблица 3.5).

Следует отметить, что продолжительность половодья в обоих случаях была близка по величине, а максимальные запасы воды в снеге и осадки за период половодья в год с минимальным слоем стока были даже несколько выше, чем в году с максимальным слоем стока. При этом в 1986 году запасы влаги в верхнем метровом слое почво-грунтов к концу половодья пополнились, а в 1976 году произошло их иссушение. Пополнение запасов грунтовых вод в 1986 году также было больше. Особенностью весеннего половодья 1976 года было также полное отсутствие поверхностного стока (лог Долгий).

Основное различие заключалось в предвесеннем увлажнении почво-грунтов и глубине их промерзания, которые в 1976 году составляли 339 мм и 18 см, а в 1986 году – 351 мм и 83 см, соответственно. Это еще раз подтверждает, что без надежной

информации об увлажнении почво-грунтов и глубине их промерзания удовлетворительный прогноз слоя стока весеннего половодья невозможен.

Из *таблицы 3.5* видно, что невязки водного баланса весеннего половодья за указанные годы для различных водосборов колеблются от –26 до 93 мм, причем в большинстве случаев они имеют положительные значения. Помимо погрешностей самих измерений и погрешностей осреднения составляющих водного баланса для водосборов, невязка включает в себя также неучтенные элементы, основным из которых является инфильтрация. Скважины грунтовых вод верхнего водоносного горизонта с глубиной залегания водоупора в 5 – 8 м, к тому же не имеющего сплошного распространения, не в полной мере отражают величину инфильтрации ввиду инерционности процесса, выходящего за временные рамки окончания половодья.

Таблица 3.5 – Водные балансы весеннего половодья водосборов р. Девица – п. Товарня (А=103 км²), руч. Ясенок (А=21.7 км²) и лога Долгий (А=2.57 км²) за максимальный и минимальный по слою стока половодья 1986 и 1975 годы, мм

Водосбор	Продолжительность половодья, дней	Снегозапасы и осадки	Сток	Испарение	Изменения запасов воды в почве	Изменения запасов воды в грунтовых водах	Невязка
<i>Максимальный по слою стока половодья 1986 год, предвесенние запасы воды в слое почвы 1 м 351 мм, глубина промерзания почвы 83 см</i>							
р. Девица – п. Товарня	24	112	100* 109**	16	6	16	-26
руч. Ясенок	27	112	66* 70**	16	14	10	6
лог Долгий	20	111	38	16	6	2	49
<i>Минимальный по слою стока половодья 1975 год, предвесенние запасы воды в слое почвы 1 м -339 мм, глубина промерзания почвы - 18 см</i>							
р. Девица – п. Товарня	27	116	14* 15**	35	-5	11	61
руч. Ясенок	29	119	7* 8*	35	-25	9	93
лог Долгий	Стока половодья не было						

Примечание: * - сток за вычетом базисного; ** - измеренный сток.

Отрицательная величина невязки в 1986 году для водосбора р. Девица – п. Товарня связана, по-видимому, с большей долей глубокого подземного питания речного стока, чем было учтено в расчете по базисному стоку перед началом половодья.

Воднобалансовые расчеты, выполненные для периода с наиболее полным комплексом наблюдений на водосборах разного порядка Нижнедевицкой воднобалансовой станции за период с 1975 по 1986 год позволяют выполнить

приблизительную оценку величины инфильтрации влаги в почвогрунтовую толщу. Методологическая основа такой оценки заключается в том, что различие в невязках водного баланса между водосборами р. Девица – п. Товарня ($\eta_{дев}$) и лога Долгого ($\eta_{долг}$) вызвана неучтенным элементом водного баланса для последнего, а именно инфильтрацией (I). Доля невязки расчета водного баланса, связанная со случайными и систематическими погрешностями измерений, и их осреднением по площади водосборов, должна быть близкой по величине. При этом в расчете необходимо исключить долю базисного стока р. Девицы ($R_{баз.дев}$), который сформирован за счет питания водами глубоких водоносных горизонтов, сформированными вне временных пределов данного гидрологического года.

Таким образом, в аналитическом виде уравнение для расчета инфильтрации можно представить следующим уравнением:

$$I = \eta_{дев} - \eta_{долг} - R_{баз.дев} \quad (3.8),$$

Расчеты показали, что величина годовой инфильтрации в подземные горизонты, рассчитанная по уравнению 3.8, может колебаться в широких пределах – от 20 мм, до 170 мм, в зависимости от гидрометеорологических условий года, что совпадает с оценками, приведенными в [Вершинина и др., 1985]. Наименьшие величины инфильтрации сопряжены с наличием «запирающего» слоя, формирующегося в почве в холодные зимы при условии ее осеннего увлажнения до величин, близких полевой влагоемкости, наибольшие – с его отсутствием. Таким образом, при условии полноценных детальнейших воднобалансовых наблюдений на водосборах начального звена гидрографической сети (не дренирующих подземные воды) и малых рек (с их более полным дренированием) возможно с достаточно хорошей степенью достоверности оценить величину инфильтрации за гидрологический год. Очевидно, что для условий лесостепной зоны основная часть инфильтрации формируется в период прохождения весеннего половодья, и такие расчеты можно было бы проводить для этого генетического периода, но невязки водного баланса для него значительно выше, что снижает достоверность полученных результатов и повышает неопределенность.

В обзоре проблемы моделирования инфильтрации в приближении к полевым условиям, выполненном Ф. Х. Дуниным, рассмотрен более детальный подход к применению воднобалансового метода для оценки инфильтрации. Воднобалансовое уравнение ландшафтного выдела или небольшого водосбора, где формируется только поверхностный сток, имеет следующий вид [Дунин, 1980]:

$$F = R - Q - G_a - DS \quad (3.9),$$

где F – объем инфильтрации; R и Q – соответственно измеренные величины осадков и стока; G_a и DS – величины поверхностного задержания и поверхностной аккумуляции осадков. Такой подход сложнее предложенного выше, но, в сочетании с анализом гидрографа и дополнительными полевыми исследованиями (дождевание, использование флюоресцентных красителей), позволяет по мнению автора определить скорость и временной ход инфильтрации, то есть он существенно информативнее.

В современных условиях характерной является ситуация 1975 года, когда поверхностный сток не формируется или составляет незначительную величину. Доминирующими процессами являются инфильтрация влаги в зону аэрации и грунтовые воды, откуда происходит питание водотоков и других водных объектов. Поэтому в формировании стока определяющими факторами становятся гидрогеологические условия бассейнов рек, емкость водоносных горизонтов, глубина вреза их русел и другие факторы, оказывающие влияние на питание и разгрузку водоносных горизонтов. При этом возможны отдельные случаи, когда в течение холодного периода формируется «запирающий» слой в почве.

В заключение раздела следует отметить следующее. Анализ водных балансов водосборов Нижнедевицкой воднобалансовой станции за гидрологический год показывает, что для средних по условиям увлажнения лет годовые балансы водосбора р. Девичьи характерны для малых водосборов лесостепной зоны, рассчитываются с требуемой точностью (невязки годовых балансов не превышают 5%), а выбранный период гидрологического года с декабря по ноябрь отражает полный цикл накопления и расходования влаги. В режиме влагооборота водосборов отчетливо прослеживаются период аккумуляции влаги в бассейнах, продолжающийся с ноября – начала декабря по апрель – начало мая, и период расходования влаги с мая до середины – конца октября.

Для условий высокого увлажнения и в засушливые годы водные балансы рассчитываются с пониженной точностью из-за недостаточно корректного учета ряда компонентов, таких как запасы влаги в зоне аэрации (неполный учет миграции влаги во всей ее толще, а только в слое 1 м), грунтовых водах и, отчасти, испарения, роль которых в эти годы существенно повышается. Не учитываются также процессы фильтрации влаги между верхним и нижними водоносными горизонтами. На снижении точности расчета балансов отдельных лет сказываются также переходящие запасы воды в снеге, если устойчивый снежный покров начал

формироваться в ноябре, т.е. в конце предыдущего гидрологического года, или переходящие дефициты увлажнения бассейнов.

Для водосборов, частично дренирующих основные водоносные горизонты, водные балансы рассчитываются с пониженной точностью. При этом, чем выше базис эрозии водотока и меньше полнота дренирования водоносных горизонтов, тем выше невязка баланса. Так для водосбора руч. Ясенок ($A=21.7 \text{ км}^2$) средняя за 1973 – 1988 годы невязка составила 13%, а для лога Долгий ($A=2.57 \text{ км}^2$) – 27% средних годовых осадков.

Основные расходные компоненты водного баланса – сток и испарение – составляют в балансе в среднем за рассматриваемый период 100% суммы измеренных осадков для всех водосборов, причем доля испарения может составлять от 54 – 55% до 94 – 98% величины измеренных осадков, стока воды – 17 – 41% (для водосбора р. Девицы). Сумма изменений влагозапасов в почво-грунтах и грунтовых водах чаще всего компенсируется в течение гидрологического года.

Для условий Нижнедевицкой ВБС компоненты водного баланса определялись с различной точностью. Сток воды, запасы воды в снеге и в верхнем метровом слое почвы определялись с точностью 5 – 15% и достаточно достоверно отражают их пространственно-временную динамику. Испарение для расчетов водных балансов на водосборах НДВБС определялось с более высокой погрешностью – 16 – 23%. Кроме того, величины испарения принимались по данным наблюдений на одной площадке, что не позволяет учесть различия в испарении с различных сельскохозяйственных угодий и леса.

Как представляется, наибольший вклад в погрешность расчета водных балансов водосборов НДВБС вносит неполный учет изменений запасов влаги в почво-грунтах и грунтовых водах. Особо следует отметить недоучет в балансах влаги, фильтрующейся в толще грунтов ниже слоя 0 – 100 см до основного водоносного горизонта, дренируемого р. Девица. Процесс протекает в течение нескольких лет. Это особенно сильно сказывается при расчетах водных балансов малых водосборов, частично или полностью не дренирующих основной водоносный горизонт.

Необходимо отметить, что слой стока лога Долгого, где в периоды прохождения весеннего половодья и спорадически при продолжительных и интенсивных дождях наблюдается только поверхностный сток, составляет в среднем за рассмотренный период всего около 9% от стока на р. Девица.

Разница в невязках водного баланса р. Девица и руч. Ясенок составляет в среднем около 10% и вызвана различиями в дренировании постоянного водоносного горизонта, залегающего в верхних и средних частях склонов на глубине 20 – 30 метров от поверхности. Руч. Ясенок дренирует верхний горизонт грунтовых вод, приуроченный к четвертичным суглинкам, и на значительном протяжении русла также промежуточный горизонт подземных вод на суглинках и глинах

третичного яруса, который не имеет сплошного распространения, а также основной водоносный горизонт меловых отложений (сеноман-альба), что обеспечивает ему круглогодичный сток воды. Река Девица, разумеется, дренирует все эти горизонты грунтовых и подземных вод. Различие между ними заключается в длине тальвегов, которые к середине 1970-х годов составляли 3 км и 16,5 км, соответственно. Поэтому истощение верхнего водоносного горизонта в 1980-х годах привело к более существенному снижению годового стока руч. Ясенок, тогда как сток р. Девицы в это же время сохранялся на относительно стабильном уровне (см. *рисунок 2.38*). Развитие этих процессов в 2000-х годах привело к деградации водотоков начального звена гидрографической сети, о чем было сказано в Главе II.

Для повышения надежности расчетов водного баланса малых водосборов лесостепной зоны было бы полезно провести специальные исследования для уточнения параметров корректировки осадков с применением осадкомеров в двойной заборной защите, рассмотреть возможность учета в балансах испарения с различных сельхозугодий и постановки экспериментов для оценки миграции влаги в толще почво-грунтов от поверхности до нижнего водоносного горизонта.

Пример Нижнедевицкой ВБС является типичным для равнинных территорий лесостепной зоны ЕТР. Соотношение между быстрым стоком (поверхностным и внутрипочвенным) и грунтовым из более глубоких водоносных горизонтов, питающих речной сток, может отличаться для разных типов ландшафтов вследствие различий в фильтрационных характеристиках, наличия путей стока через трещины и пустоты, особенно в горных условиях и т.д. Однако очевидно, что доля питания речного стока грунтовыми водами очень значительна, а зачастую она доминирует.

3.1.2.2 Примеры расчетов водного баланса водосборов Колымской воднобалансовой станции

В разделе приведены расчеты и анализ водных балансов для трех водосборов Колымской воднобалансовой станции (КВБС), расположенной в горно-таежной зоне многолетней мерзлоты Восточной Сибири, за период с 1970 по 1985 год, когда на станции проводились наиболее полные и детальные наблюдения за компонентами водного баланса.

Колымская воднобалансовая станция была организована в 1948 году с целью изучения региональных особенностей формирования стока воды и мониторинга гидрологического режима в условиях распространения сплошной многолетней мерзлоты горных районов Восточной Сибири. Станция работает непрерывно до настоящего времени, хотя в последние 30 лет программа наблюдений на ней была существенно сокращена.

КВБС расположена на территории Тенькинского района Магаданской области, в пределах Верхнеколымского нагорья и занимает водосбор руч. Контактного, впадающего в р. Правый Итрикан, приток р. Кулу (Правая Колыма). Площадь руч. Контактного в замыкающем створе 21.2 км².

Колымская ВБС располагается в южной части Колымской ландшафтной горной области Северо-Восточной Сибири, охватывающей правобережье Верхней Колымы от истоков р. Бохапчи до верховьев р. Кулу.

Основой рельефа территории станции являются нагорья, сильно расчлененные долинами мелких ручьев и рек. Над нагорьями возвышаются многочисленные хребты с альпинотипными формами рельефа высотой 1800 – 2000 м. В пределах бассейна руч. Контактного сочетаются формы высокогорного, среднегорного и низкогорного рельефа при общем преобладании среднегорья. Высота водоразделов, форма возвышенностей, крутизна склонов и расчлененность рельефа тесно связана с литологией пород и тектоническим строением территории.

Высокогорный рельеф представлен сложными гранитами и гранодиоритами сопками с плавными очертаниями широких вершин и выпуклыми склонами, покрытыми преимущественно крупноглыбовым делювием. Среднегорный рельеф приурочен, главным образом, к полям контактово-измененных пород: роговикам, сланцам и туфогенным породам атканской свиты. Этот тип рельефа сильно расчленен долинами многочисленных водотоков с глубокими седловинами на водоразделах. Склоны покрыты осыпями из делювия сланцев, на нагорных террасах характерны слабонаклонные площадки, лишённые аллювия. В низкогорном рельефе преобладают невысокие возвышенности с мягкими очертаниями и пологими склонами, приуроченные к выходам осадочных пород, преимущественно глинистым сланцам. Распределение площадей водосборов по высотным зонам приведено в *таблице 3.6*.

Таблица 3.6 – Распределение площадей водосборов по высотным зонам в бассейне руч. Контактного

Высотная зона, м абс.	Площадь, км ²	В % от площади водосбора
1700-1500	0.14	0.6
1500-1400	1.21	5.7
1400-1300	1.69	7.8
1300-1200	2.63	12.4
1200-1100	3.95	18.6
1100-1000	5.27	24.9
1000-800	6.31	30.0

Общий вид базы Колымской воднобалансовой станции и части водосбора руч. Контактного в зимний период и в начале лета представлен на *фото 3.2 и 3.3*.

Станция находится в зоне распространения сплошной многолетней мерзлоты. Мощность многолетнемерзлых пород колеблется от 120 – 210 м в долинах до 300 – 400 м на возвышенностях. Глубина сезонного протаивания почво-грунтов изменяется от 0.2 – 0.8 м на склонах теневой экспозиции и в долинах, до 1.5 – 3 м – на световых склонах.

Ручей Контактный заложен по контакту осадочных и интрузивных пород. По всей длине среднего и нижнего течения ручья распространены таликовые зоны. Выходов подмерзлотных вод не отмечено.

В почвенном комплексе станции преобладают почвы каменисто-щебенистые, глинистые, оподзоленные таежные длительно мерзлые и подбуры, на древних основаниях. Значительная часть поверхности водосбора (около 30%) полностью лишена почвенного покрова.

Основной бассейн станции входит в зону предтундровых редколесий зоны светлохвойной тайги. В нижних частях склонов и в долине произрастает даурская лиственница, в среднем поясе – кедровый стланик, карликовая березка и северная ольха. В подлеске – рододендрон, багульник, голубичник. Поверхность почвы покрыта различными типами мхов и лишайников.



Фото 3.2. База Колымской воднобалансовой станции и часть водосбора руч. Контактного зимой



Фото 3.3. Водосбор руч. Контактного в июне

На водосборе руч. Контактного выделено 8 основных типов подстилающей поверхности: гольцы, тундры, кедровники и ольховники, лиственничные редколесья, долинные заболоченные редколесья и болота, леса редкостойные шлейфовые и склоновые, поймы и прирусловые участки и территории, подвергавшиеся антропогенным воздействиям [Королев, 1984]. В бассейне руч. Контактного преобладают гольцы (более 30% площади), кедровники, ольховники и лиственничные редколесья (более 40%) площади). На водосборах ручьев Северный (склон световой экспозиции) и Южный (склон теневой экспозиции) преобладают, соответственно, кедровники и ольховники (около 60% площади) и лиственничные редколесья (более 40% площади). Распределение этих типов поверхностей по площади рассматриваемых водосборов приведено в *таблице 3.7*.

Карта-схема распределения типов растительности поверхности по водосбору руч. Контактного приведена на *рисунке 3.4*.

Расчеты водных балансов были выполнены для водосборов ручьев Контактный – Нижний (основной водосбор КВБС), Северный и Южный, характеризующих основные типы подстилающей поверхности бассейна. В *таблице 3.8* приведены их гидрографические характеристики.

Таблица 3.7 – Распределение типов подстилающей поверхности на водосборах КВБС (% от площади водосбора)

Тип поверхности	Ручей Контактный – Нижний	Ручей Северный	Ручей Южный	Ручей Морозова
Гольцы	31.1	23.4	11.1	96.8
Тундры	1.3	-	-	2.4
Кедровники и ольховники	26.7	59.8	22.2	0.8
Лиственничные редколесья	13.8	-	40.7	-
Долинные заболоченные редколесья, болота	9.1	1.2	-	-
Леса редкостойные шлейфовые и склоновые	10.7	10.4	25.9	-
Пойменные и прирусловые участки	7	5.2	-	-
Антропогенные участки	0.3	-	-	-

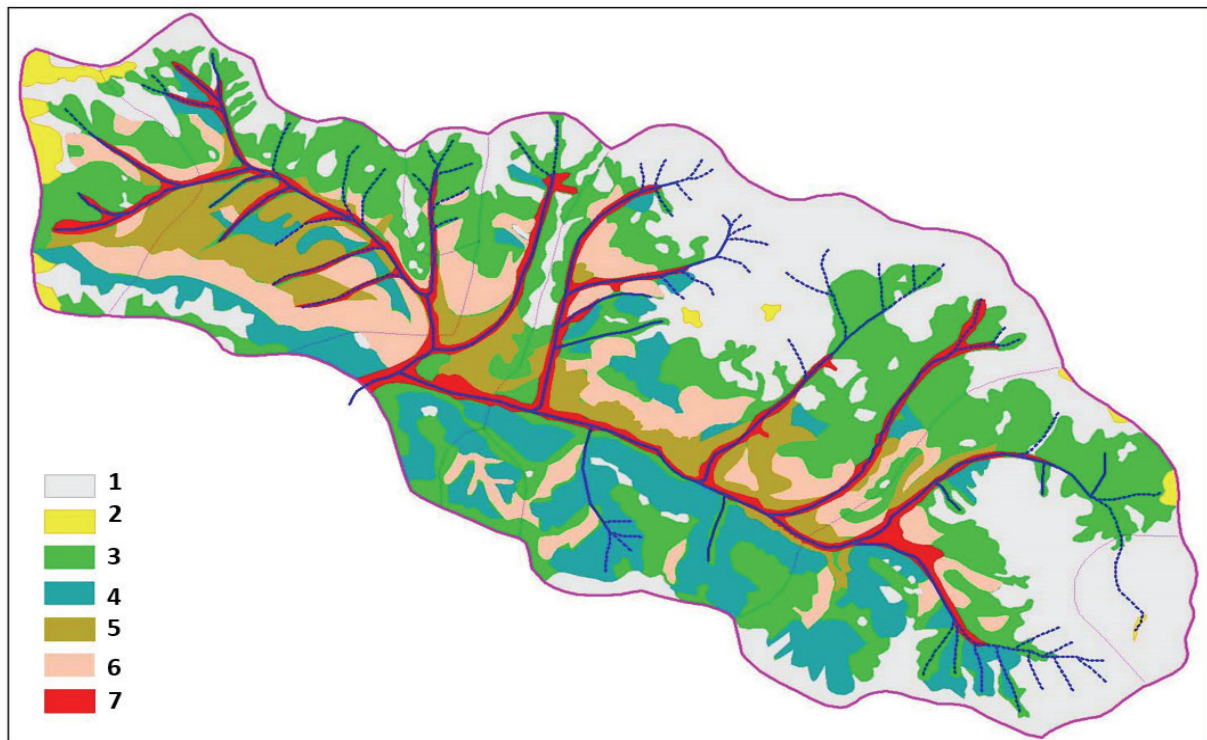


Рисунок 3.4. Схематическая карта распределения типов растительности на водосборе ручья Контактного (1 – гольцы; 2 – горная тундра; 3 – кедровый стланик и карликовая березка; 4 – лиственничное редколесье с примесью северной ольхи; 5 – лиственничное редколесье долин, заболоченные земли; 6 – лиственничное редколесье террас и нижних частей склонов; 7 – старые вырубки)

Таблица 3.8 – Гидрографические характеристики водотоков КВБС

Название водотока	Площадь, км ²	Длина, км	Средняя ширина водосбора, км	Средняя высота, м	Уклон, ‰		Год начала наблюдений
					ручья	водосбора	
Контактный – Нижний	21.2	7.1	3.7	1070	57.6	407	1948
Северный	0.38	0.74	0.38	1020	175	388	1958
Южный	0.27	0.51	0.35	985	235	303	1960
Морозова	0.63	0.97	0.45	1370	326	649	1968

Программа наблюдений на КВБС была составлена на основе «Руководства воднобалансовым станциям» («Руководство...», 1973) с учетом климатических особенностей и особенностей подстилающей поверхности территории. В программу работ станции входили следующие виды наблюдений: метеорологические, актинометрические и теплбалансовые, за стоком воды, атмосферными осадками и снежным покровом, ходом оттаивания и промерзания почво-грунтов, испарением с поверхности почвы, снега и воды.

Ниже приведена информация о пунктах наблюдений, данные по которым были использованы для расчетов водных балансов. Схема размещения пунктов наблюдений на Колымской ВБС приведена в Главе 1 на *рисунке 1.3. гидрометрические наблюдения* на рассматриваемых водосборах проводились на гидростворах, оборудованных самописцами уровня воды и различными гидрометрическими сооружениями: на руч. Контактный – Нижний – гидрометрическим мостиком, на ручьях Северный и Южный, соответственно, гидрометрическим лотком и треугольным водосливом. Уровни воды контролировались игольчатыми рейками.

Метеорологические наблюдения в рассматриваемый период осуществлялись на одной метеоплощадке «Нижняя» по программе метеостанции первого разряда. Высота площадки над уровнем моря 848 м, угол закрытости по румбам 11°, тип защищенности по Ц. А. Швер Пб.

Наблюдения за атмосферными осадками проводились с применением осадкомеров Третьякова, плювиографов и почвенных дождемеров. В холодный период года на водосборе руч. Контактного действовали до 10 осадкомеров с защитой Третьякова, расположенных по преимуществу вблизи от базы станции (на водосборах ручьев Северный и Южный в этот период наблюдения проводились по одному осадкомеру на каждом). В теплый период года – с мая по сентябрь – количество осадкомеров увеличивалось так, чтобы осветить наблюдениями все основные высотные зоны и все экспозиции склонов. В мае и сентябре в отдельные годы количество осадкомерных пунктов в бассейне руч. Контактный возрастало

до 25-и, в июне-августе – до 35-и, в бассейнах ручьев Южный и Северный, соответственно, до 2-х и 3-х, Морозова – до 3-х осадкомеров. При этом в июне – августе (то есть в период выпадения наибольшего количества жидких осадков) использовалось до 19-и почвенных дождемеров.

