

ВОДНЫЙ БАЛАНС МАЛЫХ ВОДОСБОРНЫХ БАССЕЙНОВ И ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ В РАЙОНЕ УЧАСТКА «ЕНИСЕЙСКИЙ» (НИЖНЕКАНСКИЙ МАССИВ, ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ)

С. А. Иноземцев, К. В. Владимиров, А. А. Шварц, В. Г. Румынин, А. М. Никуленков

Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, Санкт-Петербург

Статья поступила в редакцию 26 сентября 2024 г.

В статье представлены результаты шестилетних режимных воднобалансовых наблюдений на водосборных бассейнах малых водотоков в районе участка «Енисейский». Выполнен анализ особенностей режима атмосферных осадков территории, рассматриваемых как приходная статья водного баланса. Представлены характеристики гидрологического режима четырех водотоков для каждой фазы его цикла. Обсуждаются возможности выделения компоненты подземного стока на основании величин невязок водного баланса, расчленения гидрографов стока, средних расходов воды в фазу зимней межени и уровня режима подземных вод в зоне активного водообмена.

Ключевые слова: *малые реки, водосборный бассейн, водный баланс, атмосферные осадки, речной сток, эвапотранспирация, инфильтрация, гидрограф реки, Нижнеканский массив, Енисейский кряж, радиоактивные отходы.*

Введение

Исследование динамики элементов водного баланса территорий расположения объектов использования атомной энергии, к которым относится, в частности, планируемый пункт геологической изоляции РАО 1 и 2 классов в Нижнеканском массиве (Красноярский край, участок «Енисейский»), является одним из наиболее важных направлений изучения факторов окружающей среды на стадии проектирования объекта. Выделение компоненты подземного стока (инфильтрационного питания подземных вод) в общем водообмене, наряду с определением фильтрационного строения массива, необходимо для расчета миграции радионуклидов в подземной гидросфере в эксплуатационный и постэксплуатационный периоды, т. е. для

оценки долговременной безопасности объекта. На стадиях строительства и эксплуатации данная характеристика во многом контролирует величину водопритока в горные выработки и эффективность дренажных мероприятий. Наконец, достоверное прогнозирование воздействия строительных работ и эксплуатации объекта на состояние поверхностных и подземных вод региона также требует надежного определения всех статей водного баланса. В частности, накопленные режимные метеорологические и гидрологические данные будут необходимы для оценки последствий нормальной эксплуатации пункта глубинного захоронения РАО, разрабатываемых в соответствии с требованиями РБ-003-21 [1].

Воднобалансовые данные становятся особенно важными для оценки долговременной безопасности [2], если учитывать неустойчивость современного климата Земли, которая приводит к изменчивости гидрологического режима. Так, например, многолетние наблюдения на воднобалансовых станциях показывают, как общие климатические изменения сказываются на влагообороте водосборов малых рек, приводя к нестационарности в многолетних рядах стока [3]. Изменения процессов влагооборота наблюдаются на Европейской территории России, в южной тайге Западной Сибири [4], [5], в Прибайкалье [6]. Отдельные наблюдения и моделирование гидрологических условий показывают значительное уменьшение поверхностного стока, вероятное увеличение инфильтрации на водосборных бассейнах малых водотоков и прогнозируют возрастание эвапотранспирации в таежной зоне [7], [8]. Несомненно, изменения влагооборота будут проявляться и в районе Нижнеканского массива. Однако для выявления местных особенностей, современных и прогнозируемых изменений требуются конкретные данные, полученные при локальных режимных воднобалансовых наблюдениях.

Метод исследования водного баланса широко распространен в мировой практике и при его последовательном многолетнем применении позволяет наиболее полно понять процессы водообмена выбранной территории [9]. Его расчет является количественным выражением закона сохранения вещества [10], [11] и может успешно применяться на разных масштабных уровнях [6], [12]. В рамках исследований, обсуждаемых в данной статье, единицей воднобалансовых наблюдений выступает водосборный бассейн — участок земной поверхности, на котором происходит цикл трансформации атмосферных осадков в другие элементы водного баланса [10]. При этом на малых бассейнах в южно-таежных ландшафтах высока неоднородность локальных факторов перераспределения стока. Такие факторы, как неоднородность растительного покрова, степень хозяйственного освоения территории, в сочетании с геоморфологическими условиями водосбора, оказывают значительное влияние на итоговые величины годового объема поверхностного стока, измеряемого на замыкающем гидрологическом створе. Это соображение не позволяет делать прогноз только по данным какого-то одного малого бассейна, поэтому режимными наблюдениями были охвачены четыре водосбора.

Таким образом, представленные в статье результаты имеют одновременно важный прикладной

и научный аспекты. Первый из них связан с тем, что водный баланс локальной территории позволяет более точно оценить величину инфильтрации воды в горизонты грунтовых вод, поэтому полученные результаты нужно учитывать при прогнозировании долговременной безопасности ПЗРО. Научный аспект связан с тем, что для территории юга Центральной Сибири существует относительно немного примеров многолетних наблюдений водного баланса на водосборах малых рек и ручьев.

Исходя из сказанного выше, целью представляемых в статье работ было выявление годовой и многолетней динамики приходных и расходных статей водного баланса четырех водосборных бассейнов на основании режимных метеорологических и гидрологических наблюдений. Реализация поставленной задачи потребовала выполнения большого комплекса полевых работ, а также привлечения различных расчетных методик, в частности математического моделирования гидрологического режима водных объектов.

Объекты и методы

Объекты. Территория исследований расположена на западном склоне Атамановского хребта, который входит в состав южной Ангаро-Канской оконечности Енисейского кряжа. С точки зрения физико-географического и геоморфологического районирования эта область относится к Среднесибирской провинции пластово-денудационных плоскогорий [13], а Енисейский кряж выделяется как одна из семи областей этой физико-географической провинции. Ее западной границей является долина р. Енисей. Южнее Енисейского кряжа находится Канско-Рыбинская межгорная равнина, а еще южнее начинаются предгорья Восточного Саяна. Западнее, на левом берегу р. Енисей, расположена южная провинция аккумулятивных и денудационных равнин Западно-Сибирской низменности. Таким образом, в физико-географическом и геоморфологическом отношении территория исследований занимает пограничную позицию между тремя различными ландшафтно-геоморфологическими территориями.

Наблюдаемые водные объекты представлены четырьмя малыми реками и ручьями, которые входят в состав общего водосборного бассейна р. Енисей (рис. 1) и стекают по западному макросклону Атамановского хребта. На каждом водотоке установлены гидрологические посты от ГП-1 до ГП-5 (рис. 1), положение которых определяет площади наблюдаемых водосборов.