Запасы воды в снеге оценивались по данным маршрутных снегосъемок, которые охватывали все типы подстилающей поверхности. Высота снега измерялась через каждые 10 м, плотность – через 100 м (на водосборе руч. Морозова через 5 м и 50 м, соответственно). Для водосбора руч. Контактного общая протяженность маршрутов достигала более 11 км, Северного – 1750 м, Южного – 1400 м.

Испарение с поверхности почвы оценивалось по данным наблюдений на почвенно-испарительных площадках, количество которых менялось от двух в начале 1970-х годов до четырех (с 1976 г.). В соответствии с принятой методикой наблюдений каждая площадка была оборудована двумя испарителями ГГИ 500-30 (на 20 см меньше стандартного, ввиду невозможности зарядки стандартных монолитов) и почвенным дождемером. Наблюдения проводились с момента оттаивания верхнего слоя почвы до глубины около 30 см до начала промерзания почвы. Обычно период наблюдений продолжался со второй – третьей декады мая до второй декады сентября. Испарение с поверхности почвы оценивалось также по данным теплосбалансовых наблюдений (наблюдения были начаты с 1976 года). Испарение со снега оценивалось по наблюдениям на снегоиспарительной площадке, оборудованной испарителями ГГИ 500-6.

Уравнение водного баланса и определение его составляющих за гидрологический год, принятое для расчета водных балансов малых водосборов Верхней Колымы, имеет следующий вид:

$$P - E - R = \pm \Delta W_s \pm \Delta W_{sn} \pm \Delta W_{ice} \pm \eta \quad (3.9)$$

где P – осадки, E – испарение, R – сток воды, $\pm \Delta W_s$ – изменение запаса воды в почве, $\pm \Delta W_{sn}$ – изменение запаса воды в снеге, $\pm \Delta W_{ice}$ – изменения запасов гольцовых и других (конжеляционных и сегрегационных) льдов в толще делювия, $\pm \eta$ – невязка водного баланса и неучтенные компоненты.

Ввиду отсутствия данных наблюдений за изменениями влаги в почве ($\pm \Delta W_s$) и толще делювия (гольцовые и другие льды – $\pm \Delta W_{ice}$) эти компоненты водного баланса отдельно не рассматривались и входили в баланс как составная часть невязки баланса. В уравнение (3.9) не включены изменения запасов грунтовых вод, поскольку, по имеющимся данным, водотоки КВБС в пределах водосбора практически не дренируют горизонты подземных вод за исключением взаимодействия с таликовой зоной ниже замыкающего створа, возможное влияние которой хотя и не было количественно установлено, но должно иметь ограниченный эффект.

Определение начального месяца гидрологического года предполагает установление для региона такого периода, когда в цикле накопления и расходования влаги наблюдается наименьшая преобладанность. Для Верхней Колымы таким месяцем в большинстве случаев является октябрь, когда устанавливается отрицательная температура воздуха и практически полностью прекращаются процессы активного влагооборота, устанавливается режим накопления твердых осадков (сток воды прекращается, испарение близко нулю). Холодный сезон установлен с октября по апрель, теплый – с мая по сентябрь. Оба эти месяца являются переходными, когда температура воздуха переходит через 0°C , соответственно, в сторону положительных и отрицательных значений (рисунок 3.5). Более детальное деление гидрологического года на общепринятые сезоны представляется нецелесообразным, поскольку на самых малых водосборах весенний и осенний сезоны имеют продолжительность около месяца (как правило, соответственно, май и сентябрь). Для водосборов разного высотного диапазона, с различной преобладающей экспозицией склонов и подстилающей поверхностью переходные периоды могут отличаться по времени от принятых для более крупных водотоков, интегрирующих эти различия.

Для северо-востока АТР гидрологический год определяется преимущественно температурным режимом, который условно подразделяет гидрологический год на «холодный» и «теплый» периоды. Для условий Колымской воднобалансовой станции «холодный» период длится с октября по середину – конец апреля, а «теплый» период – с мая по сентябрь (рисунок 3.5). Соответственно, гидрологический год имеет эти временные рамки, то есть с октября по конец сентября.

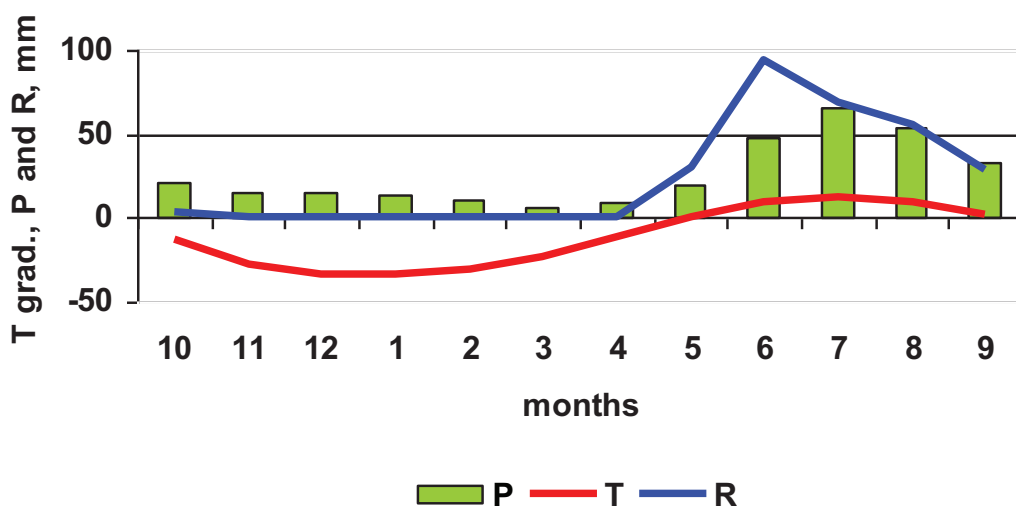


Рисунок 3.5. Внутригодовое распределение средних месячных температур воздуха ($T^{\circ}\text{C}$), средних месячных сумм осадков (P) по данным метеоплощадки «Нижняя» и слоев стока (R) на водосборе ручья Контактный – Нижний

На *рисунке 3.6* приведены интегральные кривые компонентов водного баланса водосбора руч. Контактный – п. Нижний (Колымская ВБС), водные балансы для которого были рассчитаны за период с 1970 по 1985 годы.

В наиболее влажном 1983 – 1984 гидрологическом году накопление влаги на водосборе продолжалось с октября до начала июня (*рисунк 3.6а*). В течение июня приходные и расходные компоненты водного баланса были близки по величине, а, начиная с июля, расходование влаги, то есть сток и испарение превысили осадки. Необходимо отметить, что в этом году помимо наибольшей годовой суммы осадков 495 мм наблюдалось и наивысшее за рассматриваемый период испарение 178 мм, тогда как сток воды был выше среднего всего на 64 мм (359 мм). В целом внутригодовой ход влагооборота соответствовал среднему многолетнему (*рисунк 3.6с*), так же, как и внутригодовой ход невязок баланса, которые имеют положительные или близкие нулю значения в мае-июне, когда расходуются накопленная в течение холодного сезона влага и относительно невелико испарение, и отрицательные значения невязок, начиная с июля.

Отрицательные величины невязок свидетельствуют о наличии неучтенной влаги, сформированной переходящими запасами воды в снеге, а также гольцовыми и другими льдами в толще делювия. При этом отметим, что принятое к расчету испарение может быть занижено на величину порядка 20% [Бояринцев, 1980].

Засушливый 1975 – 1976 гидрологический год (*рисунк 3.6б*) характеризовался самым малым за рассматриваемый период количеством осадков на водосборе руч. Контактного (312 мм), испарением 128 мм (всего на 9 мм ниже среднего) и самым низким за рассмотренный период стоком воды – 142 мм.

В условиях КВБС, где сток воды является основным расходным компонентом баланса, в среднем вдвое превосходящем испарение, такое сочетание компонентов привело к парадоксальному на первый взгляд результату: на протяжении всего наиболее засушливого 1975 – 1976 гидрологического года накопление влаги на водосборе превышало ее расходование, а невязка баланса была положительной. При этом можно полагать, что недоучет испарения компенсировался дополнительным питанием водотоков за счет таяния гольцовых льдов и склонового стока, формируемого при оттаивании верхнего слоя мерзлоты.

Суммарное увлажнение водосборов в зоне горной тайги Северо-Востока АТР в меньшей степени влияет на невязки водных балансов последующих гидрологических годов, чем на водосборах ЕТР, поскольку доминирующими составляющими водного баланса являются осадки и сток воды.

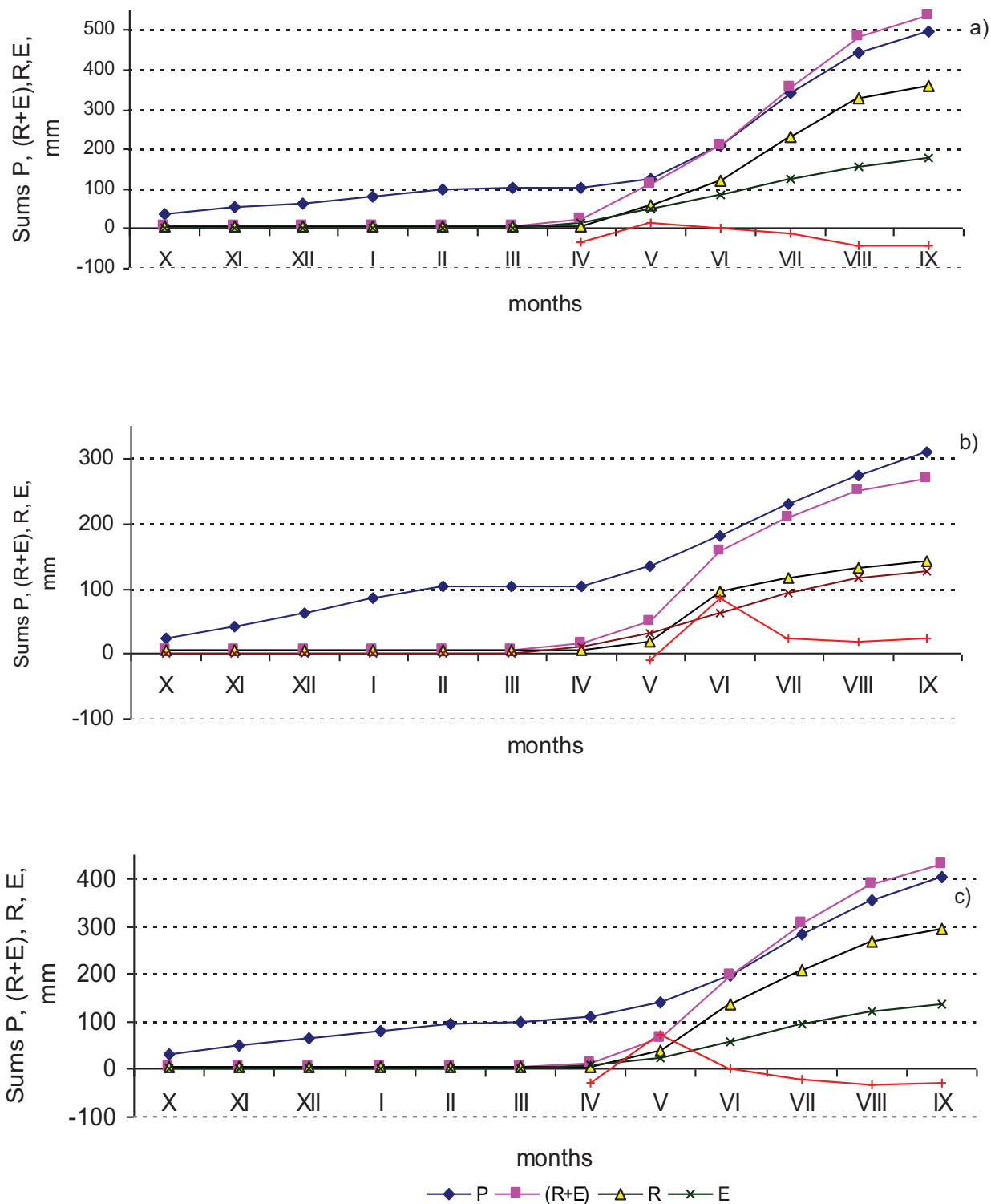


Рисунок 3.6. Распределение интегральных сумм компонентов водного баланса внутри наиболее увлажненного 1975 – 1976 (а), наиболее сухого 1983 – 1984 (б) гидрологических годов и осредненных за весь период (с) для водосбора руч. Контактный – п. Нижний (красным цветом показан ход интегральных сумм невязок баланса)

Осадки. Надежность оценки осадков – приходной части водного баланса – определяется точностью измерения и достаточной освещенностью наблюдениями рассматриваемой территории.

Реальные осадки, выпадающие на поверхность водосбора, отличаются от измеренных на величину инструментальной погрешности, погрешности осреднения величины осадков по площади водосбора и величину перехвата осадков растительностью. Эти вопросы рассмотрены выше в разделе 3.1.2.1.

Потери осадков на ветровой недоучет за теплый период оценивались сравнением величин осадков, измеренных почвенным дождемером и осадкомером Третьякова. Поправочный коэффициент составил 1.05. Для твердых осадков поправочный коэффициент был принят равным 1.1 по аналогии с данными, полученными на полигоне Могот экспедиции БАМ ГГИ. Все указанные поправки к измеренным осадкам были введены при расчетах водных балансов.

В среднем за год суммарная величина всех видов поправок к измеренным осадкам составляет 15 – 17% их величины.

Перехват осадков растительностью на КВБС не оценивался, хотя по визуальным наблюдениям перехват жидких осадков кедровым стлаником может быть достаточно велик. По данным эпизодических наблюдений на полигоне Могот, где площадь покрытия водосборов кедровым стлаником невелика, в зависимости от числа тактов дождя перехват осадков этим типом растительности может достигать 15 – 20 мм за каждый дождь. Что касается перехвата осадков лиственничным редколесьем, то, по данным наблюдений на полигоне Могот, эта величина составляет 2 – 8% от суммы жидких осадков, что соответствует данным других исследований [Павлов, 1979]. При расчете водных балансов поправки на перехват осадков растительностью не вводились.

Что касается погрешности на осреднение осадков по площади водосбора, то по данным [Голубев и Федорова, 1981] она составляет около 4% при наличии 1 осадкомерного пункта на 10 км². При имеющейся освещенности территории наблюдениями за осадками, можно считать, что в теплый период года осадкомерная сеть отражает реальное распределение осадков по территории водосбора с погрешностью, менее указанной величины. Сопоставление измеренных осадков с величиной запасов воды в снеге показало, что в большинство лет осадкомерная сеть вполне адекватно отражает количество выпавших осадков. Существенные расхождения в ряде случаев (от 40 до 60 мм) связаны, главным образом, со значительным количеством твердых осадков, выпавших в конце сентября, и не вошедших в расчет. При расчетах водных балансов принимались средние арифметические величины осадков по осадкомерам, расположенным на водосборах.

Запасы воды в снеге. Большая протяженность маршрутных снегосъемок на всех исследуемых водосборах, покрывающих все типы подстилающей поверхности,

позволяет утверждать, что наблюдаемая величина максимальных снеготазпасов удовлетворительно отражает реальную ситуацию. В то же время следует отметить, что измерения плотности снега на территориях, покрытых кедровым стлаником, сильно затруднены из-за того, что стланик «ложится» под снег, и возможны значительные погрешности при отборе снежных монолитов весовым плотномером. На крупноглыбовых осыпях сложно измерить высоту снега, количество снега, просыпавшегося в полости между камнями при снегосъемке, также не учитывается. Поэтому погрешность оценки запасов воды в снеге в условиях КВБС может быть не менее 15% измеренной величины.

Запасы воды в снеге (W_{sn}) рассчитывались для каждого вида поверхности по формуле:

$$W_{sn} = H_{sn}\rho_{sn} + 0.7H_{ice} \quad (3.10)$$

где H_{sn} и ρ_{sn} – средняя высота и плотность снега, соответственно, H_{ice} – слой ледяной корки в мм. Для водосборов запас воды в снеге был принят как средний взвешенный с учетом доли площади следующих типов поверхностей: гольцы, осыпи, поросшие стлаником, лес. Вода под снегом на КВБС не наблюдалась, а ледяная корка отмечалась только на водосборе руч. Морозова (крупноглыбовая осыпь).

Испарение является одним из элементов водного баланса, определение которого вызывает наибольшие сложности во всех природных зонах, а в зоне мерзлоты в особенности. Используемые методики наблюдения за испарением – с применением весовых испарителей или теплового баланса – разработаны для условий ЕТР и не адаптированы к условиям Восточной Сибири.

Наблюдения за испарением со снега проводились на снегоиспарительной площадке в 1970-1972 годах с момента установления снежного покрова высотой более 6 см (конец сентября – начало октября) до момента, когда в конце периода снеготаяния можно зарядить снежный монолит (как правило, это первая декада мая). Поскольку было установлено, что в период с ноября по февраль месячные величины испарения со снега постоянно близки нулю, наблюдения в эти месяцы были прекращены. При расчетах водных балансов величина испарения со снега, полученная по наблюдениям на снегоиспарительной площадке, распространялась на все водосборы. В периоды весеннего снеготаяния при отсутствии наблюдений величина испарения определялась по эмпирической формуле:

$$E = 0.24\Sigma d \quad (3.11)$$

где Σd – сумма суточных дефицитов влажности воздуха за период.

Испарение с поверхности почвы для расчетов водных балансов принималось по данным наблюдений на почвенно-испарительных площадках, которые были оборудованы на участках с различными типами мерзлотных горно-таежных почв и

подбуров. Для водосбора руч. Контактного принималась средняя арифметическая величина из величин испарения, наблюдаемых на всех площадках, для водосборов ручьев Северный и Южный – данные ближайших к ним и сходных по типу наиболее распространенных на этих водосборах почво-грунтов площадок.

Сложность применения метода весовых испарителей в условиях КВБС обусловлена высокой щебенистостью почво-грунтов, что затрудняет зарядку монолитов в испарителях. Поэтому высота монолитов была ограничена 30 см. Наличие мерзлоты делает возможной зарядку монолитов только после оттаивания верхнего слоя почвы на эту глубину, из-за чего в начальный период после окончания снеготаяния наблюдения за испарением не проводятся. Обычно такие периоды имеют продолжительность 10-20 дней. За эти периоды испарение определялось по эмпирической формуле, полученной на полигоне Могот для сходных условий:

$$E = 0.38\Sigma d , \quad (3.12)$$

Экспериментальные работы с применением лизиметров и испарителей специальной конструкции, в которых поддерживался уровень воды на уровне границы протаивания грунта (уровне стояния надмерзлотных вод), проведенные на КВБС, показали, что в результате искажения температурно-влажностного режима в монолитах обычные приборы занижают испарение с мерзлотно-таежных почв и подбуров в среднем в 1.2-1.5 раза, что в общем согласуется с данными других исследований [Вершинин и др., 1981]. Однако величина занижения реального испарения с различных типов поверхности требует уточнения.

Были также проведены экспериментальные наблюдения за испарением со сфагнома, ягеля и мелкозернистой осыпи. Эксперименты показали, в частности, что для поверхностей, покрытых сфагнумом, испарение может в два раза превышать испарение с поверхности воды. Для нетранспирирующих поверхностей (ягель, осыпь) величина испарения определяется их водоудерживающей способностью и тесно связана с количеством дождей [Бояринцев, 1980]. Для поверхностей, покрытых ягелем, может быть использована зависимость:

$$E = 5\Sigma N , \quad (3.13)$$

где коэффициент 5 – средняя величина перехвата осадков ягелем за один дождь, равная 5 мм, ΣN – количество дождей.

Для осыпей эта зависимость может быть представлена в виде, предложенном Соседовым [Соседов, 1976]:

$$E = a\Sigma N , \quad (3.14)$$

где a - коэффициент, учитывающий перехват осадков осыпью данной крупности, ΣN – количество дождей. По данным исследований испарение

с осыпей составляют примерно 30% величины испарения с мерзлотно-таежных почв [Кузнецов, 1971].

Величины испарения, по уравнению теплового баланса определялись за период с июня по август (в отдельные годы по сентябрь), начиная с 1975 года, на одной площадке (один вид поверхности). Ввиду недостаточно полной информации об определении теплоемкости почвы и других характеристик при оценке тепловых потоков в почву эти данные рассматривались только в качестве справочных данных.

Сток воды считается наиболее точно измеряемой составляющей водного баланса, особенно при использовании гидрометрических лотков и водосливов, и хорошей освещенности зависимостей расходов воды от уровней измеренными расходами, как это имеет место на КВБС. Погрешность определения стока воды при детальном измерении расходов не превышает 6% [Коновалов, 2001].

Нельзя не отметить ряд проблем, возникающих при измерениях стока воды. В частности, применение самописцев уровня воды ограничено теплым периодом, а в переходные периоды весной и осенью уровни воды измеряются 2 раза в сутки и при измерении расходов. Кроме того, не вполне ясно влияние таликовых зон и величины подруслового стока на изменение водности по длине водотока. На руч. Контактный в створе Нижний, где имеется обширная таликовая зона довольно мощный слой русловых отложений, в отдельные периоды обнаружены превышения или дефицит стока воды по сравнению с суммарным стоком, измеренным в створе руч. Контактный – п. Средний, и на притоках, впадающих в основной водоток на нижнем участке ручья до замыкающего створа. Установить причину невязки не удалось.

Роль изменений запасов воды в гольцовых и других льдах в толще делювия. Помимо переходящих запасов воды в снежном покрове (если он начинает формироваться в конце сентября), которые могут быть оценены по материалам наблюдений, в условиях Верхней Колымы существуют неучтенные переходящие запасы влаги, которые формируются в осенний период в виде гольцовых, конжеляционных и сегрегационных льдов в толще делювия и, в зависимости от климатических условий, могут накапливаться и расходоваться не один год [Сушанский, 1999].

Для подтверждения этого тезиса рассмотрим элементы водного баланса руч. Морозова, водосбор которого на 96.8% покрыт крупнообломочной осыпью, за период 1969 – 1984 годы. Изучение гидрологического режима водосборов, сложенных осыпями является сложной задачей, в частности, по причине затруднений при определении нижней границы водосбора. Для водосбора руч. Морозова (Водопадный) эта проблема решена самой природой, поскольку его нижняя граница ограничена выходом скальных пород (*фото 3.4*).

В таблице 3.9 приведены величины максимальных снегозапасов и осадков за периоды весеннего половодья ($W_{sn}+P$), осадков за летний период (от даты окончания

половодья до 1.09) и за принятый для этого региона гидрологический год, сток за эти периоды. Как можно видеть из приведенной таблицы в 1970 году, когда наблюдались минимальные запасы воды в снеге, годовой сток превысил осадки на 70 мм. В 1978 году, при максимальных запасах воды в снеге и максимальных за период наблюдений годовых осадках сток был меньше осадков всего на 2 мм. В среднем за весь рассматриваемый период годовой сток превосходил осадки на 10 мм. За 16 лет в 11-и случаях сток превосходил осадки или разница была близка нулю (наибольшая величина достигала 93 мм в 1980 году), в пяти случаях осадки были больше стока на 13 – 77 мм. При этом необходимо принять во внимание испарение со снега в период снеготаяния и с осыпи в теплый период года.



Фото 3.4. Замыкающий створ на руч. Морозова (Водопадный)

Таблица 3.9 – Элементы водного баланса (мм) водосбора руч. Морозова за период 1969 – 1984 годы – средние за период, в годы максимальных и минимальных запасов воды в снеге

Год	Весеннее половодье					Лето (до 1.09)				Год			
	Начало	Конец	W_s+P	Q	W_s+P-Q	P	Q	E	P-Q-E	P	Q	E	P-Q-E
1970	18.05	3.07	175	210	-35	209	233	38	-62	373	443	44	-114
1978	28.05	3.08	573	552	21	32	45	30	-14	599	597	30	-37
Среднее			264	227	37	162	219	31	-45	424	426	35	-35

Примечание: осадки за теплый период исправлены с коэффициентом 1.05; испарение принято равным 30% от наблюдаемой на испарительной площадке №1 величины

Суммарное испарение на водосборе руч. Морозова за теплый период составляет около 30% от наблюдаемого по испарителям и может достигать величины в 30 – 50 мм [Кузнецов, 1971]. Из этого следует, что в среднем за год за рассматриваемый период сток и испарение с глыбовой и крупнообломочной осыпи превышают осадки по крайней мере на 35 мм. Попытки разобрать осыпь и достичь горизонта гольцового льда не увенчались успехом, но на нижней поверхности валунов в разгар лета были обнаружены ледовые образования (ледяная корка, сосульки).

Таким образом в целом за период 1969 – 1984 годы на водосборе руч. Морозова за принятый гидрологический год наблюдается постоянное превышение расходной части баланса над его приходной частью, что должно было бы привести к деградации запасов воды в гольцовых льдах. Однако этого не происходит в силу ряда причин.

Средняя температура воздуха в сентябре на уровне метеоплощадки «Нижняя» (высота 850 м) составляет около 2°C, а дата устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C в область отрицательных значений в различные годы колеблется от 4 сентября до 30 сентября. Зона распространения гольцов и осыпей расположена существенно выше. В частности, диапазон высотных отметок водосбора руч. Морозова составляет 1200 – 1700 м и температуры в сентябре там могут уходить в область отрицательных значений раньше, чем на остальной части водосбора руч. Контактного. Сравнение дат устойчивого перехода через 0°C в область отрицательных значений на метеоплощадках «Нижняя» и «Верхняя» (высота 1220 м) за период их совместной работы в большинстве случаев показало расхождение всего в 1 – 2 дня, хотя в отдельные годы оно достигает 7-10 дней. При выпадении жидких и смешанных осадков в этом месяце (около 60 мм в среднем по данным наблюдений на водосборе руч. Морозова) они частично депонируются в осыпи и

могут не только компенсировать отрицательный баланс, но и превышать его. В отдельные годы сток на руч. Морозова прекращается в конце августа или первых числах сентября (например, в 1978 и 1984 годах). В большинстве случаев сток с водосбора руч. Морозова в сентябре весьма незначителен и чаще всего полностью прекращается в середине месяца.

Поэтому гидрологический год для данного типа ландшафта фактически имеет продолжительность с сентября по август. Для такого гидрологического года в среднем за рассматриваемый период осадки на водосборе руч. Морозова составляют 472 мм, сток – 424 мм, испарение – 35 мм, невязка – 7 мм. Соответственно, средний коэффициент годового стока для этого водосбора составляет около 0,94. Разумеется, нельзя не учитывать, что надежность определения составляющих водного баланса для таких водосборов, особенно в отношении испарения, оставляют желать лучшего.

В перспективе было бы целесообразно изучить гидрологический режим водосборов с большой долей осыпного типа ландшафта более детально, тем более, что наряду с глыбовыми осыпями на северо-востоке АТР широко распространены осыпи, сложенные глинистыми сланцами и другими материалами, реальный сток с которых необходимо учитывать при проектировании объектов горнорудных предприятий, транспортной сети и т.п. В частности, в период работы экспедиции ГГИ в бассейне р. Томпо в отрогах Верхоянского хребта (Якутия) при описании осыпей, сложенных глинистыми сланцами, в разгар лета было отмечено большое содержание льда непосредственно в их верхнем слое, в отличие от валунной осыпи.

Следует отметить, что в условиях изменения климата, выражающихся в повышении температуры воздуха и количества жидких осадков, наряду с деградацией мерзлоты, может произойти деградация запасов гольцовых льдов. Начало этим процессам было положено еще в начале 1990-х годов, когда по данным наблюдений за промерзанием и оттаиванием почво-грунтов на метеоплощадке «Нижняя» глубина сезонно-талого слоя возросла в среднем на 10 см, а продолжительность его существования увеличилась примерно на 15 дней.

Значение вклада влаги, образовавшейся при таянии гольцовых льдов, в водный баланс водосбора руч. Контактный не следует переоценивать, поскольку общая площадь, покрытая крупнообломочными осыпями не превышает 10% площади его водосбора, хотя нельзя также отрицать ее влияние на погрешность расчета.

Анализ результатов расчета водного баланса. Водный баланс был рассчитан для водосборов ручьев Контактный – Нижний, Южный и Северный за период с 1970 по 1985 год (15 гидрологических лет). В *таблицах 3.10 – 3.12* приведены водные балансы по трем названным выше водосборам за 1975 – 1976 и 1983 – 1984 гидрологические годы, когда наблюдались наименьшая и наибольшая за рассматриваемый период

сумма годовых осадков обеспеченностью, соответственно, около 70% и менее 1%, и средние за период балансы для этих водосборов. Для оценки обеспеченности суммы годовых осадков использовались данные за 1948 – 1985 годы.

Водные балансы рассчитывались ежемесячно и суммировались за холодный (октябрь-апрель) и теплый (май-сентябрь) периоды, а также в целом за гидрологический год.

Все основные, измеряемые на КВБС, компоненты водного баланса – осадки, сток и испарение – определялись методами прямых наблюдений, главным образом инструментально. При этом расчетные эмпирические зависимости применялись только для оценки испарения с поверхности снега и почвы за ограниченные периоды (максимальный период косвенных расчетов составлял месяц).

Режим отдельных составляющих водного баланса. Режим выпадения осадков на водосборах Колымской ВБС характеризуется значительной неравномерностью в их внутригодовом распределении. Выпадение твердых осадков и начало снегонакопления относится, как правило, к концу сентября – началу октября (хотя выпадение твердых осадков, в том числе и в значительных количествах, отмечалось и в теплый период года). Наибольшее количество твердых осадков выпадает обычно в октябре – в среднем 32 мм за период с 1970 по 1985 год (до 71 мм в 1973 году), наименьшее – в марте – апреле (от 1 до 32 мм). В целом за холодный сезон за рассматриваемый период выпадало от 52 до 172 мм осадков (от 11 до 39% годовой суммы осадков), в среднем – 125 мм.

Выпадение жидких осадков наблюдается, как правило, со второй половины мая до середины сентября. В мае количество осадков обычно относительно невелико – от 6 до 62 мм. Наиболее значительные осадки, формируемые чаще всего ливневыми осадками, выпадают в июле-августе. В среднем за теплый период года выпадало 302 мм осадков. За рассматриваемый период средняя по водосбору руч. Контактного максимальная месячная сумма осадков составила 138 мм (июль 1977 года). Отметим довольно значительное количество осадков, выпадающих в сентябре (48 мм в среднем за период, в 1977 году – 121 мм), который, как правило, является переходным месяцем от теплого сезона к холодному. Такая ситуация в отдельные годы ведет к нарушению принципа наименьшей преемственности в циклах накопления и расходования влаги от одного гидрологического года к другому. В конце сентября формируются переходящие запасы влаги, что приводит к недооценке величины приходной части в следующем гидрологическом году, что сказывается на величине невязки водного баланса.

Таблица 3.10 – Водные балансы по водосбору руч. Контактного (A=21.2 км²) за годы с максимальными, минимальными суммами годовых осадков и средний за 1970 – 1985 годы

Водный баланс водосбора руч. Контактного (F=21,2 км ²) за 1975 – 1976 гидрологический год (наиболее засушливый)									
Элемент баланса	Холодный период X-IV	Месяцы					Теплый период V-IX	Год	% от P
		V	VI	VII	VIII	IX			
P	105	31	47	48	44	37	207	312	100
Поправки к P	22	7	11	7	18	10	53	75	24
E	11	21	31	30	24	11	117	128	41
R	5	14	77	22	16	8	137	142	45
ΔW_{sn}	99	-99	0	0	0	0	-99	0	
η , мм	-10	95	-61	-4	4	18	52	42	
η , %	-9	306	-149	-8	9	47	25	13	
Водный баланс водосбора руч. Контактного (F=21,2 км ²) за 1983 – 1984 гидрологический год (наиболее влажный)									
Элемент баланса	Холодный период X-IV	Месяцы					Теплый период V-IX	Год	% от P
		V	VI	VII	VIII	IX			
P	104	22	82	136	98	53	391	495	100
Поправки к P	20	4	13	17	13	8	55	75	15
E	17	33	37	40	30	21	161	178	36
R	6	55	60	109	97	32	353	359	72
ΔW_{sn}	113	-113	0	0	0	0	-113	0	
η , мм	-32	47	-15	-13	-29	0	-10	-42	
η , %	-31	214	-18	-10	-30	0	-3	-8	
Водный баланс водосбора руч. Контактного (F=21,2 км ²), средний за 1970 – 1985 год									
Элемент баланса	Холодный период X-IV	Месяцы					Теплый период V-IX	Год	% от P
		V	VI	VII	VIII	IX			
P	111	30	57	85	74	48	294	405	100
Поправки к P	24	5	8	11	10	7	42	66	16
E	9	17	34	36	27	14	128	137	34
R	4	37	96	72	59	28	292	296	73
ΔW_{sn}	125	-125	0	0	0	0	-125	0	
η , мм	-27	101	-73	-23	-12	7	-1	-28	
η , %	-24	337	-128	-27	-16	14	0	-7	

Таблица 3.11 – Водные балансы по водосбору руч. Южного ($A=0,27 \text{ км}^2$) за годы с максимальными, минимальными суммами годовых осадков и средний за 1970 – 1985 годы

Водный баланс водосбора руч. Южного ($F=0,27 \text{ км}^2$) за 1975-1976 гидрологический год (наиболее засушливый)									
Элемент баланса	Холодный период X-IV	Месяцы					Теплый период V-IX	Год	% от P
		V	VI	VII	VIII	IX			
P	111	22	57	33	104	36	252	363	100
Поправки к P	23	4	8	6	6	5	29	52	14
E	9	21	35	39	31	17	143	152	42
R	0	47	46	16	73	35	218	217	60
ΔW_{sn}	120	-120	0	0	0	0	-120	0	
η , мм	-18	74	-24	-22	0	-16	12	-6	
η , %	-16	336	-42	-67	0	-44	5	-2	
Водный баланс водосбора руч. Южного ($F=0,27 \text{ км}^2$) за 1983-1984 гидрологический год (наиболее влажный)									
Элемент баланса	Холодный период X-IV	Месяцы					Теплый период V-IX	Год	% от P
		V	VI	VII	VIII	IX			
P	96	19	54	124	79	41	317	413	100
Поправки к P	18	4	11	16	11	7	49	67	16
E	17	36	36	47	32	21	172	189	46
R	1	23	23	86	70	15	217	218	53
ΔW_{sn}	113	-113	0	0	0	0	-113	0	
η , мм	-35	73	-5	-9	-23	5	41	6	
η , %	-36	384	-9	-7	-29	12	13	1	
Водный баланс водосбора руч. Южного ($F=0,27 \text{ км}^2$), средний за 1970-1985 год									
Элемент баланса	Холодный период X-IV	Месяцы					Теплый период V-IX	Год	% от P
		V	VI	VII	VIII	IX			
P	106	21	46	74	62	37	240	346	100
Поправки к P	25	4	8	11	10	7	40	65	19
E	9	19	37	39	29	14	138	147	42
R	1	29	52	48	45	15	189	190	55
ΔW_{sn}	118	-118	0	0	0	0	-118	0	
η , мм	-22	91	-43	-13	-12	8	31	9	
η , %	-21	-433	-93	-18	-19	22	13	3	

Таблица 3.12 – Водные балансы по водосбору руч. Северного (А=0.38 км²) за годы с максимальными, минимальными суммами годовых осадков и средний за 1970 – 1985 годы

Водный баланс водосбора руч. Северного (F=0,38 км ²) за 1975 – 1976 гидрологический год (наиболее засушливый)									
Элемент баланса	Холодный период X-IV	Месяцы					Теплый период V-IX	Год	% от P
		V	VI	VII	VIII	IX			
P	109	26	46	52	37	40	201	310	100
Поправки к P	24	4	9	8	6	6	33	57	18
E	11	21	31	30	29	11	122	133	43
R	3	27	32	19	20	9	107	110	35
ΔW_{sn}	99	-99	0	0	0	0	-99	0	
η , мм	-4	77	-17	3	-12	20	71	67	
η , %	-4	296	-37	6	-32	50	35	22	
Водный баланс водосбора руч. Северного (F=0,38 км ²) за 1983 – 1984 гидрологический год (наиболее влажный)									
Элемент баланса	Холодный период X-IV	Месяцы					Теплый период V-IX	Год	% от P
		V	VI	VII	VIII	IX			
P	113	22	78	139	87	63	389	502	100
Поправки к P	20	4	13	17	12	8	54	74	15
E	17	33	30	41	29	21	154	171	34
R	1	50	22	100	71	24	267	268	53
ΔW_{sn}	138	-138	0	0	0	0	-138	0	
η , мм	-44	77	26	-2	-13	18	106	63	
η , %	-39	350	33	-1	-15	29	27	13	
Водный баланс водосбора руч. Северного (F=0,38 км ²), средний за 1970 – 1985 год									
Элемент баланса	Холодный период X-IV	Месяцы					Теплый период V-IX	Год	% от P
		V	VI	VII	VIII	IX			
P	117	30	56	80	69	47	282	399	100
Поправки к P	26	5	9	12	10	8	44	70	18
E	9	18	33	37	28	14	130	139	35
R	1	42	55	51	45	23	216	217	54
ΔW_{sn}	118	-118	0	0	0	0	-118	0	
η , мм	-11	88	-32	-8	-4	10	54	43	
η , %	-9	293	-57	-10	-6	21	19	11	

Необходимо отметить пространственную неравномерность выпадения осадков на водосборе руч. Контактного. Так, на водосборе руч. Южный (средняя высота 980 м), характеризующего относительно невысокие склоны теневой экспозиции, выпадало в среднем за год на 57 мм осадков меньше, чем на руч. Контактный – Нижний (средняя высота 1070 м), тогда как на водосборе руч. Северный (средняя высота 1030 м), типичного для склонов световой экспозиции, выпадало всего на 6 мм осадков меньше.

Запасы воды в снеге на КВБС начинают формироваться в середины – третьей декады сентября. Чаще всего основная часть снеготаяния формируется в период до января. Максимальные запасы воды в снеге наблюдаются в конце апреля – начале мая. Их величина на водосборе руч. Контактный в 1970 – 1985 колебалась в широких пределах – от 79 мм в 1980 году до 213 мм в 1985 году, при средней величине в 125 мм. В годовых осадках доля запасов воды в снеге составляет в среднем около 30%, в малоснежные годы эта доля снижается до 20%, в многоснежные – возрастает до 50%.

Сток воды на водосборах КВБС наблюдается в период с мая по октябрь (в отдельные годы захватывает начало ноября). Питание водотоков смешанное снего-дождевое, с преобладанием дождевого. Сток воды на водосборах КВБС начинает формироваться в процессе снеготаяния, как правило, во второй половине мая. Ввиду сложного рельефа и больших перепадов высот снеготаяние в различных частях бассейна руч. Контактного происходит неравномерно, в результате чего продолжительность весеннего половодья на руч. Контактном достигает 1 – 1.5 месяца и более. В отдельные годы (1974, 1979, 1980 годы) окончание весеннего половодья происходит в начале июля и даже в конце этого месяца (1978 год). Определение даты конца весеннего половодья в условиях Верхней Колымы весьма условно. Ввиду повторного замерзания талой воды в поверхностном почвенно-растительном слое и, особенно, на каменистых осыпях, прежде всего на так называемых «сушенцах» (участки сухой мерзлоты на осыпях), талые воды участвуют в формировании стока воды в течение всего теплого периода, что подтверждают водные балансы (см. ниже). Осадки, выпадающие в теплый период преимущественно в виде ливневых осадков, формируют значительные дождевые паводки с максимальными расходами, превосходящими максимальные расходы весеннего половодья.

Максимальный месячный сток воды на руч. Контактный 236 мм за рассматриваемый период наблюдался в июне 1980 года (на ручьях Северный и Южный 167 мм и 131 мм соответственно), что довольно типично для малых водотоков Верхней Колымы при условии сочетания больших максимальных запасов воды в снеге и значительных месячных осадков в мае-июне. В годы с небольшими максимальными запасами воды в снеге, но значительными осадками в июле-августе

максимальный месячный сток наблюдается именно в эти месяцы, хотя он только незначительно превышает 100 мм. В сентябре происходит резкое уменьшение стока воды, а в октябре – его полное прекращение. Величины стока в октябре в замыкающем створе колеблются в диапазоне 2 – 10 мм. Фактически этот сток не формируется октябрьскими осадками, но является результатом «выдавливания» влаги из почво-грунтов при движении фронтов промерзания сверху и снизу.

Испарение за гидрологический год в условиях КВБС складывается из испарения со снега в холодный период и в начале теплого периода, испарения со снега и почвы в период пестрого ландшафта и испарения с поверхности почво-грунтов и транспирации растительного покрова в теплый период. В среднем за год по данным наблюдений на испарительных площадках с водосбора руч. Контактного испарилось 137 мм, максимальное испарение (178 мм) наблюдалось в 1983 – 1984 гидрологическом году, минимальное (119 мм) отмечалось в 1976 – 1977 гидрологическом году. За холодный период испарилось в среднем 9 мм (от 2 мм в 1978 – 1979 и 1979 – 1980 гидрологических годах до 17 мм в 1982 – 1983 и 1983 – 1984 гидрологических годах), причем практически все испарение в холодный период происходит в апреле. Распределение испарения в теплый период года соответствует распределению прихода солнечной радиации конкретного года. Максимальные значения испарения наблюдаются в июне-июле (до 54 мм в июле 1971 года).

Следует отметить невысокую изменчивость годовых величин испарения ($C_v \approx 0.08 \div 0.1$).

Анализ изменения структуры водного баланса на водосборах Колымской ВБС. В структуре расходных компонентов баланса водосборов КВБС преобладающим является сток воды, который для водосбора руч. Контактного в среднем составляет 73% средней годовой суммы осадков; испарение составляет 34% годовой суммы осадков (средняя невязка баланса – -7%). Для водосборов ручьев Южного и Северного эти соотношения в среднем составили, соответственно, 42% и 55% и 35% и 54%, а средние невязки баланса – 3% и 11% годовой суммы осадков.

На *рисунке 3.7* показаны комплексные графики хода интегральных сумм приходных и расходных составляющих баланса для водосборов ручьев Южный и Северный, характеризующих типичные поверхности склонов теневой и световой экспозиции. Для водосбора руч. Южного, где выпадает наименьшее количество осадков и наблюдается пониженный сток воды и повышенное испарение, накопление влаги на водосборе наблюдается вплоть до июля-августа, когда поступление и расход влаги в целом уравниваются. И только в последний месяц гидрологического года наблюдаемый расход влаги с водосбора превышает ее приход (*рисунок 3.7a*). На водосборе руч. Северного поступление влаги превышает ее расход в течение всего года, причиной чего может быть занижение величины реального испарения (*рисунок 3.7b*).

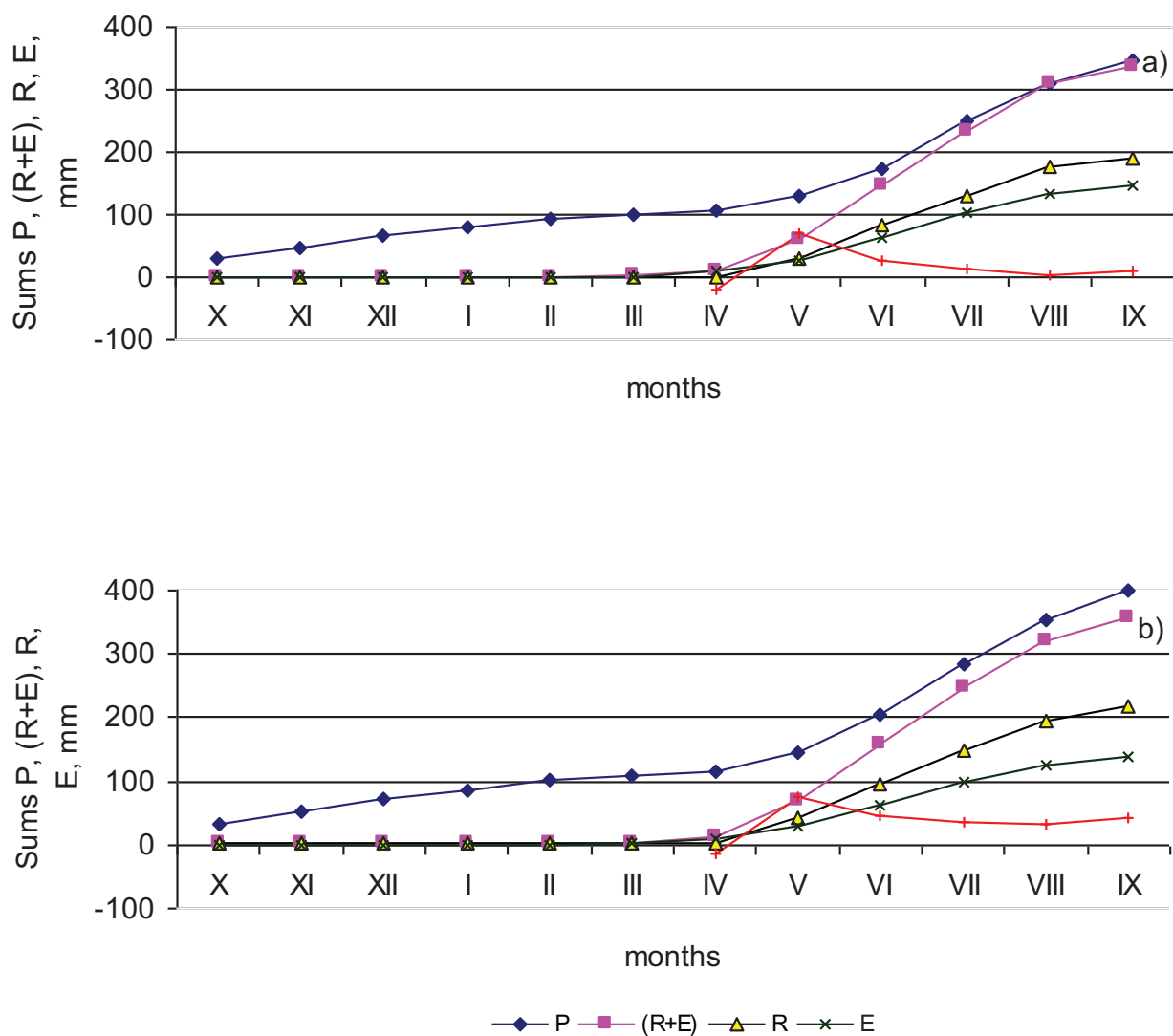


Рисунок 3.7. Распределение интегральных сумм компонентов водного баланса внутри осредненного за весь период гидрологического года для водосборов руч.Южный (а) и руч.Северный (б) (красным цветом показан ход интегральных сумм невязок баланса)

Отметим, что для холодного периода средняя величина невязки балансов для водосбора руч. Южного составила -22 мм, руч. Северного – -11 мм, соответственно 19% и 9% от суммы осадков холодного периода. Максимальные значения невязки достигали 62% и 52% (1976 – 1977 гидрологический год). При этом для обоих водосборов в 13-и случаях из 15-и рассмотренных измеренные запасы воды в снеге превышали разность осадков и испарения, и только в двух случаях наблюдалось превышение разности $\Sigma(E-P)$ над измеренными запасами воды в снеге. Предварительные оценки показали, что в большинстве случаев разница между балансовым соотношением $\Sigma(E-P)$ и измеренными запасами воды в снеге

обусловлена переходящими сентябрьскими запасами воды в снеге, которые в отдельные годы могут достигать 40 – 50 мм и, как правило, компенсируют различия в $\Sigma(E-P)$ и максимальных измеренных запасов воды в снеге. С учетом переходящих запасов воды в снеге невязка, включающая погрешности измерений всех компонентов, находится в пределах 5 – 10%.

В теплый период года (май-сентябрь), когда процессы тепло-влажнооборота на водосборах активизируются, сток воды в июне – июле во все годы превосходит осадки и невязки баланса имеют положительный знак. Это свидетельствует о том, что участие снеговых вод в формировании стока продолжается значительно дольше периода собственно снеготаяния.

На *рисунке 3.8* показано изменение годовых величин осадков, стока воды, испарения и невязок водных балансов за рассматриваемый период. Для водосбора руч. Контактного, где существенную роль играет дополнительное питание от таяния гольцовых и других льдов в толще делювия, в большинстве лет наблюдаются отрицательные величины невязок (то есть расходная часть баланса превосходит ее приходную часть) (*рисунк 3.8a*). Для водосборов ручьев Южный и Северный характерно преобладание положительных величин невязок, поскольку для них более существенным является заниженная величина испарения, отчасти компенсируемая переходящими запасами воды в снеге.

Расчет водных балансов считается удовлетворительным при невязке менее 5% суммы годовых осадков [Бабкин и Вуглинский, 1982]. В среднем годовые водные балансы для водосборов ручьев Контактного и Северного рассчитываются с несколько пониженной точностью, а для руч. Южного – удовлетворительно. При расчетах водных балансов за отдельные гидрологические годы могут иметь место более значительные невязки (от 23% до -34%), обусловленные перечисленными причинами.

Таким образом, в структуре расходной части водного баланса водосборов малых водотоков Колымской воднобалансовой станции преобладает сток воды, в среднем в два раза превышающий испарение. Расходные компоненты водного баланса – испарение и сток – в среднем составляют для водосбора руч. Контактного 34% и 73%, для водосборов ручьев Южный и Северный, соответственно, 42% и 55% и 35% и 54%. Неучтенные компоненты баланса и невязка баланса составляют в среднем для водосбора руч. Контактного – 7%, для водосборов ручьев Южный и Северный 3% и 9%.

При анализе гидрометеорологической ситуации установлено, что при составлении водных балансов имеют место переходящие запасы воды в снеге, что сказывается на недоучете приходной части баланса. По-видимому, для условий КВБС целесообразно гидрологический год начинать с 15 или 20 сентября, что усложнит расчеты, но повысит их точность. Неучтенными переходящими запасами являются также гольцовые и другие льды. Оценка их вклада в водный баланс водосбора руч. Контактного требует специальных исследований.

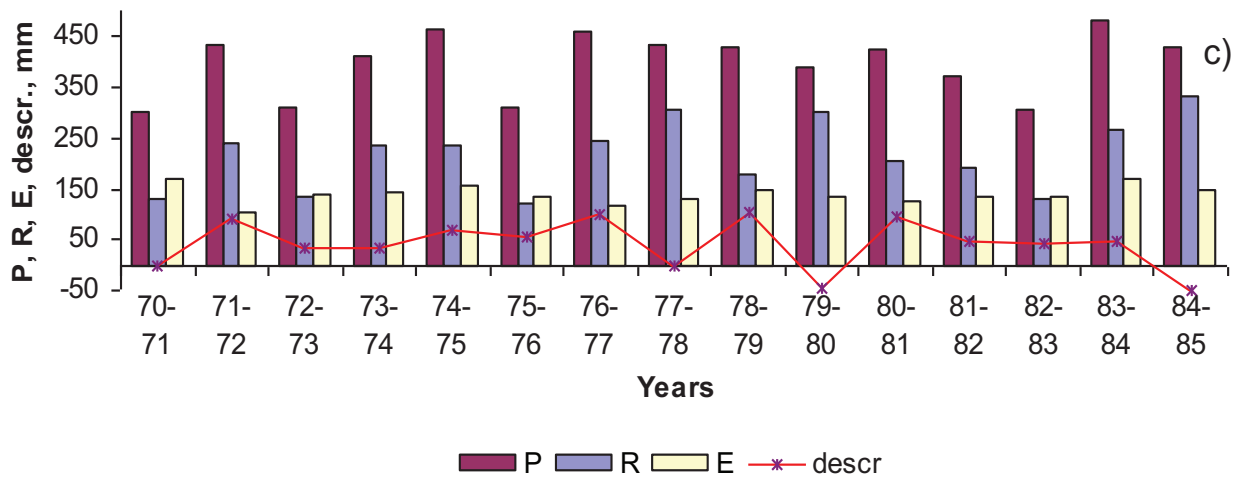
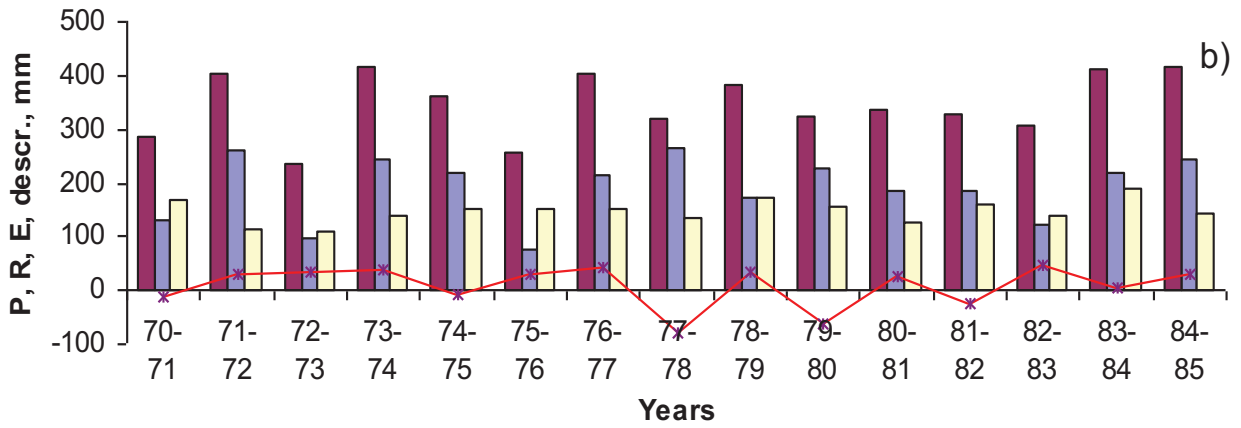
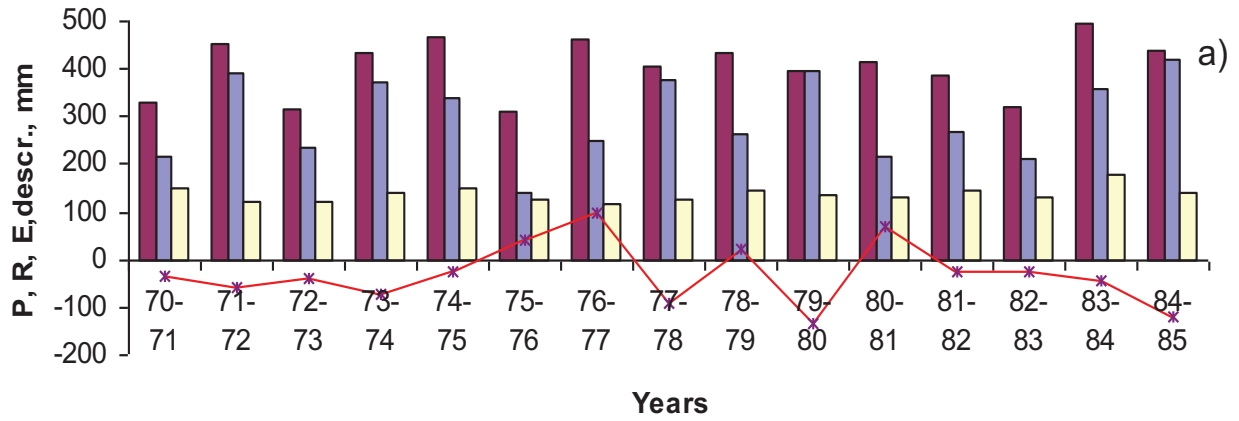


Рисунок 3.8. Изменение компонентов и невязок годовых водных балансов водосборов руч. Контактный – Нижний (а), руч. Южный (б) и руч. Северный (с) за 1970 – 1985 гидрологические годы

Измерения стока воды и осадков проводятся с погрешностями, составляющими 6% и около 10% их величины, запасов воды в снеге – 15 – 20%. При этом происходит взаимная компенсация ошибок измерений. Следует признать, что измеренные по испарителям величины испарения, особенно в теплый период года, занижены по сравнению с реальным испарением. Для разных видов поверхностей это занижение различно. В среднем за год для водосбора руч. Контактного для поверхностей, покрытых почвой, оно достигает величины около 20%. Такое занижение в некоторой степени компенсируется существенно меньшим (на 60-70%) испарением с поверхностей, покрытых осыпями.

Различный вклад неучтенных переходящих запасов воды в снеге и гольцовом льде и в разной мере заниженного по величине для засушливых и влажных лет испарения для малых водосборов, отражающих условия формирования тепло- и влагооборота различных типов ландшафтов, и водосбора руч. Контактного в целом, отражается на величине и знаке невязки водного баланса.

Общие выводы

Водные балансы малых исследовательских водосборов за гидрологический год, отдельные сезоны и генетические периоды могут быть рассчитаны с достаточно хорошей достоверностью только при наличии необходимой и определенной требованиями «Руководства воднобалансовым станциям» сети пунктов наблюдений на них.

Осредненные за 15 и более лет водные балансы, основанные на данных прямых измерений их составляющих, в большинстве случаев определяются с удовлетворительными невязками для полуаридной зоны ЕТР. Для условий многолетней мерзлоты необходимо отметить несколько пониженную точность расчета.

Водные балансы вполне адекватно отражают зональный влагооборот территорий, на которых расположены воднобалансовые станции, как в течение гидрологического года, так и на сезонном уровне внутри него для различных условий увлажнения и с учетом определяющих гидрологический режим факторов, в частности, промерзания почвы или его отсутствия на водосборах лесостепной зоны, и позволяют оценить доминирующие процессы

формирования стока и других составляющих водного баланса для различных условий.

Одновременно они позволяют выявлять составляющие водного баланса, методы наблюдений за которыми требуют совершенствования с учетом особенностей природных условий. В качестве примера могут служить наблюдения за испарением с поверхности почвы в условиях многолетней мерзлоты.

Другим важным аспектом воднобалансовых наблюдений и расчетов является выявление неучтенных в балансе факторов, таких как инфильтрация, питание водотоков водами при таянии гольцовых льдов и др., и оценка величины этих компонентов для различных условий.

Необходимо отметить, что границы гидрологического года в условиях изменений климата не являются строго установленными и могут смещаться в зависимости от изменений условий накопления и сработки запасов влаги в бассейнах различных природных зон. Границы гидрологического года для водосборов с преобладанием отдельных специфических типов ландшафта, таких как осыпи в горных районах распространения многолетней мерзлоты, могут отличаться от границ гидрологического года, принятых для остальных водосборов в том же регионе.

С большим сожалением приходится констатировать, что наблюдения за элементами водного баланса в последние десятилетия сильно сократились, и анализ таких изменений основывается на недостаточно полной информации, что заметно по предыдущему разделу.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАЗВИТИЯ И ПРИОРИТЕТНЫЕ
НАПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ НА РЕПРЕЗЕНТАТИВНЫХ ВОДОСБОРАХ
ВОДНОБАЛАНСОВЫХ СТАНЦИЙ**

В естествознании под термином «эксперимент» понимается метод познания, с помощью которого изучаются явления природы в управляемых и контролируемых условиях. В гидрологии, как в прикладной науке, связанной с природными объектами, это понятие применяется в более широком толковании и под экспериментом понимается «детальное изучение физических закономерностей гидрологических процессов в заданных, искусственно созданных, или подобранных в природе условиях» [Чеботарев, 1978].

Перспективные направления гидрологических исследований на воднобалансовых станциях, как и вообще на малых исследовательских водо-сборах, должны соответствовать целям и задачам, перечисленным в Главе I, среди которых мониторинг, достаточно подробно рассмотренный в Главе II, а также направления, связанные с сопредельными науками о земле и инженерными вопросами. В контексте данной работы остановимся на двух взаимосвязанных направлениях, которые представляются наиболее актуальными с точки зрения дальнейшего развития гидрологии в ее экспериментальной части – исследовании слабо изученных или, точнее, наиболее проблемных с точки зрения их изученности и понимания процессов формирования стока и их взаимосвязью с математическим моделированием и другими аспектами гидрологии.

Справедливости ради в подзаголовок этого раздела следовало бы поместить название упомянутой выше лекции Р. К. Линслея «Репрезентативные и экспериментальные водосборы – куда дальше?». Разумеется, такие «глобальные» вопросы должно обсуждать и решать широкое сообщество специалистов-гидрологов. Автор в данном случае высказывает свою точку зрения исключительно в дискуссионном плане.

4.1 Математическое моделирование, экспериментальная гидрология и недостаточно изученные процессы формирования стока

Как отмечал Р. А. Нежиховский, в гидрологии существует немало обстоятельств приводящих к неоднозначности решений при выполнении различных задач, которые он разделил на шесть групп [Нежиховский, 1978]. Среди этих обстоятельств неточность и ошибочность исходных данных, их неполнота (проявляющаяся, в частности, в проблеме «точка – пространство»), неполнота и несовершенство научных знаний о процессах, изучение которых затруднено или даже невозможно, неполный учет всех действующих факторов, воздействие случайных факторов и, наконец, «неоднозначность решения как отражение свойства явления». Все эти обстоятельства присутствуют в процессе изучения формирования стока воды и водного баланса и должны по возможности учитываться при анализе и формализации результатов.

В части неполноты и несовершенства научных знаний в области исследований формирования стока, наиболее проблемными, как представляется, по-прежнему являются процессы взаимодействия поверхностных и подземных вод. Они включают в себя большой комплекс процессов, среди которых разделение поступающей на поверхность водосбора влаги на поверхностный и внутрипочвенный (склоновый) сток воды в результате инфильтрации влаги в почву, процессы испарения с поверхности почвы и транспирации, регулирующие влагооборот в верхней активной зоне почво-грунтов, фильтрации в зоне аэрации, динамику влаги в верхнем водоносном горизонте, нередко не имеющем сплошного распространения, ее миграцию в нижележащие постоянные водоносные горизонты и разгрузку подземных вод в русловую сеть. Часть этих процессов, протекающих на поверхности и в верхних слоях почво-грунтов исследована и описана лучше, другие процессы являются «скрытыми» и изучены значительно хуже или практически не исследованы, хотя усилия для их изучения и описания предпринимаются на протяжении многих десятилетий.

В статье Г. Блёшля и М. Сивапалана [Sivapalan, Blöschl, 2017] приведены шесть 20-летних этапов становления и развития научной гидрологии: 1910 – 1920-е годы – «эмпирическая эра», начало активного накопления эмпирических данных, создание первых моделей гидрологических процессов; 1930 – 1940-е годы – «эра рационализации», начало построения гидрологической теории; 1950 – 1960-е годы – «эра систем», внедрение в гидрологию теории динамических систем, начало разработки концептуальных гидрологических моделей; 1970 – 1980-е годы – «эра процессов», совершенствование физико-математического моделирования процессов формирования стока; 1990 – 2000-е – «эра наук о земле», моделирование пространственной неоднородности, внедрение информационных технологий и др.; после 2010 года – «ко-эволюционная эра».

Каждая «эра» характеризуется своими достижениями и, разумеется, не отвергает, но «захватывает», развивает и продолжает предыдущие виды деятельности, в том числе эмпирические наблюдения и эксперименты. То есть результаты полевых и лабораторных исследований являются неотъемлемой и важной частью знаний о гидрологических процессах, положенных в основу математических концептуальных детерминированных моделей. Не случайно Р. К. Линслей, один из пионеров этого направления в гидрологии и авторов Стэнфордской модели водосбора (SWM), писал в упомянутой работе, что «все текущие модели представляют ансамбль эмпирических функций, связанных воедино в систему».

В монографии Ю. Г. Мотовилова и А. Н. Гельфана [Мотовилов, Гельфан, 2018], соответственно с тематикой работы, эволюция, описанная Г. Блэшлем и М. Сивапаланом, связана в первую очередь с развитием и совершенствованием физико-математического моделирования процессов формирования стока воды и других составляющих водного баланса, в том числе и тех процессов, которые выше названы слабо изученными.

Поэтому наиболее актуальные задачи экспериментальных гидрологических исследований, как представлялось на первый взгляд, целесообразно было бы рассматривать через призму математического моделирования стока воды. На протяжении всей истории развития гидрологической науки эти направления были и остаются связанными между собой самым тесным образом, в ее иерархическом строении нижние этажи образуют эмпирический базис, а верхние – теоретическую надстройку, обобщенную в виде математических моделей формирования стока воды или гидрофизических моделей отдельных процессов в системе влагооборота. При этом базис и надстройка имеют свои специфические методы обобщений и исследований [Нежиховский, 1978].

Однако все обстоит не так просто и система взаимодействия между эмпирическим базисом и теоретической надстройкой зачастую недостаточно тесная, а по ряду аспектов и вовсе отсутствует или намеренно нарушается по разным, нередко обоснованным, причинам.

Гидрологические детерминированные физико-математические модели являются сложными системами, поэтому их излишняя детализация приводит к повышению неустойчивости этих систем. В результате авторы моделей вынуждены искать компромисс между их адекватностью природным процессам и максимально возможным упрощением, то есть необходимостью учитывать наиболее существенное, пренебрегая менее важным, с точки зрения решаемой задачи и позиции авторов модели. Современное физико-математическое описание некоторых сложных процессов, например поверхностного склонового стока и подземного питания рек, зачастую существенно отличается от реальных природных процессов. Кроме того, модели, как и всякий инструмент, должны решать определенные задачи прогностического или расчетного характера для конкретных водосборов разного масштаба.

Особенностью современных детерминированных моделей стока воды является то, что они изначально были ориентированы на расчет гидрографов весеннего половодья и дождевых паводков, то есть максимального стока. Меженный или базисный сток, формируемый преимущественно или исключительно грунтовыми и подземными водами, вообще рассматривался как второстепенное явление, которому уделялось значительно меньше внимания. Не случайно в качестве основных показателей способности модели адекватно рассчитывать гидрограф стока считаются максимальные расходы. В частности, фактически таков распространенный критерий качества модельных расчетов Дж. Нэша и Дж. Сатклиффа.

Гидрологические прогнозы, по вполне понятным причинам, также ориентированы в первую очередь на оценку поступления потенциальных ресурсов весеннего стока в водохранилища и предупреждение рисков наводнений. Весьма примечательно, что в этом направлении предпринимались усилия на основе широкой международной кооперации [Романов, 2019].

В отношении меженного стока в работе [Lanen и др., 1997] показано, что надежность использования ряда моделей для получения характеристик минимального стока заметно снижается, особенно для его наиболее важных показателей Q_{90} , то есть чем больше возрастает подземная составляющая питания стока, тем ниже точность модельного расчета. Отмечено также, что нередко, даже если результат хорошо подходит, это не означает, что модель автоматически столь же хорошо может прогнозировать изменения низкого стока в системе, поскольку это требует обоснования (валидации) изменений, которые часто невозможны [Hydrological Draught ..., 2004].

По поводу необходимости «специализации» моделей в отечественной практике была даже дискуссия, о которой упоминает в своей монографии Ю. Б. Виноградов [Виноградов, 1988]. Однако в большинстве случаев авторы моделей предпочитают вести расчет в течение полного годового цикла, что позволяет им получать необходимую модельную информацию о состоянии увлажнения поверхностного слоя подстилающей поверхности к началу весеннего половодья или дождевого паводка расчетным путем со степенью достоверности, зависящей от адекватности модели природным процессам и наличия исходной информации.

Поэтому попытаемся разобраться как в современных детерминированных концептуальных моделях решаются вопросы взаимодействия поверхностных и подземных вод. При этом, как представляется, нет необходимости рассматривать большое количество моделей, поскольку они, несмотря на различия и нюансы в подходах к решению различных составляющих процессов гидрологического цикла, по большей части близки по своей структуре, основой которой является водный баланс, и ограничиться общими моментами.

Наиболее подробно вопрос взаимодействия поверхностных и подземных вод, по-видимому, сформулирован в модели «Гидрограф» (по крайней мере среди отечественных моделей), разработанной в ГГИ под руководством Ю. Б. Виноградова [Виноградов, 1988]. В этой модели комплекс процессов от поверхностного стока до питания водотоков подземными водами объединен в серию вертикально структурированных блоков, обобщенно названных автором «дорусловой трансформацией стока». Последовательность состоит из 9-и блоков или емкостей, которые сгруппированы в три секции.

Первые три блока включают в себя быстрый поверхностный и приповерхностный склоновый сток (классический Хортоновский поверхностный сток, почвенный и болотный, «подпертый» сток при выходе грунтовых вод на поверхность). Ниже следуют различные виды подземного стока, начиная с нижнего почвенного стока и собственно сток различных ярусов подземных вод. Система дорусловой трансформации стока сведена в таблицу, в которой приведены тип стекания и его характерное время. Впоследствии автор увеличил количество подземных емкостей.

В модели ЕСОМАГ, как и в большинстве аналогичных моделей, ее вертикальная структура, показанная на схеме речного бассейна, включает в себя 4 емкости: поверхностный сток, подповерхностный сток горизонта А, подповерхностный сток горизонта В и грунтовый сток [Мотовилов, Гельфан, 2018]. При этом решения подземного стока приняты аналогично стоку подповерхностного стока (внутрипочвенной верховодки) с помощью «горизонтального» коэффициента фильтрации. Количество подземных емкостей в модели, по-видимому, может при необходимости быть увеличено.

Численные решения подземного питания рек в моделях зависят от расчетного количества просочившейся в насыщенную зону верхнего водоносного горизонта влаги и ее дальнейшей разгрузки в дренажную сеть, а также от величины питания и разгрузки залегающих ниже водоносных горизонтов. Определяющие эти процессы коэффициенты вертикальной и горизонтальной фильтрации чаще всего определяются с помощью процедур калибровки моделей с учетом водно-физических характеристик преобладающих типов почво-грунтов. Как отмечают Ю. Г. Мотовилов и А. Н. Гельфан в упомянутой монографии расчеты для модели ЕСОМАГ наиболее чувствительны именно к этим двум параметрам. Коэффициенты вертикальной и горизонтальной фильтрации имеют несомненный физический смысл, однако в моделях они являются обобщенными средневзвешенными величинами для стокоформирующих комплексов, пространственно-однородных областей или элементарных водосборов, что необходимо для реализации модельной симуляции (по выражению Р. К. Линслея) реакции водосбора на внешние воздействия, позволяющей получать гидрографы стока воды в периоды прохождения весеннего половодья и дождевых паводков с приемлемой степенью достоверности. При этом сохраняется проблема

эквивалентности, когда различные сочетания принятых параметров моделей позволяют на выходе получать сходные и близкие к наблюдаемым формы гидрографов максимального стока.

Собственно, численные решения стока грунтовых вод в русловую сеть в моделях обычно основываются на использовании резервуарной модели (в виде одного или нескольких резервуаров), базирующейся на уравнении, полученном на основе формулы Дарси, или формулы Буссинеска. При этом информация для проверки полученных результатов либо очень ограничена, или отсутствует совсем.

Попытки оценить вклад различных генетических составляющих речного стока с помощью моделей и сопутствующих измерений гидрохимического состава воды, ее электропроводности или изотопного состава, разумеется, предпринимались и будут предприниматься (например, в работе [Motovilov, Suchkova, 2018]). Однако полученные результаты пока сложно назвать внушающими полное доверие.

Таким образом рассмотрение проблемы взаимодействия поверхностных и подземных вод ограничивать рамками решений, принятых в существующих моделях, нецелесообразно, поскольку, как было упомянуто выше, интересы авторов современных моделей формирования стока воды сконцентрированы на фазах высокой водности, а сами процессы, несмотря на многолетнюю историю их исследований, до сих пор оставляют большое поле неопределенностей. Формализация процессов движения влаги в толще почво-грунтов решена для разных ее частей с большими различиями в степени достоверности и соответствия реальным процессам.

Наиболее хорошо изучена верхняя часть почво-грунтов, для которой в 1970-е – 1980-е годы исследованы возможности вертикального влагопереноса в ненасыщенной зоне почвы с использованием уравнения Ричардса, в том числе и по крупным порам, выполнены оценки гидрофизических характеристик различных типов почв, предложены различные подходы к учету испарения и транспирации. Подземная составляющая формирования речного стока во многих современных моделях решена весьма схематично и максимально упрощенно.

Следует отметить, что в условиях перестройки питания рек на преобладание подземной составляющей стока задача получения адекватных результатов на основе моделирования может серьезно усложниться. Особенно существенно эта проблема может отразиться на прогнозах объемов стока половодья, которые для России являются не менее важными, чем максимальные расходы, поскольку они определяют наполнение водохранилищ и дальнейшее управление водными ресурсами в интересах различных отраслей экономики – энергетики, водного транспорта, сельского хозяйства и др.

Здесь, кроме того, возникает внутреннее противоречие моделирования стока как теоретического базиса гидрологической науки и конкретными моделями в качестве инструментов для получения определенного результата. На современном этапе

авторы моделей вынуждены делать допущения, которые нередко явно противоречат теории формирования стока. Например, в модели ЕСОМАГ принято, что инфильтрацией для микромасштаба (точечный масштаб) можно пренебречь, поскольку суточный временной шаг модели превышает время протекания этого процесса, так же, как и влиянием на этот процесс величины начального увлажнения [Мотовилов, Гельфан, 2018, с. 49]. Таких вынужденных допущений в моделях немало.

Наряду с детерминированными физико-математическими моделями стока воды широко распространены гидрофизические модели, отражающие частные процессы тепло- и влагопереноса в различных средах и на их границах – испарение, снеготаяние, движение влаги в зоне аэрации. Они обычно являются составными частями моделей стока, но нередко используются и как самостоятельные модели для решения частных задач оценки испарения, динамики увлажнения верхнего слоя почво-грунтов, питания грунтовых вод и др. При этом, для решения задач, связанных с движением влаги по профилю в ненасыщенной зоне, такие модели не нуждаются в калибровке, если большинство необходимых для их реализации параметров могут быть определены по месту расположения расчетного профиля на основании полевых наблюдений и лабораторного анализа образцов почво-грунтов, хотя и в таких моделях обойтись без необходимых упрощений невозможно. Однако гидрофизические модели чаще всего «обрываются» на границе зоны аэрации и верхней насыщенной зоны (верхнего водоносного горизонта), поскольку дальнейшее горизонтальное и вертикальное движение влаги выходит за рамки решаемых ими задач.

Движение влаги собственно в водоносных горизонтах описывают гидрогеологические модели, в основу которых чаще всего положен закон Дарси, согласно которому «скорость потока через пористую среду пропорциональна снижению напора и обратно пропорциональна длине пути потока». Основными гидравлическими характеристиками являются пористость среды, ее гидравлическая проводимость и удельная водоотдача. При решении гидрогеологических задач обычно проводятся тщательные полевые работы по определению этих характеристик и оценке состояния и поведения подземных вод. Краткое описание гидрогеологических моделей и применяемого в них сложного математического аппарата приведена, в частности, в «Руководстве по гидрологической практике» ВМО в разделе 6.3.3 т.II. При этом гидрогеологические модели также включают в себя блок поступления влаги с поверхности.

В то же время анализ взаимодействия поверхностных и грунтовых вод показывает существенные различия между реальными процессами и их интерпретацией, принятой в моделировании, что подтверждают изотопные [Hertrmann, 1999; Завилейский, Марунич, Соколов, 2000] и воднобалансовые исследования. В частности, исследования с применением различных трассеров показали высокие коэффициенты

подземного питания рек, особенно в периоды прохождения первой волны половодья, составляющие до 0,5 объема ее стока и более. Коэффициенты подземного питания средних и больших рек лесной и лесостепной зон по данным воднобалансовых расчетов для районов, где работали воднобалансовые станции, составили в среднем 0,15-0,51 для весеннего половодья и 0,5-0,76 для года [Соколов, 1996].

Поэтому взаимодействие поверхностных и подземных вод по-прежнему остается одним из приоритетных направлений гидрологических исследований, стоящем в первом ряду проблем современной гидрологии, а полевые исследования процессов питания и особенно разгрузки подземных вод весьма актуальны для расширения знаний о роли подземных вод в формировании стока воды рек в различные фазы водности и совершенствования этих компонентов в моделях стока.

Помимо этого, требуется совершенствование системы мониторинга и оценки изменения доминирующих процессов формирования стока воды в условиях многолетних колебаний климата, когда роль подземной составляющей стока воды существенно возрастает и от ее корректного определения с использованием всех доступных методов зависят оценка водных ресурсов и планирование мер по адаптации водохозяйственного комплекса к современным условиям. Кроме того, важно более детально оценить формирование и распространение такого неблагоприятного явления как подтопление территорий подземными водами.

В заключение несколько замечаний о соотношении экспериментальной и теоретической (в виде детерминированных моделей стока) части гидрологической науки. По мнению Ю. Б. Виноградова экспериментальная гидрология в «широком» смысле включает в себя наблюдательную гидрологию (визуальные наблюдения, стандартные и специальные наблюдения на объектах) и экспериментальную гидрологию в «узком» смысле (лабораторные и полевые эксперименты), что не противоречит приведенному выше определению экспериментальной гидрологии. На основе обобщения полученной информации, в сочетании с лабораторными, полевыми и численными экспериментами развиваются как теоретическая, так и экспериментальная части гидрологической науки. Игнорирование любого из перечисленных компонентов ведет к застою и тупику [Виноградов, 1999].

Претензии к экспериментальной гидрологии на малых исследовательских водосборах, при всей очевидной их необходимости, заключаются в том, что публикации по результатам работ на них нередко не объясняют для чего эти исследования проводились [Дж. Родда, 1980]. В. Клемеш назвал репрезентативные бассейны своего рода «Троянским конем» гидрологии, по-видимому, из-за того, что по ходу анализа материалов наблюдений на них возникает больше вопросов, чем ответов. Одно из противоречий между экспериментаторами и модельерами, как представляется, заключается в том, экспериментаторы стремятся провести возможно более точные, детальные и объективные наблюдения того или иного

явления, процесса, или комплекса процессов. Однако они по разным причинам не всегда претворяют их в аналитический вид, а нередко не дают даже комплексного описания. Модельеры, в свою очередь, выбирают из этой «груды» информации то, что считают полезным для своей модели и что они могут преобразовать в параметры и алгоритмы, часто отдаляясь от реальной природы протекающих процессов.

Взаимоотношения экспериментальной и теоретической частей науки всегда были и, по-видимому, останутся противоречивыми и в будущем. Однако дисбаланс этих компонентов крайне негативно влияет на развитие науки в целом. Здесь уместно напомнить замечание П. Л. Капицы в его выступлении «Эффективность научной работы» 4 декабря 1964 года: «Разрыв между теорией и экспериментом, между теорией и жизнью, между теорией и практикой есть симптомы серьезных нарушений нормального развития науки. То, что у нас сейчас происходит отрыв теоретической науки от жизни, с одной стороны, и, с другой стороны, недостаточно высокое качество экспериментальных работ, – все это нарушает гармоническое развитие нашей науки и, мне кажется, происходит не только в физике, но и в ряде других областей естественных наук». Прошло много десятилетий, но эта точка зрения не только по-прежнему актуальна, острота проблемы многократно возросла, поскольку экспериментальная гидрология, к которой относятся и многолетние детальные наблюдения за элементами водного баланса и определяющими их факторами на репрезентативных водосборах воднобалансовых станций, является поставщиком необходимой информации, «хлеба» гидрологической науки и практики, но внимание к ней недопустимо ослабло.

Проблемой в использовании математических моделей формирования стока является также сложность их освоения. Многие модели являются чисто авторскими и недоступны для широкого использования. Однако и те модели, которые находятся в относительно свободном доступе требуют от пользователей высокого уровня подготовки в отношении назначения оптимальных параметров, процедур верификации, калибровки и многих других позиций, что сказывается на более широком их внедрении в практику гидрологических прогнозов на региональном уровне. В отечественной инженерной практике использование моделей также носит ограниченный характер и они, по крайней мере на современном этапе, вряд ли смогут вытеснить более простые и доступные широкому кругу проектировщиков традиционные методы гидрологических расчетов с применением статистических методов (невзирая на отсутствие стационарности), методов аналогии и региональных формул для расчета различных характеристик стока.

4.2 Взаимодействие поверхностных и подземных вод по экспериментальным данным

Закономерности взаимодействия поверхностных и подземных вод с точки зрения их взаимосвязи с речным стоком рассматривались в работах Б. И. Куделина [Куделин, 1960], О. В. Попова [Попов, 1968] и ряда других авторов. Позднее И. Б. Вольфцун сделал «первую попытку изложить в систематизированном виде методы решения отдельных гидрогеологических задач на основе широкого использования гидрометеорологической информации» [Вольфцун, 1972]. В своей монографии автор использовал обширный материал полевых наблюдений ВФ ГГИ, воднобалансовых станций и экспедиций ГГИ, в том числе для рассмотрения и анализа различных аспектов процессов взаимодействия поверхностных и подземных вод. Отдавая должное упомянутым и другим отечественным и зарубежным исследователям этой сложной проблемы, нельзя не признать, что в ней, как уже упоминалось, по-прежнему остаются многочисленные пробелы и неопределенности.

В контексте данной работы рассматривать подробно все аспекты взаимодействия поверхностных и подземных вод представляется нецелесообразным. Некоторые процессы, например, испарение с поверхности почвы и транспирация, впитывание влаги в почву и ее фильтрация, весьма подробно рассмотрены в многочисленных монографиях и статьях, физические закономерности обоснованы и подтверждены натурными полевыми и лабораторными исследованиями. К таким работам относится, в частности, монография И. Л. Калюжного и С. А. Лаврова [Калюжный, Лавров, 2012]. Поэтому ограничимся только теми аспектами, которые, по нашему мнению, в настоящее время являются наиболее спорными или проблемными. Аналогичный анализ, также в порядке обсуждения, в середине 1990-х годов был проведен Б. Л. Соколовым [Соколов, 1996]. Однако в его работе проблемные позиции «литогенной составляющей речного стока» рассматривались в общем. Наша задача заключается в обосновании приоритетных направлений исследований этих явлений на репрезентативных водосборах, в том числе воднобалансовых станций, и предложений по корректировке перспективной программы наблюдений на них.

4.2.1 Склоновый сток и «действующая» площадь водосбора

Концепции механизмов формирования поверхностного склонового стока можно ограничить подходами Р. Е. Хортон и Дж. Д. Хьюлетта. В первом случае предполагается, что поверхностный сток формируется на водосборе при интенсивности поступления влаги на его поверхность, превышающей интенсивность ее впитывания в почво-грунты, а плоскостное стекание воды определяется по кривым

добегания (изохронам) стока с использованием различных вариантов генетической формулы стока.

Во втором случае рассматривается концепция переменной области питания и поверхностный склоновый сток формируется преимущественно на прирусловых, наиболее пониженных и переувлажненных участках склонов, где уровни грунтовых вод залегают близко к поверхности. По мере дальнейшего поступления воды в ходе снеготаяния или выпадения дождя размеры этой зоны, названной зоной полного насыщения, возрастают, а со снижением интенсивности и слоя водоподачи – уменьшаются. При этом на остальной части водосбора формируется подповерхностный сток (зона питания подземных вод), причем изменение ее площади находится в противофазе с площадью зоны полного насыщения. Б. Л. Соколов отмечает, что аналогичные положения в отечественной практике были разработаны И. Б. Вольфцуном и Д. Д. Квасовым еще в середине 1950-х годов.

Теория изохрон Хортонa, разработанная им еще в начале 1930-х годов, принесла большую пользу для развития методов гидрологических расчетов и прогнозов и по-прежнему широко применяется для решения практических задач. Однако концепция Хьюлетта представляется более обоснованной с точки зрения реального процесса формирования стока, в том числе ее поверхностной составляющей.

В современной гидрологической практике детерминированного моделирования речной водосбор рассматривается как система, преобразующая потоки влаги и энергии в сток воды. Русловая (гидрографическая) сеть является подсистемой бассейна, которая преобразует поступление влаги в функцию стока воды в замыкающем створе.

Термин «гидрографическая сеть», по мнению Р. А. Нежиховского, можно толковать в широком и узком смысле [Нежиховский, 1971]. В широком смысле этот термин включает в себя всю совокупность постоянных и временных водотоков, а также водоемы с замедленным водообменом (включая болота). В узком смысле гидрографическая сеть представляет собой совокупность постоянных и наиболее значительных временных водотоков, формирующихся в логах, балках, оврагах и тому подобных продольных депрессиях поверхности земли. Большинство исследований, посвященных вопросам структуры гидрографической сети и протекающим в ней процессам, рассматривают русловую сеть именно в таком ключе.

Фактически можно подразделить сеть транспорта влаги (и наносов) на русловую и склоновую, хотя провести строгую границу между ними затруднительно. На практике истоком водотока считается место, с которого появляется его постоянное русло [Чеботарев, 1978], от которого считается русловая сеть «в узком смысле». Однако такой исток может смещаться в пространстве и времени в зависимости от водности данного года или последовательной серии лет, о чем было сказано в Главе II.

На малых водосборах воднобалансовых станций русловая сеть в «узком» понимании этого термина по Р. А. Нежиховскому развита относительно слабо и основная ее часть представлена склоновой сетью, которая формирует поверхностный и подповерхностный склоновый сток в периоды весеннего половодья и дождевых паводков, а также при продолжительных зимних оттепелях. Величина этого стока в значительной мере определяет соотношение между поступившей на поверхность влагой и той ее частью, которая расходуется на поверхностное смачивание и фильтруется в почву, то есть собственно формирование притока в постоянно действующую русловую сеть, которая в основном перераспределяет поверхностный и внутрипочвенный сток во времени. Таким образом склоновая русловая сеть одновременно является продуктом разницы между интенсивностью поступления влаги на поверхность склонов и интенсивностью ее впитывания в почву, и индикатором характера этих процессов в данных ландшафтных и климатических условиях.

Справедливости ради надо отметить, что основная гидрографическая сеть, как отмечал Р. А. Нежиховский, также может служить активной областью формирования стока, особенно в регионах, где значительная часть, а зачастую и все запасы воды в снеге, накапливается именно в ней – то есть в оврагах, балках и долинах рек и ручьев.

Склоновый сток в моделях определяется как разница в интенсивности водоподачи и впитывания влаги в почву. Авторы некоторых моделей, в частности Ю. Б. Виноградов, признают факт формирования склоновой микроручейковой сети. При этом для упрощения расчета склонового стока все равно используется более простая Хортоновская схема склонового поверхностного стока.

Формирование склоновой микроручейковой сети связано с преобразованием поверхности при интенсивной водоподаче на нее в ходе снеготаяния и выпадения интенсивных дождей. Последовательность формирования склоновой сети формализована И. Н. Гарцманом и др. [Гарцман, Карасев, Лобанова, 1973] следующим образом: водоподача – насыщение почвы – выклинивание избыточной влаги и заполнение микропонижений – прорыв микропонижений – создание временной (блуждающей) ручейковой сети – водная эрозия (закрепление постоянной сети) – транзит водных потоков. Склоновая сеть стекания рядом авторов иерархически подразделена на три типа, первый из которых приурочен к верхней части склонов с небольшим уклоном, имеет длину от метров до десятков метров и глубину 1 – 5 см. Ручьи второго типа образуются при слиянии ручьев первого типа и имеют длину от десятков до сотен метров с глубиной вреза 10 – 30 см. Ручьи третьего типа приурочены к ложбинам и образуются при слиянии ручьев второго типа, Их длина обычно более 300 м, а глубина вреза составляет 30 – 80 см [Бобровицкая, 1986].

Государственный гидрологический институт проводил полевые исследования склоновой русловой сети на водосборах ВФ ГГИ, Нижнедевицкой ВБС в лесостепной зоне, на Алтае и в ряде других регионов, а также на полигоне «Могот» экспедиции БАМ в горно-таежных условиях многолетней мерзлоты.

Исследования формирования склоновой сети в основном проводились в интересах развития теории транспорта наносов, разработки и совершенствования методов расчета водной эрозии. В частности, такие работы выполнялись в 1950 – 1960-х годах на Валдае и в 1970 – 1980-х годах на Нижнедевицкой ВБС. По результатам этих многолетних исследований были выпущены нормативные документы для расчета максимальных расходов воды и слоев стока весеннего половодья на малых водосборах (до 50 км²) и смыва почв с водосборов до 2 км². Технология измерений характеристик склоновой микроручейковой сети описана в работе [Кокорев, 1979].

Примеры склоновой микроручейковой сети приведены в различных публикациях Н. Н. Бобровицкой с соавторами, в частности в [Методические рекомендации ..., 1986; Bobrovitskaya et al., 1999]. Поверхностная сеть склонового стока на полевых участках водосборов ЕТР наиболее отчетливо прослеживается в период формирования весеннего половодья при наличии в почве промерзшего «запирающего слоя».

Результаты исследований склоновой сети на полигоне «Могот» опубликованы в [Василенко, 2013]. Они показали, что по данным глазомерных съемок даже при выпадении относительно небольших осадков общая длина действующей русловой сети возрастает на 10 – 30%, а при выпадении сильных дождей – на 70 – 80%.

Анализ крупномасштабных аэрофотоснимков позволил более точно определить длину склоновой сети. С ее учетом густота общей русловой сети, которая транспортирует воду при выпадении катастрофических по интенсивности и слою осадков, в 2.5 – 3 раза выше определенной по картам. Склоновая гидрографическая сеть для горно-таежных условий зоны многолетней мерзлоты была выработана на протяжении исторически длительного времени. Она представляет собой хорошо промытые «каменные трубки», частично покрытые мхами и лишайниками, то есть в некоторой степени является «закрепленной» в пространстве и времени, в отличие от микроручейковой сети на пахотных землях ЕТР, которая частично сохраняется только в ложбинах. Это позволяет при прохождении дождевых паводков и весеннего половодья «включать» ту часть склоновой сети, которая необходима для транспорта поступающей на поверхность склона воды. Разумеется, микроручейковая сеть изменяется и в этих условиях в результате переработки слагающих «трубки» фракций, оползней и других склоновых явлений (в частности, десерпции и солифлюкции). Однако эти процессы по большей части протекают в течение длительного времени.

Результаты этих исследований изменений густоты общей русловой сети в периоды формирования дождевых паводков и весеннего половодья были использованы

при разработке региональной формулы расчета максимального стока малых рек региона, описание которой приведено в упомянутой выше монографии и в [Практические рекомендации, 1986]. Позднее этот подход был успешно применен для анализа максимального стока малых рек бассейна р. Кубань.

Процессы образования склоновой сети и визуальные наблюдения показывают, что действующая площадь водосбора с точки зрения формирования поверхностного стока меньше его полной площади. Приводораздельные части, которые являются областью питания грунтовых вод, в формировании поверхностного стока чаще всего не участвуют (исключая такыровидные глинистые и подобные им водосборы), однако их доля от общей площади водосбора различна в зависимости от рельефа, почвенных, геологических и ряда других условий.

Поверхностный сток осуществляется не со всей площади водосбора, а с ее «действующей площади». Обычно ее уменьшение связывают с бессточными понижениями. Однако на практике на приводораздельных частях значительной части водосборов, в зоне питания грунтовых вод, где наблюдается повышенная инфильтрация поступающей на поверхность влаги (в результате так называемой «двойной фильтрации» [Соколов, 1996]) поверхностный сток также не формируется. Размеры этой части водосборной площади зависят от многих факторов, таких как рельеф, состав и литологическое строение почво-грунтов и др., и с точки зрения взаимодействия поверхностных и подземных вод влияют на величину питания грунтовых вод.

Внутрипочвенный сток является неотъемлемой частью склонового стока, но формируется только при наличии слабо проницаемого иллювиального горизонта в верхней части почвенной колонки, что характерно преимущественно для лесной зоны. Разгрузка внутрипочвенного стока происходит по преимущественным путям стекания.

4.2.2 Зона аэрации и грунтовые воды верхнего водоносного горизонта

Зона аэрации или ненасыщенная зона, располагающаяся между дневной поверхностью и зеркалом грунтовых вод, является средой, разделяющей поступающую на поверхность влагу на горизонтальные и вертикальные потоки. Горизонтальные потоки включают в себя поверхностный сток и внутрипочвенную верховодку, вертикальные – инфильтрацию и фильтрацию влаги, питающей грунтовые воды, а также движение парообразной влаги, испарение и транспирацию.

Зона аэрации в различных физико-географических условиях и на разных участках водосборов в зависимости от глубины залегания зеркала грунтовых вод верхнего горизонта и условий вододачи может иметь мощность от сантиметров

до 10 – 20 м и более. В периоды избыточного увлажнения на пониженных участках равнинных водосборов в ходе интенсивного снеготаяния или при выпадении значительных осадков грунтовые воды могут выходить на поверхность и зона аэрации отсутствует. Диапазон изменений глубины зоны аэрации, а, следовательно, и накопленного дефицита влаги в ней, может достигать значительных величин, что показано в Главе II.

Зону аэрации условно можно разделить на две части. Для верхней ее части характерна активная деятельность различных организмов, землероев, развитие корневой системы растений, антропогенных воздействий при сельскохозяйственном использовании земель, в результате чего верхние слои почво-грунтов имеют меньшую объемную массу и, соответственно, высокую скважность. В то же время в этой части зоны аэрации на ряде типов почв с наличием иллювиального слоя и резкими изменениями воднофизических характеристик генетических горизонтов (например, на подзолистых и дерново-подзолистых почвах) при определенных условиях формируется внутрипочвенная верховодка. В лесах на поверхности почвы формируется лесная подстилка, которая обладает высокой водоудерживающей способностью. Процессы влагообмена в этой части зоны аэрации характеризуются высокой динамичностью с временным масштабом от часов до нескольких суток при содержании влаги, близком к величине полевой влагоемкости и более, существенно замедляясь в засушливые периоды, когда содержание влаги достигает величин, близких влажности завядания.

Первой фазой поступления влаги в почву в процессе снеготаяния или выпадения дождя является инфильтрация, которая при насыщении почвы переходит в стадию фильтрации. Инфильтрация в различные типы почв определяется с помощью искусственного дождевания. Эксперименты позволяют получать кривые инфильтрации, которые преобразуются в аналитический вид зависимости скорости инфильтрации от коэффициента фильтрации, интенсивности и слоя осадков, дефицита влажности почвы. Процессы инфильтрации и различные варианты их аналитического выражения подробно рассмотрены в ряде публикаций и, в частности, в упомянутом выше обзоре Ф. Х. Дунина.

Фильтрационная способность почво-грунтов определяется их гидрофизическими характеристиками – зависимостью капиллярно-сорбционного потенциала от влажности, наименьшей и полной влагоемкостью, максимальной гигроскопичностью, влажностью завядания, коэффициентами фильтрации и влагопроводности. Для коэффициента влагопроводности С. А. Лавровым были получены различные варианты расчетных формул, которые были проверены на материалах о некоторых водно-физических свойствах почв США [Калюжный, Лавров, 2012]. Это свидетельствует о недостаточном объеме отечественной информации об этих характеристиках и необходимости ее получения для уточнения параметров формул.

Необходимо отметить, что экспериментальные исследования изменения коэффициентов фильтрации во времени, проведенные упомянутыми авторами для различных типов подзолистых и дерново-подзолистых почв, показали существенное их снижение в процессе набухания увлажненной почвы. Стабилизация величин коэффициентов фильтрации происходит только через 10 – 20 суток после начала поступления влаги, то есть коэффициенты фильтрации строго говоря не являются константой.

Модели движения влаги в ненасыщенной зоне, используемые в качестве самостоятельных моделей или как части моделей стока, таких как SWAT, SHE, MODFLOW, SIMGRO и др., широко применяются в практике гидрологического моделирования. Однако для условий России наиболее адекватной представляется модель, разработанная в ГГИ С. А. Лавровым, поскольку в ней по возможности детально учтены фазовые переходы вода – лед – вода при промерзании и оттаивании почвы, миграция влаги к фронту промерзания, процессы, происходящие в снежном покрове [Калюжный, Лавров, 2012; Лавров, 2021]. В моделях стока «Гидрограф» и ECOMAG, как и во многих других, эти процессы также учтены, но в более упрощенном порядке.

Пространственное распределение инфильтрации и фильтрации по площади водосборов неравномерно. В зонах питания подземных вод («окнах» питания) отмечается эффект так называемой «двойной пористости» и «двойной фильтрации», когда одновременно действуют медленная (до нескольких метров в год) и быстрая (до нескольких метров в сутки) инфильтрация и фильтрация, о чем было упомянуто в разделе 4.1.1. Первая связана с движением влаги по всей матрице порового пространства пород зоны аэрации, вторая – с «преобладающими путями фильтрации» по трещинам, пустотам и подобным образованиям [Соколов, 1996].

В нижней, более глубокой части зоны аэрации процессы движения влаги замедляются с увеличением ее мощности. Расчеты потоков влаги в почво-грунтах при глубине залегания зеркала грунтовых вод 3 м и 7 м показали увеличение времени поступления влаги в грунтовые воды для второго случая на 3 – 4 месяца [Hydrological Draught ..., 2004]. Аналогичные результаты были получены для условий бассейна р. Дон, когда просочившаяся в почву в период формирования весеннего половодья в апреле влага в отдельные годы достигала уровней грунтовых вод верхнего водоносного горизонта только в августе и позже [Вершинина и др., 1985].

Реакция собственно грунтовых вод на внешние воздействия условно может быть разделена на быстрые и замедленные процессы. В частности, реакция грунтовых вод на внешние воздействия, такие как выпадение осадков или быстрое изменение атмосферного давления, в зоне их разгрузки может происходить немедленно, в то время как в зоне питания она занимает несколько суток, даже в случае небольшой начальной глубины уровней грунтовых вод от поверхности, о чем было сказано выше (*рисунок 4.1*).

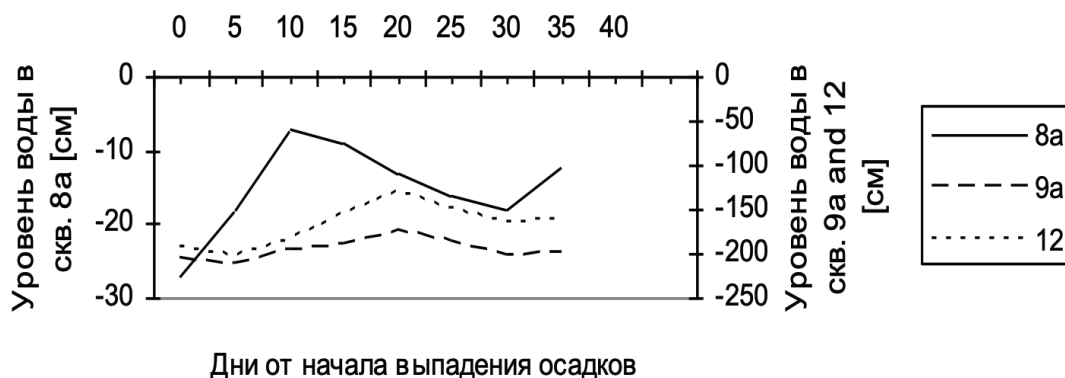


Рисунок 4.1. Пример изменения уровней грунтовых вод в зонах питания (скважины 9а и 12: 100 м и 200 м от русла) и разгрузки (скважина 8а: 20 м от русла) после выпадения осадков

Примером различий реакции насыщенной и ненасыщенной зон водосбора может служить формирование паводка в замыкающем створе лога Усадьевского ($A=0,36 \text{ км}^2$), которое началось сразу после начала дождя, вследствие склонового и грунтового стока из насыщенной прирусловой зоны (рисунок 4.2). Паводок здесь уже завершился к моменту, когда на притоках основного русла он только начался. Очевидно, что такое явление характерно для очень маленьких водосборов, где насыщенная зона разгрузки грунтовых вод охватывает существенную часть водосбора. Это еще раз подтверждает справедливость подхода Хьюлетта и ряда других исследователей к процессу формирования стока.

Методы расчета стока подземных вод основаны на физике движения воды в пористой среде. Обзор этих методов сделан в работах Иглсона [Eagleson, 1970] и Мейдмента [Maidment, 1992]. Чаще всего движение влаги в насыщенной зоне (водоносном горизонте грунтовых вод) рассчитывается по формуле Дарси. В упрощенном виде формула имеет вид:

$$Q = KA \Delta h/L, \quad (4.1)$$

где Q – скорость потока, K – коэффициент проницаемости (влагопроводности), Δh – разность пьезометрического напора на участке длиной L , A – ширина участка.

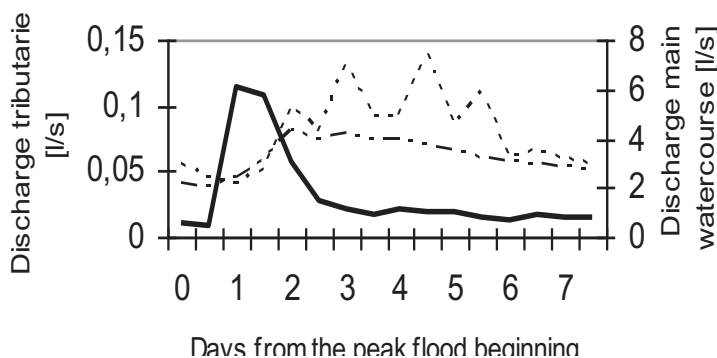


Рисунок 4.2. Пример формирования паводков на логе Усадьевском (жирная линия) и его притоках (прерывистые линии)

Таким образом, определяющими факторами для расчета разгрузки грунтовых вод являются пьезометрический напор и водно-физические свойства водоносного горизонта. Для более глубоких водоносных горизонтов такой подход, вероятно, правомерен. Однако, как представляется, в зоне активного водообмена помимо этих факторов на процессы формирования грунтового стока определенное воздействие может оказывать изменение давления воздуха, как атмосферного, так и внутрипорового. Само по себе это явление известно давно, но его влияние на процессы формирования стока воды, по-видимому, не считается значимым, особенно для половодья и паводков. Однако в процессах питания и разгрузки грунтовых вод воздействие изменений давления воздуха может оказаться достаточно существенным.

Ряд исследователей, включая перечисленных в упомянутой статье Б. Л. Соколова, полагают, что водоотдача из насыщенных водоносных горизонтов осуществляется путем передачи давления, обусловленного изменениями гидравлического напора. Импульс инфильтрационного питания вызывает импульс вытеснения части подземных вод в дренаж «при сохранении в целом баланса между поступлением воды в речной бассейн и выходом из него». Скорость передачи давления от места поступления инфильтрационной волны (или «толчка») сопоставима со скоростью движения поверхностного склонового и руслового стока, то есть весьма высока. Только таким образом можно объяснить высокое содержание «старых» вод в первой волне половодья и при прохождении дождевых паводков по данным измерений электропроводности воды или ее изотопного состава. Из этого можно сделать заключение, что вертикальное и горизонтальное движение влаги в почво-грунтах определяется не только процессами инфильтрации и фильтрации, но и за счет передачи давления воздуха и импульса напора.

Прямое воздействие, вызванное резкими перепадами атмосферного давления, выражается в «выдавливании» воды из прилегающей к руслу насыщенной зоны грунтовых вод. Такое явление прослеживается только на водотоках начального звена гидрографической сети в случаях, когда эта зона достаточно велика и перенасыщена водой, или в изменении режима дебита родников. В частности, на логе Усадьевском неоднократно были зафиксированы небольшие паводки, сформированные без выпадения осадков. Тесная связь отмечается также между колебаниями атмосферного давления и режимом дебита родников [Лавров, Марков, 2018].

Помимо прямого воздействия резких перепадов атмосферного давления и давления воздуха в толще почво-грунтов на режим грунтовых вод в определенной мере воздействует градиент давления воздуха между его величиной на поверхности почвы и над поверхностью зеркала грунтовых вод верхнего горизонта, возникающий в процессе промерзания и оттаивания деятельного слоя почво-грунтов. Измерения, проведенные С. В. Завилейским на логе Усадьевский ВФ ГГИ в холодный период 2006 – 2007 годов и болотной станции Ламмин-Суо в 2007 – 2008 годах, показывают сезонный характер его внутригодового распределения (*рисунок 4.3*).

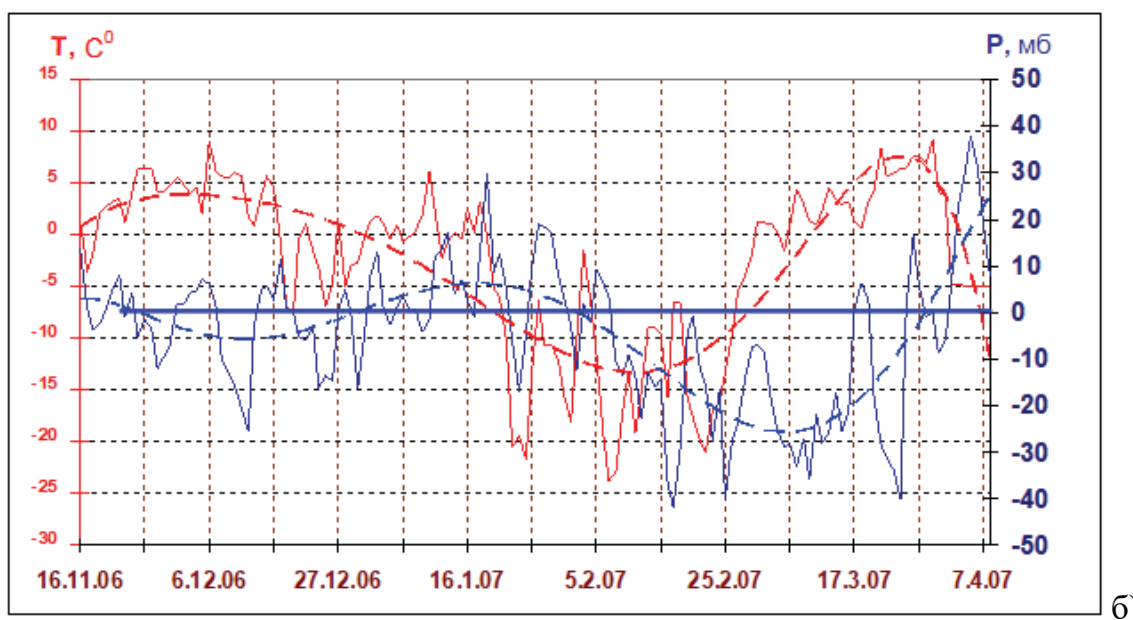
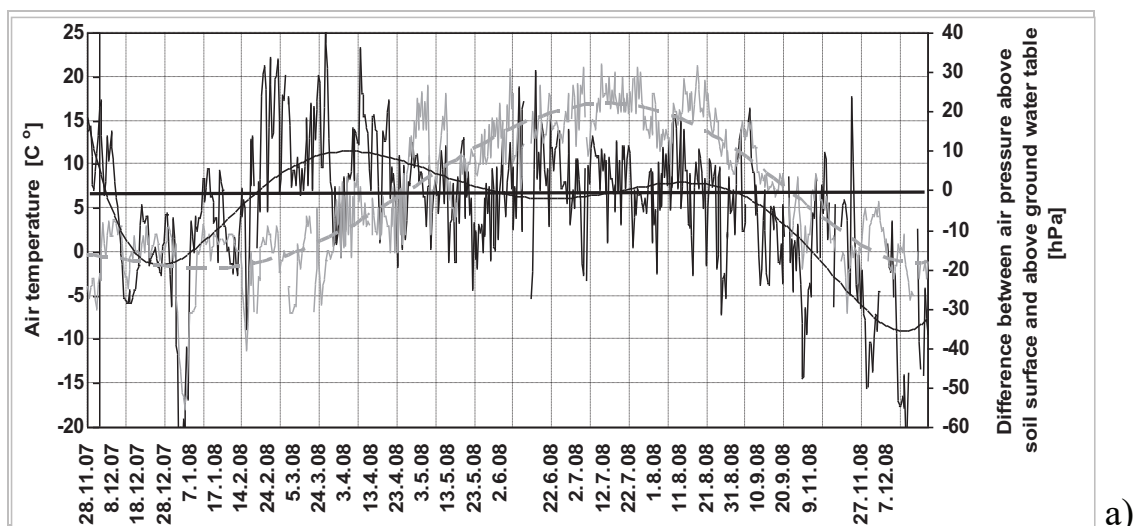


Рисунок 4.3. Изменения суточной температуры воздуха (Т; прерывистая линия) и градиента давления воздуха (Р; разница между давлением воздуха над поверхностью почвы зеркалом уровня грунтовых вод верхнего горизонта, сплошная линия) по данным наблюдений на болотной станции Ламмин-Суо в 2007 – 2008 гг. (а) и на ВФ ГГИ (б)

На болотной станции с конца февраля до конца мая и в течение некоторого периода в августе-сентябре наблюдаются положительные величины градиента давления, которые могут способствовать «продавливанию» влаги ниже верхнего водоносного горизонта или ее вытеснению к окрайкам болотного массива. В течение холодного периода, когда почва и торфяная толща промерзает, в результате миграции влаги к фронту промерзания формируются отрицательные величины градиента. Соответственно, разреженное давление должно препятствовать фильтрации влаги в более глубокие горизонты, так же, как и оттоку воды с болотного массива. Оттаивание почво-грунтов, в свою очередь, ведет к резкому

выравниванию давления, в результате чего избыточная влага с поверхности и из верхних слоев почвы «втягивается» в зону ниже границы мерзлого слоя и поступает в верхний водоносный горизонт существенно быстрее, чем можно ожидать при отсутствии глубокого промерзания.

Наибольшие отрицательные значения осредненного градиента давления воздуха на болотной станции Ламмин-Суо, достигавшие значений, близких -40 hPa , наблюдались в декабре 2008 года, положительные – до 15 hPa , в апреле 2008 г., то есть в период оттаивания почвы и формирования весеннего половодья. На Валдае максимумы отрицательных значений градиента давления воздуха наблюдались в конце февраля – начале марта, положительных – также в апреле.

Данные наблюдения являются «разовыми». Они свидетельствуют о значимости явления и его зависимости от конкретных гидрометеорологических условий года. Для примера рассмотрим изменения уровней грунтовых вод в скважине № 16, заложенной на верхний водоносный горизонт и расположенной на приводораздельной равнине между бассейнами р. Девицы и руч. Ясенок, в период формирования весеннего половодья 1986 года (рисунок 4.4). Промерзание почво-грунтов в этом году по данным наблюдений на разных мерзлотомерах достигало от 60 см до 150 см и более.

С начала снеготаяния в ходе постепенного оттаивания почво-грунтов происходило постепенное повышение уровней грунтовых вод в течение 14 дней на 45 см, после чего наблюдалось даже незначительное его падение. В период полного протавивания почвы за 2 дня произошел «скачок» уровня воды на 30 см. При этом можно предположить, что в результате поршневого эффекта при выравнивании давления над зеркалом грунтовых вод часть воды из верхнего водоносного горизонта была «продавлена» в более глубокие слои грунта к следующему водоносному горизонту, то есть фактическое увеличение поступления воды в верхний водоносный горизонт могло быть больше зафиксированного наблюдаемым подъемом уровня.



Рисунок 4.4. Изменения уровня грунтовых вод верхнего горизонта на скважине №16 Нижнедевицкой воднобалансовой станции в период формирования весеннего половодья в 1986 году

Разумеется, нельзя не учитывать также явление «капиллярного сброса», которое связано с эффектом мгновенного сброса воды по заполненным влагой капиллярам в случае превышения их водоудерживающей способности, что было описано А. Ф. Лебедевым еще в 1936 году [Лебедев, 1936]. Поэтому вероятно комбинированное воздействие этих процессов на динамику уровней грунтовых вод в момент оттаивания почвы.

Уровни грунтовых вод верхнего горизонта в районах наблюдений зоны избыточного и достаточного увлажнения залегают на небольшой глубине и на их режим в теплый период влияет режим испарения с поверхности почвы. В период наибольшей его интенсивности возникает небольшой отрицательный градиент давления, при снижении интенсивности испарения – положительный градиент.

Процессы воздействия (передачи) давления воздуха в зоне аэрации, по-видимому, связаны с заземленным воздухом между фронтом фильтрации и зеркалом грунтовых вод [Лавров, Марков, 2018]. Можно предположить, что чем значительнее количество фильтрующейся через нее влаги, тем больше эффект барометрической эффективности. Таким образом, процесс движения влаги в зоне аэрации и в верхнем водоносном горизонте представляется комплексным, включающим в себя как относительно замедленные процессы инфильтрации и фильтрации, так и более быстрые процессы передачи давления.

В ряду недостаточно изученных процессов в динамике грунтовых вод, существует еще явление гистерезиса в системе уровень – разгрузка грунтовых вод [Herrmann, 1999]. Различия в мощности зоны аэрации в областях питания, транзита и разгрузки грунтовых вод вызывают разновременное повышение и понижение их уровней в процессе поступления влаги и ее сбрасывания. Значимость влияния этого эффекта в процессах стока грунтовых вод пока не вполне очевидна.

Водообмен между водоносными пластами, определение коэффициента фильтрации относительного водоупора и методика оценки слоя воды, перетекающей в нижележащие горизонты рассмотрены в [Вольфцун, 1972]. Однако для реализации предлагаемых методов необходима информация о динамике уровней воды верхних водоносных горизонтов, коэффициентах водоотдачи и фильтрации, уклонах поверхности грунтовых и подземных вод, глубине залегания водоупора, длинах склонов. То есть для «стыковки» гидрофизической модели с процессами разгрузки (оттока) грунтовых вод по водоупору и в нижележащие горизонты необходима дополнительная информация.

4.2.3 Береговое регулирование

Береговое регулирование является последней фазой взаимодействия поверхностных и подземных вод, в определенной мере регулирующей поступление последних непосредственно в гидрографическую сеть. Р. А. Нежиховский считал этот термин неудачным, поскольку фактически речь идет о прирусловом «грунтовым регулировании стока», что представляется справедливым. Однако он был в свое время принят как более простой и краткий.

Береговое регулирование для периодов формирования стока весеннего половодья с примерами расчета рассмотрено Р. А. Нежиховским [Нежиховский, 1971]. Им предложена расчетная схема и показано, что в период формирования весеннего половодья при возникновении обратных уклонов происходит отток воды из русла в откосы берега и дно поймы. Грунтовые воды, «запертые» высокими уровнями воды или промерзшими берегами, также накапливаются в зоне разгрузки, вызывая повышенный сток при оттепелях и в начальной стадии половодья еще до начала снеготаяния [Кравченко, 1992].

Расчетное уравнение включает в себя максимальные и меженные величины ширины реки и уровней воды в ней, площади поперечного сечения, коэффициент водоотдачи прибрежных грунтов. Очевидно, что эффект весьма значителен для крупных рек с большим диапазоном изменений уровней и ширины реки, широкими поймами, особенно сложенными рыхлыми песчано-галечными отложениями с высокими коэффициентами водоотдачи. К концу половодья в реку возвращается около 30% объема этой воды, а остальная часть стекает в течение 5 – 6 месяцев, то есть происходит перераспределение стока весеннего половодья.

Для самых малых рек и ручьев этот эффект существенно уменьшается. Наблюдения, проведенные на малых притоках р. Полометь в 1960-е годы, показали, что повышение уровней грунтовых вод в зоне их разгрузки в период формирования весеннего половодья как правило не сопровождается возникновением обратных уклонов.

Однако на малых реках проявляются и другие эффекты, когда в холодный период формируется ледовый покров, под которым, во-первых, образуется зона повышенного давления, и, во-вторых, снижается пропускная способность потока, что препятствует разгрузке грунтовых вод. В условиях оттепельного режима, наоборот, создаются благоприятные условия для их разгрузки. Поскольку этот вопрос инструментально пока слабо исследован, он требует внимания и изучения.

4.2.4 Выводы и предложения

В предыдущих разделах показано, что в течение многих десятилетий для изучения взаимодействия поверхностных и подземных вод прилагались большие усилия, в результате которых были достигнуты несомненные успехи в описании и физико-математической интерпретации отдельных процессов. В первую очередь это касается процессов, протекающих на поверхности и в наиболее активной верхней части зоны аэрации.

В то же время остается большое количество неопределенностей, которые частично или полностью не разрешены, что по-прежнему оставляет процессы взаимодействия поверхностных и подземных вод в ряду недостаточно хорошо изученных. В частности, по нашему мнению, это касается влияния давления воздуха, как атмосферного, так и внутрипорового на движение влаги в зоне аэрации, верхней насыщенной зоне и его роли во взаимодействия с более глубоким постоянным водоносным горизонтом, то есть в целом в зоне активного водообмена. Не менее проблемными остаются процессы «берегового регулирования» разгрузки грунтовых и подземных вод в гидрографическую сеть при различных условиях открытого русла и особенно в холодный период при промерзании берегов и наличии ледового покрова. Однако и другие процессы, о которых упомянуто выше, также требуют проверки, дополнения и уточнения.

Модели стока воды в настоящее время не могут служить полноценной теоретической базой полного цикла взаимодействия поверхностных и подземных вод в силу ряда причин. Часть из них связана с общей направленностью моделирования стока воды на его максимальные фазы – весеннее половодье и дождевые паводки. Достоверность описания процессов взаимодействия поверхностных и подземных вод в этих моделях уходит на второй план. Другой причиной является недостаточная изученность этих процессов во всем их комплексе и большой недостаток полевой информации, начиная с водно-физических характеристик почво-грунтов, динамики влаги в зоне аэрации, уровней грунтовых вод разных горизонтов и т.д.

В предшествующие годы (до начала 1990-х годов) большой объем экспериментальных гидрологических исследований для решения сложных гидрологических задач проводился в рамках различных крупных государственных проектов, таких как объекты гидроэнергетики, создание и эксплуатация крупных водохранилищ, сельскохозяйственное освоение земель, добыча полезных ископаемых и т.д. При этом широко использовались исследования на репрезентативных водосборах, а также лабораторные эксперименты. В настоящее время единственными объектами гидрологических исследований могут служить еще сохранившиеся немногочисленные водосборы воднобалансовых и болотных станций.

Программа наблюдений на репрезентативных водосборах воднобалансовых станций изначально была направлена на обеспечение информацией обо всех элементах водного баланса и определяющих их факторах. Эта программа, как было указано в Главе I, является базовой и не подлежит изменению, являясь основой мониторинга тепло- и влагооборота. Принципы размещения пунктов наблюдений и определение их необходимой плотности и сроков производства наблюдений были связаны с обеспечением корректного расчета составляющих водного баланса на основе данных прямых и косвенных инструментальных наблюдений для максимально возможного «замыкания» их водного баланса с приемлемой невязкой.

В то же время практически на всех станциях в интересах развития методов гидрологических расчетов и прогнозов при участии ГГИ, Гидрометцентра и региональных институтов проводились дополнительные наблюдения и исследования, например, за интенсивностью снеготаяния и рядом других процессов. В настоящее время целесообразно направить такие дополнительные усилия на более детальное и комплексное изучение взаимодействия поверхностных и подземных вод. Однако такое перестроение и расширение наблюдательной сети позволит обеспечить комплексность наблюдений не только в части «замыкания» водного баланса водосборов, но и в части повышения комплексности наблюдений за движением влаги и процессами формирования стока и других элементов водного баланса и определяющих их факторов.

Разумеется, рассуждать о проведении экспериментальных гидрологических исследований в сослагательном наклонении не принято. Желательно, чтобы эти работы уже были развернуты и получены хотя бы предварительные результаты. Однако, в сложившихся к настоящему времени обстоятельствах трудно представить когда это будет сделано и с какой степенью полноты эксперимента. Поэтому представляется целесообразным хотя бы определить общие направления этих работ.

Начальный этап исследований должен включать наиболее возможно полное качественное описание наблюдаемых процессов движения влаги, начиная от поверхности склона в различных его частях, подкрепленное количественными показателями. Этот важный этап должен позволить оценить различные эффекты, которые могут воздействовать на динамику взаимодействия поверхностных и подземных вод, независимо от их значимости для конечного результата с тем, чтобы выделить наиболее важные из них. Одновременно, по мере накопления информации, предполагается задействовать различные модели движения влаги в зоне аэрации и насыщенной зоне.

Теоретическим базисом в первом приближении могут служить гидрофизические модели, из которых наиболее приемлемой для природных условий России представляется модель, разработанная в ГГИ С. А. Лавровым, в связке с гидрогеологическими моделями типа MODFLOW. Однако, как гидрофизические, так и гидрогеологические модели требуют совершенствования и проверки на фактических

данных наблюдений за влажностью почвы и грунта по всему профилю зоны аэрации и уровнями грунтовых вод. При этом возникает необходимость оценки горизонтальных потоков влаги верховодки (в период ее образования) и верхнего водоносного горизонта наряду с вертикальным потоком из верхнего горизонта к нижележащему горизонту подземных вод, равно как и сток из него в водные объекты.

Полевые (экспериментальные) исследования в перспективе следует направить на весь комплекс процессов преобразования поступающей на поверхность водосбора или его части (склона) влаги для проверки и уточнения современных представлений об их физических закономерностях и с учетом потребностей моделирования в параметрах и входящей информации. Получаемые при модельных расчетах результаты (выходные данные) необходимо проверять на материалах фактических наблюдений. Для этого необходимо организовать гидрофизические полигоны или площадки, насыщенные современными приборами и оборудованием, позволяющими проводить детальные комплексные наблюдения за поступлением и движением влаги в поверхностном слое и по всему профилю зоны активного водообмена, изменениями давления внутрипорового воздуха над поверхностью зеркала грунтовых вод и рядом других характеристик, определяющих формирование влагообмена, с разрешением, близким к режиму реального времени.

На каждом полигоне помимо осадкомерного и метеорологического пункта (если метеостанция удалена от него) предполагается оборудовать три – четыре пункта наблюдений в зонах питания, транзита и разгрузки грунтовых вод. В каждом пункте желательно иметь скважины для измерения уровней грунтовых вод на верхний и второй водоносные горизонты, датчики давления воздуха над уровнем верхнего горизонта грунтовых вод, скважины для производства наблюдений за влажностью почво-грунтов на основе гамма-метода (с одновременным контролем гравиметрическим способом в верхней части зоны аэрации), наблюдения за температурой и промерзанием почво-грунтов. В холодный период также необходимо проводить снегосъемки. Предварительная схема створов гидрофизических площадок и пункта наблюдений приведены на *рисунках 4.5 и 4.6*.

Схема размещения створов и пунктов наблюдений не является строго закрепленной и может быть изменена в соответствии с природными условиями и в ходе уточнения программы эксперимента и потребностей моделирования. Выбор площадок (профилей) должен осуществляться на основе детальных изысканий в отношении рельефа, почв и гидрогеологических условий, с учетом наибольшей безопасности в отношении приборов и оборудования, а также доступности для производства наблюдений.

Границы зоны питания могут быть установлены по истокам микроручейковой поверхностной сети. Граница между транзитной зоной и зоной разгрузки, очевидно, непостоянна и смещается вверх по длине склона по мере насыщения зоны

аэрации и повышения уровней грунтовых вод в нижней части склона в зависимости от условий их разгрузки в водоток.

Полезно было бы дополнить комплекс наблюдений воднобалансовыми площадками, которые должны охватывать транзитную зону и зону разгрузки склона, то есть ту часть склона, где наблюдается склоновый поверхностный и внутрипочвенный сток. Это позволит количественно оценить их величины. При организации работ в пределах водосбора малого водотока, не дренирующего грунтовые воды, поверхностный и внутрипочвенный сток может быть оценен по данным наблюдений на нем, хотя это будет интегральная величина.

Одновременно с исследованиями процессов миграции влаги на склонах необходимо организовать наблюдения за процессами разгрузки грунтовых и подземных вод в гидрографическую сеть при различных условиях высоких и низких уровней воды в ручьях и реках, наличии и отсутствии ледового покрова, оказывающего воздействие на пропускную способность водотока, и т.п. При этом целесообразно использовать все доступные методы измерений – гидрометрические, гидрохимические, электропроводности, изотопные.

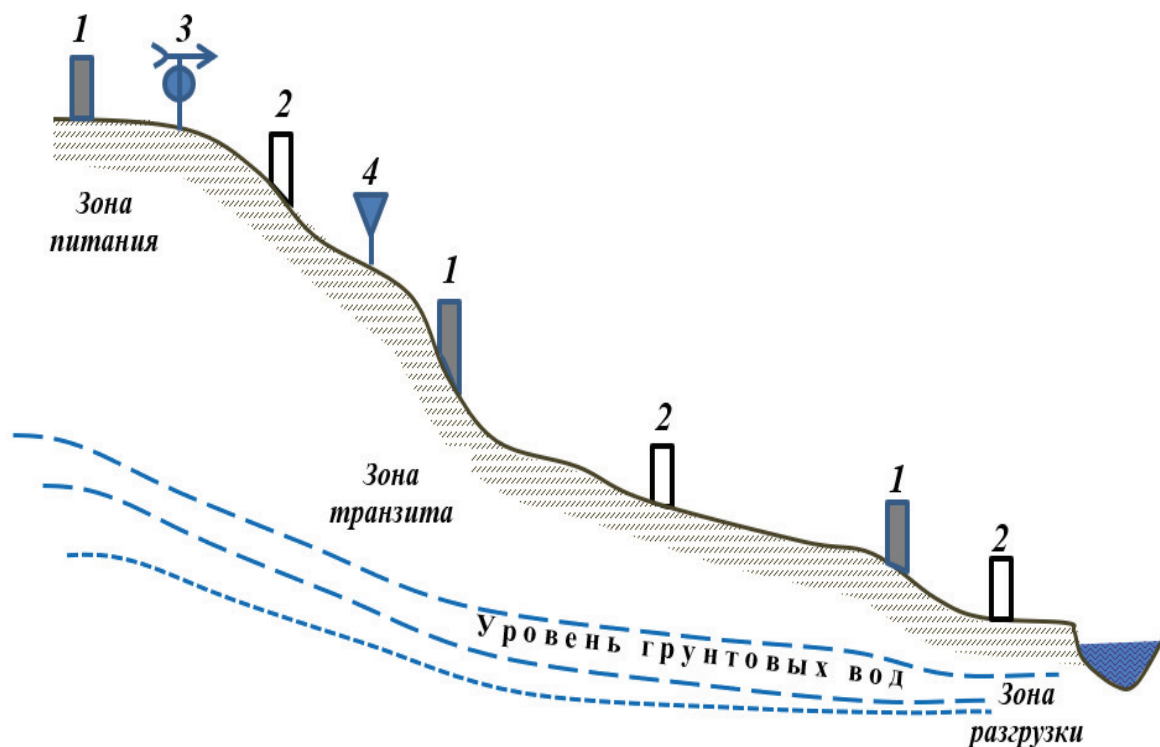


Рисунок 4.5. Предварительная схема створа гидрофизической площадки:

- 1 – полный комплекс наблюдений в зоне аэрации, грунтовых и подземных водах;
- 2 – дополнительные скважины; 3 – автоматическая метеостанция; 4 – осадкомер.

Пункты 3 и 4 устанавливаются при отсутствии стандартной метеостанции вблизи площадки

Предлагаемые экспериментальные наблюдения целесообразно проводить при участии гидрогеологов и специалистов других заинтересованных в таких исследованиях направлений, а также в сочетании с лабораторными определениями основных гидрофизических характеристик почво-грунтов конкретных профилей и проведением численных экспериментов с использованием для этой цели гидрофизических моделей.

На первом этапе этих работ предполагается получить информацию обо всем комплексе движения влаги и определяющих его факторах в различных частях склонов как в зоне аэрации, так и в верхнем водоносном горизонте и ниже него. В дальнейшем программа и методы наблюдений могут быть откорректированы в зависимости от полученных результатов.

Исследования взаимодействия поверхностных и подземных вод на первый взгляд носят характер фундаментального раздела гидрологической науки. Однако дальнейшее ее развитие в прикладной части прямо зависит от развития фундаментальных исследований процессов формирования стока, что особенно важно в условиях, когда в результате климатических изменений возрастает доля подземного питания рек на фоне снижения его поверхностной составляющей.

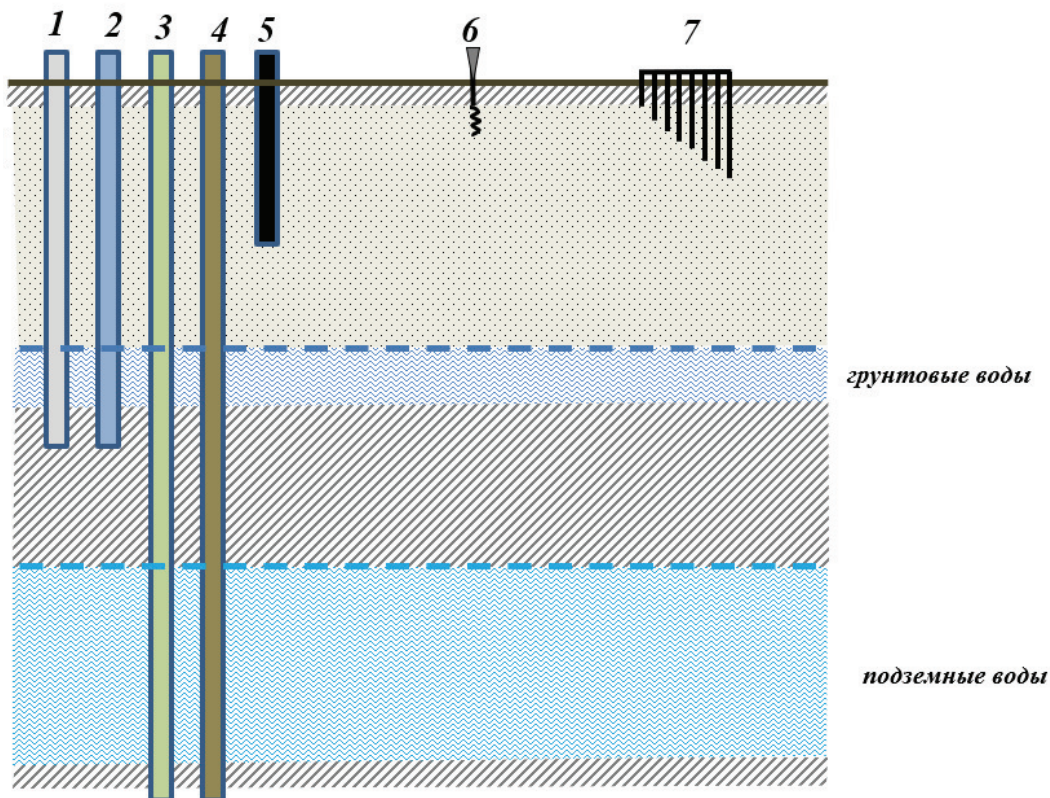


Рисунок 4.6. Предварительная схема основного пункта наблюдений на гидрофизической площадке:
 1 – гидрогеологическая скважина (грунтовые воды); 2 – скважина с датчиком давления;
 3 – гидрогеологическая скважина (подземные воды); 4 – скважина для наблюдений за влажностью почво-грунтов (при наличии нейтронного влагомера или другого датчика); 5 – мерзлотомер;
 6 – площадка измерения влажности почвы гравиметрическим способом; 7 – почвенные термометры

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

История гидрологических исследований на репрезентативных и экспериментальных водосборах в России насчитывает уже целый век. И практически одновременно с началом таких работ возникла идея создания сети объектов комплексных наблюдений первоначально в виде стоковых станций.

Амбициозная программа создания широкой сети стоковых станций, разработанная в 1930-х годах, не могла быть реализована в силу многих проблем, прежде всего экономического характера. Однако их создание активно разворачивалось и был накоплен определенный как положительный, так и отрицательный опыт организации комплексных воднобалансовых наблюдений на репрезентативных водосборах. Существенный импульс организации стоковых станций в конце 1940 – начале 1950-х годов придало бурное развитие в этот период экспериментальных гидрологических исследований в СССР, когда были разработаны и внедрены новые методы и средства измерений. Помимо собственно стоковых станций метод изучения процессов формирования влагооборота широко применялся в экспедиционных гидрологических исследованиях в различных физико-географических условиях для решения большого спектра задач.

На протяжении многих десятилетий воднобалансовые станции служат важнейшим источником информации (эмпирического базиса) для решения большинства задач гидрологической науки и практики – изучения процессов влагооборота в различных физико-географических зонах и для различных сочетаний типов ландшафтов, мониторинга гидрологического режима, в том числе в условиях многолетних изменений климата и антропогенных воздействий, разработки методов гидрологических расчетов и прогнозов, моделей формирования стока воды и отдельных составляющих водного баланса и процессов влагообмена.

Несмотря на некоторые черты азональности, присущие малым водосборам даже в случае их тщательного отбора по критериям репрезентативности, в целом они достаточно адекватно отражают зональные закономерности процессов формирования влагооборота и их изменения под влиянием многолетних колебаний климата и антропогенных воздействий. Это подтверждается как данными сетевых наблюдений в районах расположения воднобалансовых станций, так и материалами комплексных наблюдений различных экспедиций, что неоднократно подчеркивалось различными исследователями.

Полноценная информация о режиме составляющих водного баланса и определяющих их факторов может быть получена только при условии сохранения всего комплекса программы работ ВБС и необходимой густоты пунктов наблюдений

на них, а также структуры объектов наблюдений. Наиболее информативной является «гнездовая» структура «вложенных» водосборов.

Соответственно, водные балансы водосборов за гидрологические годы, сезоны и генетические периоды на основе прямых измерений составляющих водного баланса с приемлемой точностью могут быть рассчитаны только при условии проведения полного комплекса наблюдений с необходимым количеством пунктов наблюдений. Сопоставление расчетных величин составляющих водного баланса водосборов с различной степенью дренирования подземных вод позволяют с достаточной достоверностью определять величину инфильтрации за гидрологический год. В то же время границы гидрологического года могут меняться в зависимости от климатических изменений, а, в отдельных случаях, и для специфических типов ландшафтов.

Мониторинг системы влагооборота на основе многолетних наблюдений за всеми составляющими водного баланса и определяющими их факторами позволяет оценить изменения этой системы под воздействием многолетних колебаний климата в различных физико-географических зонах ЕТР.

Наиболее важным фактором изменений гидрологического режима в условиях России является ослабление криогенного регулирования формирования стока воды, в результате чего происходит перестройка всей системы формирования стока воды и определяющих ее факторов, которая ведет к возрастанию доли подземного питания рек на фоне снижения ее поверхностной составляющей. Можно предполагать, что в зоне недостаточного увлажнения лесостепной и степной зон эта перестройка близка к завершению и основная фаза переходного периода, связанная с криогенными явлениями пройдена. Дальнейшее развитие ситуации будет зависеть от изменения количества осадков и длительности периода установления баланса питания и разгрузки подземных вод. Однако в остальных зонах перестройка еще продолжается. В любом случае необходимо продолжать мониторинг процессов, что весьма актуально для полноценной оценки ситуации и разработки мероприятий для адаптации социально-экономического комплекса к происходящим изменениям.

Существующие гидрологические модели стока, ориентированные на адекватное моделирование максимального стока (весеннего половодья и дождевых паводков), слабо адаптированы к процессам подземного питания рек. В значительной мере это связано с недостаточной изученностью полного комплекса взаимодействия поверхностных и подземных вод, что должно быть приоритетным направлением экспериментальных гидрологических исследований на ближайшую перспективу, в связи с чем система наблюдений на воднобалансовых станциях и вообще на исследовательских репрезентативных водосборах должна осуществляться комплексно не только с точки зрения полноты наблюдений за всеми

элементами водного баланса, но и с точки зрения комплексности построения сети для наиболее адекватного освещения процессов движения влаги на водосборе.

В данной работе в силу принятых ограничений не рассматриваются вопросы экспериментальных исследований различных видов антропогенного воздействия на гидрологический режим, хотя эти проблемы не только сохраняют свою актуальность, но даже обострились в последние десятилетия. В частности, большой практический интерес для южных регионов представляет оценка воздействия на местные водные ресурсы прудов и малых водохранилищ. По-прежнему слабо развита гидрология урбанизированных территорий, зон воздействия подземных водозаборов, предприятий добывающих отраслей и т.д. Поэтому развитие экспериментальных гидрологических исследований в будущем не должно ограничиваться только естественными водосборами.

Необходимо отметить, что с прекращением масштабных экспедиционных гидрологических исследований, начиная с 1990-х годов, репрезентативные и экспериментальные водосборы в сильно сокращенном составе сохранились только на воднобалансовых и болотных станциях, а вместе с ними фатально сократилась и эмпирическая информационная база гидрологии, что привело к чрезмерному увлечению математическим моделированием на основе уже существующих моделей с использованием накопленных к настоящему времени материалов наблюдений. Лабораторные гидрофизические исследования фактически также приостановились. То есть произошел «перекос» в соотношении экспериментальной и теоретической частях гидрологии, о чем говорил П. Л. Капица. Все это вкупе, в свою очередь, затормозило развитие детерминированных гидрологических моделей, особенно в области совершенствования адекватного отражения процессов взаимодействия поверхностных и подземных вод.

Сложившаяся ситуация не может быть признана нормальной и неизбежно раньше или позже потребует восстановления полноценной структуры гидрологических наблюдений и экспериментов, чему, как надеется автор, будет способствовать эта работа.

ЛИТЕРАТУРА

- Агроклиматические ресурсы Воронежской области. Отв. Ред. В. Н. Страшный. Л., Гидрометеиздат, 1972, 108 с.
- Анисимов О. А., Жильцова Е. Л., Ренева С. А.* Оценка критических уровней воздействия изменения климата на природные экосистемы суши на территории России. Метеорология и гидрология, 2011, №11, с. 31 – 41.
- Бабкин В. И., Вуглинский В. С.* Водный баланс речных бассейнов. Л., Гидрометеиздат, 1982, 190 с.
- Бабкин В. И.* Речной сток и циклоническая деятельность в бассейнах рек Оби, Енисея и Лены. Научный мир, М., 2017, 545 с.
- Бефани В. В.* Теория и расчет стока со склонов переменной ширины. Труды ОГМИ, 1949, вып. 4, с.177-204.
- Бобровицкая Н. Н.* Методические рекомендации по использованию аэрофото-съемок для исследования и расчета характеристик водной эрозии. Ред. И. Н. Корнилов. Л., Гидрометеиздат, 1986, 109 с.
- Богданова Э. Г., Гаврилова С. Ю., Ильин Б. М.* Атмосферные осадки. Труды ГГО, 2014, выл. 573, с. 39 – 64.
- Бочков А. П.* Об уточнении расчета средних годовых осадков. Труды ГГИ, вып. 127, 1965, с.174 – 187.
- Бочков А. П.* Составление водных балансов речных бассейнов за конкретные интервалы времени. Труды ГГИ, вып.217, 1974, с.3 – 44.
- Бояринцев Е. Л.* Оценка потерь весеннего стока в бассейне Верхней Колымы. В кн.: Метеорология, климатология и гидрология, Вып.16, «Высшая школа», Киев-Одесса, 1980, с.19 – 24.
- Булавко А. Г.* Водный баланс речных водосборов. Л., Гидрометеиздат, 1971 г., 304 с.
- Василенко Н. Г.* Гидрология рек зоны БАМ. «Нестор-История», СПб, 2013, 670 с.
- Великанов М. А., Львович М. И.* Типовая программа для стоковых станций. Изв. ГГИ, № 49, 1932, с.10 – 18.
- Вершинин А. П., Кузьмин П. П., Плиткин Г. А., Федоров С. Ф., Виноградов В. В., Марунич С. В., Ральцевич М. Д.* Методы определения испарения с земной поверхности. В кн. «Методы изучения и расчета водного баланса» (под ред. Вуглинского В. С. и др.), Л., Гидрометеиздат, 1981, с. 201 – 283.
- Вершинина Л. К., Соколова Н. В., Павлова К. К.* Основные показатели водопроницаемости почвы речных водосборов ЦЧО. Труды ГГИ, 1978, вып. 250, с. 13 – 29.

- Вершинина Л. К., Крестовский О. И.* Результаты исследований по усовершенствованию сети пунктов наблюдений за факторами стока весеннего половодья. Труды ГГИ, 1980, вып. 265, с. 126 – 137.
- Вершинина Л. К., Крестовский О. И., Калюжный И. Л., Павлова К. К.* Оценка потерь талых вод и прогнозы объема стока половодья (в равнинных районах Европейской территории СССР). Л., Гидрометеиздат, 1985 г., 189 с.
- Вершинина Л. К., Леонова Н. Е., Белова Л. Б.* Зависимости интенсивности гамма-излучения различных типов почв от увлажнения и возможность их использования в гидрологических прогнозах. Метеорология и гидрология, 1990, №11, с.101 – 108.
- Виноградов Ю. Б.* Математическое моделирование процессов формирования стока. Л., Гидрометеиздат, 1988, 312 с.
- Виноградов Ю. Б., Виноградова Т. А.* Современные проблемы гидрологии. М., «Академия», 2008, 319 с.
- Водные ресурсы России и их использование. Под ред. И. А. Шикломанова, 2008, ГГИ, СПб, 598 с.
- Водогрецкий В. Е.* Влияние агро-лесомелиораций на годовой сток. Л., Гидрометеиздат, 1979, 184 с.
- Водогрецкий В. Е.* Антропогенное изменение стока малых рек. Л., Гидрометеиздат, 1990, 175 с.
- Водогрецкий В. Е., Крестовский О. И.* Воднобалансовые экспедиционные исследования. Л., Гидрометеиздат, 1975, 144 с.
- Вольфцун И. Б.* Расчеты элементов баланса грунтовых вод. Л., Гидрометеиздат, 1972, 272 с.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М., Росгидромет, 2014, 1008 с.
- Гарцман И. Н., Карасев М. С., Лобанова Н. И.* Об индикативных свойствах густоты речной сети. Водные ресурсы, №6, 1973, с.144 – 152.
- Гельман Я. М.* Гидрология. Изд. ЛИИПС, Л., 1924.
- Георгиади А. Г., Милюкова И. П.* Сценарная оценка изменений стока рек Волги и Дона, возможных в первой трети XXI века. «Вопросы географии», вып. 133, М., изд. «Кодекс», с.224 – 236.
- Георгиевский В. Ю.* Водные ресурсы рек Российской Федерации. Труды IV Всероссийской научной конференции «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов», Москва, 15 – 18 сентября 2015 г., с.5 – 8.
- Глушков В. Г.* Вопросы теории и методы гидрологических исследований. Изд. АН СССР, М., 1961.

- Говоркова В. А., Павлова Т. В.* Ожидаемые изменения климата на территории Российской Федерации в XXI веке. Труды ГГО, вып. 575, 2014, с. 64 – 117.
- Голубев В. С.* Методы оценки сезонных и годовых сумм осадков на водосборах и суточных сумм осадков на сельскохозяйственных полях. Материалы семинара по расчетам водного баланса речных бассейнов и организации комплексных воднобалансовых и агрометеорологических наблюдений. Валдай, ГГИ, 1966, с.13 – 27.
- Голубев В. С.* Методика корректировки срочных и месячных величин атмосферных осадков и результаты их проверки. Труды ГГИ, 1973, вып. 207, с. 11 – 27.
- Голубев В. С., Калюжный И. Л., Федорова Т. Г.* Теплоизолированный испаритель ГГИ-3000 ТМ и результаты его испытаний. Труды ГГИ, вып. 266, 1980, с.74 – 85.
- Голубев В. С., Кузнецов В. И.* Анализ состояния сети водноиспарительных станций и предложения по ее рационализации. Труды ГГИ, вып. 266, 1980, с.64 – 73.
- Голубев В. С.* Методы измерения и расчета атмосферных осадков. В кн.: «Методы изучения и расчета водного баланса», под ред. Вуглинского В.С. и др. Л., Гидрометеиздат, 1981, с. 165 – 179.
- Голубев В. С., Урываев А. П.* Метод водных испарителей и его применение для расчета испарения с поверхности водоемов. Труды ГГИ, вып. 289, 1983, с. 69-...
- Голубев В. С., Коновалов Д. А., Симоненко А. Ю., Товмач Ю. В.* Оценка ошибок измерения осадков Валдайской контрольной системой. Метеорология и Гидрология, № 7, 1997, с.108 – 116.
- Голубев В. С., Коновалов Д. А., Богданова Э. Г., Ильин Б. М.* (2000). Полная модель корректировки осадкомерных данных: методика и алгоритм оценки систематических составляющих погрешности. - ВМО, Instruments and Observing Methods. Report № 74, WMO/TD - № 1028. p. 136 – 139.
- Голубев В. С., Лоримор Дж. Х., Гройсман П. Я., Сперанская Н. А., Журавин С. А., Менни М. Дж., Петерсон Т. К., Малон Р. В.* Изменения испарения на территории бывшего Советского Союза и континентальной части Соединенных Штатов Америки. Новые оценки. В сб.: Изменения климата и их последствия. Изд. «Наука», СПб, 2002, с.221 – 230.
- Горчаков А. М.* Исследование элементов водного баланса и его структуры в Приморье. Л., Гидрометеиздат, 1983, 182 с.
- Григорьев В. Ю., Фролова Н. Л., Джамалов Р. Г.* Изменение водного баланса крупных речных бассейнов европейской части России. Водное хозяйство, № 4, 2018, с.36 – 47.
- Джамалов Р. Г., Киреева М. Б., Косолапов А. Е., Фролова Н. Л.* Водные ресурсы бассейна Дона и их экологическое состояние. М., изд. «Геос», 204 с.

- Дмитриева В. А., Жигулина Е. В.* 2020. Динамика водности малых водотоков Верхнедонского бассейна и ее роль в структурно-динамической организации ландшафтов. Региональные геосистемы. 44(4); (404-414) DOI: 10.18413/2712-7443-2020-44-4-404-414.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. <http://climatechange.igce.ru>. М., 2021, 97 с.
- Дунин Ф. Х.* Моделирование инфильтрации в приближении к полевым условиям. В кн. «Грани гидрологии» под ред. Д. К. Родда. Л., Гидрометеиздат, 1980, с. 241 – 275.
- Жильцова Е. Л., Анисимов О. А.* Динамика растительности северной Евразии: анализ современных наблюдений и прогноз на 21 век. Арктика. XXI век. Естественные науки. 2015, № 2, с.48 – 59.
- Журавин С. А., Марков М. Л.* Природные риски и стратегия исследований водообеспеченности территорий. «Гидросфера», т. 1, вып. 1, 2019, с.71 - 89.
- Журавин С. А., Марков М. Л., Гуревич Е. В.* Многолетние изменения процессов влагооборота по данным воднобалансовых станций в центральной части бассейна р. Дон. Водные ресурсы, 2020, Т. 47, № 6, с. 729 – 741.
- Завилейский С. В., Марунич С. В., Соколов Б. Л.* Механизм формирования речного стока на малых водосборах Валдая. Изв. РАН, Серия геогр., 2000, №2, с. 37 – 40.
- Заводчиков А. Б., Журавин С. А.* Исследования на воднобалансовых станциях СССР. Итоги и перспективы. Труды ГГИ, вып. 282, 1981, с.88 – 101.
- Иванова Н. Н. и Ларионов Г. А.* Динамика длины малых рек: факторы и количественная оценка. Труды семинара «Причины и механизмы пересыхания малых рек» под ред. А. П. Дедкова и Г. П. Бутакова, 1996, изд. Казанского Университета, Казань, с. 37 – 42.
- Израэль Ю. А.* Глобальная система наблюдений. Прогноз и оценка изменений состояния окружающей природной среды. М. и Г., 1974, №7, с.3 – 8.
- Калюжный И. Л., Лавров С. А.* Гидрофизические процессы на водосборе. «Нестор-История», СПб, 2012, 615 с.
- Капотова Н. И.* Изучение режима подземных вод применительно к расчету водного баланса. В кн.: «Методы изучения и расчета водного баланса», под ред. Вуглинского В.С. и др. Л., Гидрометеиздат, 1981, с. 305 – 312.
- Карасев М. С., Лобанова Н. И.* Строение и водность речной сети Дальнего Востока. Л., Гидрометеиздат, 1981, 134 с.
- Кравченко В. В.* Особенности взаимодействия поверхностных и подземных вод в малых бассейнах криолитозоны. Ландшафтно-гидрологический анализ территории. Новосибирск, Сиб. отд. «Наука», 1992, с.88 – 106.
- Коль С. А.* К вопросу о стоковых станциях. Изв. ГГИ, № 47, 1932.

- Комаров В. Д.* Весенний сток равнинных рек ЕТС, условия его формирования и методы прогнозов. М., Гидрометеиздат, 1959, 240 с.
- Комаров В. Д.* Изучение факторов и закономерностей весеннего речного стока на основе данных наблюдений на репрезентативных бассейнах. Водные ресурсы, №4, 1980, с. 5 – 18.
- Коновалов Д. А.* Метрологическое обеспечение измерений гидрологических характеристик. «Измерительная техника», вып.4, изд. Госстандарта России, 2001, с. 61 – 67.
- Константинов А. Р., Федорова Т. Г., Голубев В. С.* Влияние различных факторов на показания водных испарителей, установленных на суше. Труды ГГИ, вып. 76, 1960, с. 67 – 111.
- Константинов А. Р.* О применении существующих тепло-воднобалансовых методов для анализа речного стока. Труды ГГИ, вып. 250, 1978, с. 78 – 98.
- Кокорев А. В.* Измерения смыва почв со склонов и малых водосборов. В изд. «Экспериментальные исследования гидрологических процессов и явлений». Ч. 2, М., изд. МГУ, с. 53 – 57.
- Корень В. И.* Математические модели в прогнозах речного стока. Л., Гидрометеиздат, 1991, 198 с.
- Корзун В. И.* Сток и потери талых вод на склонах полевых водосборов. Л., Гидрометеиздат, 1968, 169 с.
- Королев Ю. Б.* Картографирование растительного покрова в связи с оценкой его гидрологической роли (на примере Верхней Колымы). Дис. канд. биол. наук, Магадан, 1984, 231 с.
- Коронкевич Н. И.* Преобразование водного баланса. М., Наука, 1973, 120 с.
- Коронкевич Н. И.* Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. М., Наука, 1990, 205 с.
- Куделин Б. И.* Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. Изд. МГУ, М., 1960, 344 с.
- Кузнецов А. С.* Результаты исследований стока в горно-таежных условиях, а также в условиях вечной мерзлоты Северо-Восточной Сибири. Материалы совещания работников воднобалансовых (стоковых) станций Гидрометеослужбы СССР, 3-6 августа 1970 года. Изд. ВНИГЛ, Валдай, 1971, с. 142 – 156.
- Кузнецов В. И.* Методика расчета испарения с бассейнов площадью 20 м² по наблюдениям в испарителях ГГИ-3000. Труды ГГИ, вып. 181, 1970, с. 3 – 32.
- Кузьмин П. П.* О расчетном и экспериментальном методах определения испарения со снежного покрова. Труды ЗакНИГМИ, вып.58, 1974, с. 25 – 43.

- Кучмент Л. С.* Модели процессов формирования речного стока. Л., Гидрометеиздат, 1980, 143 с.
- Лавров С. А., Калюжный И. Л.* Влияние климатических изменений на сток весеннего половодья и факторы его формирования в бассейне Волги. Водное хозяйство России, № 6, 2016, с. 42 – 60.
- Лавров С. А., Марков М. Л.* Оценка влияния атмосферного давления на уровень и сток грунтовых вод. Инженерные изыскания. Т. XII, вып. 2, № 11 – 12, 2018, с. 44 – 51.
- Лавров С. А.* Влияние климатических изменений на вертикальный влагообмен в почвах (на примере бассейна реки Волги. Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 4. С. 47 – 66. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-3.
- Лебедев А. Ф.* Почвенные и грунтовые воды. М.– Л., изд. АН СССР, 1936.
- Львович М. И.* К вопросу о внутрипочвенном стоке. В сб.: *О «внутрипочвенном стоке» и его роли в гидрологическом режиме рек и почв.* Л., Гидрометеиздат, 1955, с. 39 – 62.
- Марков М. Л., Гуревич Е. В.* О влиянии ледяного покрова на подземную составляющую речного стока. Гидросфера, Опасные процессы и явления, т. 1, вып. 4, 2019, с. 477 – 489.
- Материалы конференции по проблеме развития теории и методов расчета водных балансов речных бассейнов. -Валдай: Отпеч. на множит, аппарате. ГГИ, 1971, с.263 – 267.
- Материалы наблюдений Нижнедевицкой воднобалансовой станции. Вып. 25, 1985 г., под ред. И. И. Кирюшина, изд. УГМС ЦЧО, Курск, 1986 г., 192 с.
- Методические рекомендации по применению материалов аэрофотосъемок для исследования и расчета характеристик водной эрозии почв. Л., Гидрометеиздат, 1986, 109 с.
- Методические указания управлениям Гидрометслужбы № 48. Организация наблюдений за режимом подземных вод на водосборах. Л., Гидрометеиздат, 1957, 84 с.
- Методические указания управлениям Гидрометслужбы № 52. Организация и производство наблюдений над влажностью почво-грунта на малых водосборах стоковых станций. Л., Гидрометеиздат, 1959, 76 с.
- Методические указания управлениям Гидрометслужбы № 89 Составление водных балансов речных бассейнов. Л., Гидрометеиздат, 1974, 96 с.
- Методические указания. Запас воды в снежном покрове. Методика выполнения измерения авиационным гамма-методом. РД 52.33.179-89. Госкомгидромет, М., 1989.
- Мотовилов Ю. Г., Гельфан А. Н.* Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. Изд. РАН, 2018, 296 с.

- Наблюдения над испарением методом испарителей. Л., изд. ГГИ, 1963, 156 с.
- Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, вып. 2. Агromетеорологические наблюдения на станциях и постах. Часть I. Изд. 2-е. Л., Гидрометеоздат, 1963, 310 с.
- Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 2, ч. 1. Л., Гидрометеоздат, 1969, 128 с.
- Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3, ч. 1. Л., Гидрометеоздат, 1969, 308 с.
- Наставление метеорологическим станциям и постам. Выпуск 3, ч. II, Обработка материалов метеорологических наблюдений. Ленинград, Гидрометеоздат, 1969, 116 с.
- Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 7, ч. II. Наблюдения за испарением с водной поверхности. Л., Гидрометеоздат, 1985, 104 с.
- Наставление гидрометеорологическим станциям и постам», вып. 6, ч. II. Л., Гидрометеоздат, 1972, 266 с.
- Научно-прикладной справочник: Основные гидрологические характеристики рек бассейна Волги [Электронный ресурс]// Коллектив авторов, под ред. Георгиевского В. Ю. Электрон. текстовые и граф. дан. в формате PDF (2 файла: 35 Мб), Ливны, изд. Мухаметов Г. В., 2015.
- Научно-прикладной справочник: Основные гидрологические характеристики водных объектов бассейна реки Дон. СПб, Свое изд., 2021, 262 с.
- Научно-прикладной справочник: Многолетние изменения элементов водного баланса на воднобалансовых и болотных станциях. СПб, ООО «Риал», 2021, 202 с.
- Научно-прикладной справочник: Многолетние изменения испарения на Европейской территории России по данным водноиспарительной сети. ООО «Риал», 2021, 64 с.
- Небольсин С. И., Надеев П. П.* Элементарный поверхностный сток. Л., Гидрометеоздат, 1937.
- Нежиховский Р. А.* Руслонная сеть бассейна и процесс формирования стока воды. Л., Гидрометеоздат, 1971, 475 с.
- Нежиховский Р. А.* Методология гидрологической науки и философия. В сб. статей «Методологические вопросы современной гидрологии». Л., Гидрометеоздат, 1978, с.61 – 71.
- Нежиховский Р. А.* Эмпирическая стадия познания в гидрологии. В сб. статей «Методологические вопросы современной гидрологии». Л., Гидрометеоздат, 1978, с.72 – 98.

- Павлов А. В.* Теплофизика ландшафтов. Новосибирск, «Наука», 1979, 284 с.
- Павлов А. Н.* Геологический круговорот воды на Земле. Л., Недра, 1977, 308 с.
- Панов Б. П.* Элементы морфологии речных систем. Труды ЛГМИ, вып. 3, 1954, с. 12 – 21.
- Поляков Б. В.* Гидрологический анализ и расчеты. Л., Гидрометеиздат, 1946.
- Постников А. Н.* Схема расчета испарения с поверхности почвы в лесостепной и степной зонах ЕТС. Труды ГГИ, вып. 223, 1977, с. 87 – 96.
- Попов А. Н.* Итоги работы воднобалансовых станций и их дальнейшие задачи. Материалы «Конференции по проблеме развития теории и методов расчета водных балансов речных бассейнов», 2 – 4 декабря 1970 г. Изд. ВНИГЛ, Валдай, 1971, с. 5 – 19.
- Попов А. Н.* К вопросу о расчете водных балансов малых водосборов. Материалы «Конференции по проблеме развития теории и методов расчета водных балансов речных бассейнов», 2 – 4 декабря 1970 г. Изд. ВНИГЛ, Валдай, 1971, с. 200 – 210.
- Попов О. В.* Подземное питание рек. Л., Гидрометеиздат, 1968, 291 с.
- Практические рекомендации по расчету гидрологических характеристик в зоне хозяйственного освоения БАМа. Л., Гидрометеиздат, 1986, 180 с.
- РД 52.04.562-96. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, вып. 5, ч. 1. Актинометрические наблюдения. Изд. Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, М., 1997, 221 с.
- РД 52.33.217-99. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 11. Часть 1. Агрометеорологические наблюдения на станциях и постах. Изд. Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. М., 2000, 360 с.
- Р 52.08.657-2004. Рекомендации «Атмосферные осадки. Методика выполнения измерений осадкомером О-1.» СПб, Гидрометеиздат, 2004, 26 с.
- Репрезентативные и экспериментальные бассейны. Международное руководство по исследованиям и практике. Под ред. К. Тоубса и В. Урываева. Л., Гидрометеиздат, 1971, 428 с.
- Решение VII Всероссийского гидрологического съезда. В сб. *VII Всероссийский гидрологический съезд. Пленарные доклады.* СПб, изд. «ЭсПэХа», 2014, с. 220 – 227.
- Романов В. А.* Взгляд на региональную европейскую систему предупреждения о наводнениях с учетом партнерских отношений с ней Российской Федерации. Ученые записки РГГМУ, № 57, 2019, с. 176 – 186.

- Романов В. В.* Внутрипочвенный сток на Тосненской стоковой станции. В сб.: *О «внутрипочвенном стоке» и его роли в гидрологическом режиме рек и почв.* Л., Гидрометеиздат, 1955, с. 31 – 34.
- Руководство по определению агрогидрологических свойств почвы на гидрометстанциях. М., Гидрометеиздат, 1964, 124 с.
- Руководство воднобалансовым станциям. Л., Гидрометеиздат, 1973, 306 с.
- Руководство по гидрологической практике. Т. I. Гидрология: от измерений до гидрологической информации. www.wmo.168_vol_1_ru, 2013, 314 с.
- Руководство по изучению режима и баланса подземных вод в речных бассейнах Международного гидрологического десятилетия. М., Изд. ВСЕГИНГЕО, 1968, 255 с.
- Руководство по определению агрогидрологических свойств почв на гидрометстанциях. Л., Гидрометеиздат, 1985, 85 с.
- Руководство по производству наблюдений над испарением с почвы и снежного покрова. Ч. 1. Наблюдения над испарением методом испарителей. Л., Изд. ГГИ, 1963, 156 с.
- Руководство по теплобалансовым наблюдениям. Л., Гидрометеиздат, 1977, 149 с.
- Руководство стоковым станциям. Л., Гидрометеиздат, 1954, 287 с.
- Соколов А. А., Корзун В. Г. Валериан Андреевич Урываев.* Л., Гидрометеиздат, 1983, 87 с.
- Соколов А. А., Чеботарев А. И.* Очерки развития гидрологии в СССР. Л., Гидрометеиздат, 1970, 310 с.
- Соколов Б. Л.* Новые результаты экспериментальных исследований литогенной составляющей речного стока. Водные ресурсы, т. 23, №3, 1996, с. 278 – 287.
- Соколовский Д. Л.* К вопросу организации стоковых (балансовых) станций. Изв. ГГИ, №59, 1933.
- Соколовский Д. Л., Спенглер О. А.* Программа работ стоковых станций. Тр. НИУ ГУГМС, сер. IV, вып. 39, 1946.
- Соседов И. С.* Методика территориальных воднобалансовых обобщений в горах. «Наука», Алма-Ата, 1976, 154 с.
- Субботин А. И., Дыгало В. С.* Многолетние характеристики гидрометеорологического режима в Подмосковье. (Материалы наблюдений Подмосковной воднобалансовой станции). Часть I. М. Изд. ИПГ, 1982, 158 с.
- Субботин А. И., Дыгало В. С.* Многолетние характеристики гидрометеорологического режима в Подмосковье. (Материалы наблюдений Подмосковной воднобалансовой станции). Часть II. М. Изд. ИПГ, 1982, 162 с.

- Суцанский С. И. Особенности формирования элементов, составляющих водный баланс, в бассейне руч. Морозова (по материалам Колымской ВБС). «Колыма», №1, Магадан, 1999, с. 33 – 40.
- Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л., Гидрометеиздат, 1989, 84 с.
- Урываев В. А. Экспериментальные гидрологические исследования на Валдае. Л., Гидрометеиздат, 1953, 231 с.
- Хлебникова Е. И., Махоткина Е. Л., Салль И. А. Облачность и радиационный режим на территории России: наблюдаемые климатические изменения. Труды ГГО, вып. 573, 2014 г., с. 65 – 91.
- Чеботарев А. И. Гидрологический словарь. Л., Гидрометеиздат, 1978, 308 с.
- Школьник И. М., Мелешко В. П., Кароль И. Л., Киселев А. А., Надеждина Е. Д., Говоркова В. А., Павлова Т. В. Ожидаемые изменения климата на территории Российской Федерации в XXI веке. Труды ГГО, вып. 575, 2014 г., с. 64 – 117.
- Bras R., Eagleson P. S. Hydrology, the forgotten Earth science. EOS, 1987, vol. 68, no. 16, p. 227.
- Braunschweig Declaration. In: *Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins. Proc. of the International Workshop. Eds. A. Herrmann & S. Schumann.* IAHS Publ. 336, p. 305-307.
- Bobrovitskaya N. N., Zubkova C. M., Kokorev A. V. Research Results of Water Discharge and Sediment Yield Studies in the Polomet River. In: *Proceedings of the International Workshop “Experimental Hydrology with Reference to Hydrological Processes in Small Research Basins”, St. Petersburg – Valdai, Russia, 2 – 6 June 1997.* St. Petersburg, 1999, pp. 22 – 30.
- Chorley R. J., Kennedy B. A. Physical Geography. A Systems Approach, London, 1971.
- Edwards K. A., Rodda J. C., 1972, “A preliminary results of the water balance of a small clay catchment”, *Symposium of Wellington: Results of Research on Representative and Experimental Basins*, IAHS Publ. No. 97, 187 – 199.
- Eagleson P.S. Dynamic Hydrology. 1970, New York, McGraw-Hill.
- Eagleson P. S. Opportunities in the hydrologic science. IAHS Newsletter, 1990, no. 40, pp. 3 – 5.
- Flow Regimes from International Experimental and Network Data (FRIEND). Vol. III. Inventory of streamflow generation studies. Ed. by M. Robinson. Institute of Hydrology Publ., Wallingford, 1993, 73 p.
- Herrmann A. Runoff formation process in loose sediment and solid rock catchment systems. Ed. A. Herrmann, *Proc. Workshop “Experimental Hydrology with Reference to Hydrological Processes in Small Research Basins”, St. Petersburg – Valdai, 2 – 6 June, 1997.* St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 1999, 51 – 58.

- Herrmann A.* Isotope hydrological investigations of direct runoff proportions and mean transit times on a small basin scale. *Ed. A. Herrmann, Proc. Workshop "Experimental Hydrology with Reference to Hydrological Processes in Small Research Basins", St. Petersburg – Valdai, 2 – 6 June, 1997.* St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 1999, 116 – 122.
- Herrmann A., Schumann S.* History and present status of small hydrological research basins. *In: Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins. Proc. of the International Workshop. Eds. A. Herrmann & S. Schumann. IAHS Publ. 336, 2010, p. 3 – 10.*
- Hewlett J. D., Lull M. W., Reinhart K. G.,* 1969, "In defense of experimental watersheds", *Water Resources Research*, 5, 306 – 316.
- Hydrological draught processes and estimation methods for streamflow and groundwater. Eds. L. M. Tallaksen & H. A. J. von Lanen. Elsevier, *Developments in Water Science no. 48*, 2004, 579 p.
- Inventory of representative and experimental watershed studies conducted in the United States. - Washington: AGU, 1965. – 153 p.
- IPCC. Climate Change 2007. Solomon S., Qin D., Manning M. (eds.). The Physical Science Basis. Cambridge/New York, Cambridge University Press, 996 p.
- Kane D. L., Yang D.* Overview of water balance determination for high latitude watersheds. *IAHS Publ. 290, 2004, p. 1-12.*
- Lanen H. A., J. von Tallaksen, L. M. Kašparek, L. & Querner E. P.* Hydrological draught analysis in the Hupsel basin using different physically-based models. *In: FRIEND'97 – Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resources Management* (ed. by A. Gustard, S. Blazkova, M. Brilly, S. Demuth, J. Dixon, H. von Lanen, C. Llaasat, S. Mkhani & E. Servat), IAHS Publ. no. 246, 1997, pp. 189 – 196.
- Linsley R. K.* Representative and experimental basins - where next? - *Simp. Hydrol. Charact. of River Basins.* Tokio, IAHS-AIHS, 1975, 23 p.
- Maidment D. R.* Handbook of Hydrology. 1992, New York, McGraw-Hill.
- Methods for water balance computations. An international guide for research and practice. Edited by A. A. Sokolov and T. G. Chapman. UNESCO Press, Paris, 1974, 127 p.
- Morton F. I.* Potential evaporation and river basin evaporation. - *J. Hydraul. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng.*, vol. 91, No HY6, 1965, pp. 67 – 97.
- Motovilov Yu. G., Suchkova K. V.* Modelling the Genetic Components of River Runoff for the Mozhaisk Reservoir Watershed. *Water Resources*, 2018, Vol. 45, Suppl. 1, pp. S135 – S145.

- Munn R.E.* Global Environmental Monitoring System. SCOPE, rep. 3, Toronto, 1973, 130 p.
- Plinlimon Research: The first two decades. Eds. C. Kirby, M. D. Newson and K. Gilman. Report No. 109, Institute of Hydrology Publ., 1991, 188 p.
- Sivapalan M., Blöschl G.* The Growth of Hydrological: Technologies, Ideas, and Societal Needs Shape the Field. *Water Resour. Res.*, 2017, vol. 53, pp. 8137 – 8146.
- Sokolov B. L., Markov M. L.* Unconventional views of surface and ground water interaction in river basins: a preliminary analysis of experimental data. *Ed. A. Herrmann, Proc. Workshop “Experimental Hydrology with Reference to Hydrological Processes in Small Research Basins”, St.Petersburg – Valdai, 2 – 6 June, 1997, St.Petersburg, Gidrometeoizdat, 1999, 81 – 87.*
- Vinogradov Yu.* Mathematical Modelling and Experiment in River Runoff Problem. *Ed. A. Herrmann, Proc. Workshop “Experimental Hydrology with Reference to Hydrological Processes in Small Research Basins”, St.Petersburg – Valdai, 2 – 6 June, 1997, St.Petersburg, Gidrometeoizdat, 1999, 59 – 63.*
- Warmerdam P. M. M., Stricker J. N. M.* Fundamental hydrological research drawn from studies in small catchments. In: *Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins* (ed. by A. Herrmann & S. Schumann), IAHS Publ. No. 336, 47 - 53.
- Water Balance Maps for the Territory of Central and Eastern Europe. Eds. T. Puskas et al., Budapest, 1984, 88 p.
- Zhuravin S. A.* Change of hydrological regimes over the central part of European Russia resulting from climate variations. In: *FRIEND 2002 – Regional Hydrology: Bridging the Gap between Research and Practice* (eds. H. A. J. van Lanen & S. Demuth), IAHS Publ. No.274, 441 – 448.
- Zhuravin S. A., Markov M. L.* Development of studies in small research basins in Russia and the most recent tasks. In: *Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins* (eds. A. Herrmann & S. Schumann), IAHS Publ. No.336, 219 – 224.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
Введение	6
Глава I. История развития сети воднобалансовых станций, основные цели и задачи, принципы организации и особенности производства наблюдений	10
1.1 История развития сети воднобалансовых станций.....	10
1.2 Цели и задачи воднобалансовых станций.....	20
1.3 Принципы организации сети воднобалансовых станций	22
1.4 Принципы организации воднобалансовых станций и программы наблюдений на них	26
1.4.1 Выбор и структурная организация бассейнов	26
1.4.2 Программа работ воднобалансовых станций	32
1.4.3 Размещение пунктов наблюдений на ВБС, методы и средства измерений	33
1.5 О модернизации на воднобалансовых станциях.....	63
1.6 Комплектование персонала	66
Глава II. Результаты мониторинга многолетних изменения влагооборота по данным наблюдений воднобалансовых станций.....	68
2.1 Общие положения	68
2.2 Изменения основных климатических характеристик на воднобалансовых станциях	72
2.3 Изменения режима элементов водного баланса и определяющих их факторов	81
2.3.1 Изменения испарения с поверхности почвы и вод.....	82
2.3.2 Запасы влаги в почве	85
2.3.3 Промерзание почво-грунтов	89
2.3.4 Изменение уровней и запасов грунтовых вод	92
2.3.5 Оценка изменения режима стока воды на водотоках на воднобалансовых станциях	98
2.4 Переходный период в перестройке системы влагооборота водосборов	114
Глава III. Примеры расчета водного баланса малых водосборов воднобалансовых станций	127
3.1 Водный баланс малых водосборов	127
3.1.1 Гидрологический год	129
3.1.2 Примеры расчета водного баланса малых водосборов воднобалансовых станций	129
Глава IV. Актуальность развития и приоритетные направления экспериментальных гидрологических исследований на репрезентативных водосборах воднобалансовых станций	182
4.1 Математическое моделирование, экспериментальная гидрология и недостаточно изученные процессы формирования стока	183
4.2 Взаимодействие поверхностных и подземных вод по экспериментальным данным	191
4.2.1 Склоновый сток и «действующая» площадь водосбора	191
4.2.2 Зона аэрации и грунтовые воды верхнего водоносного горизонта	195
4.2.3 Береговое регулирование	203
4.2.4 Выводы и предложения	204
Заключение	209
Литература	211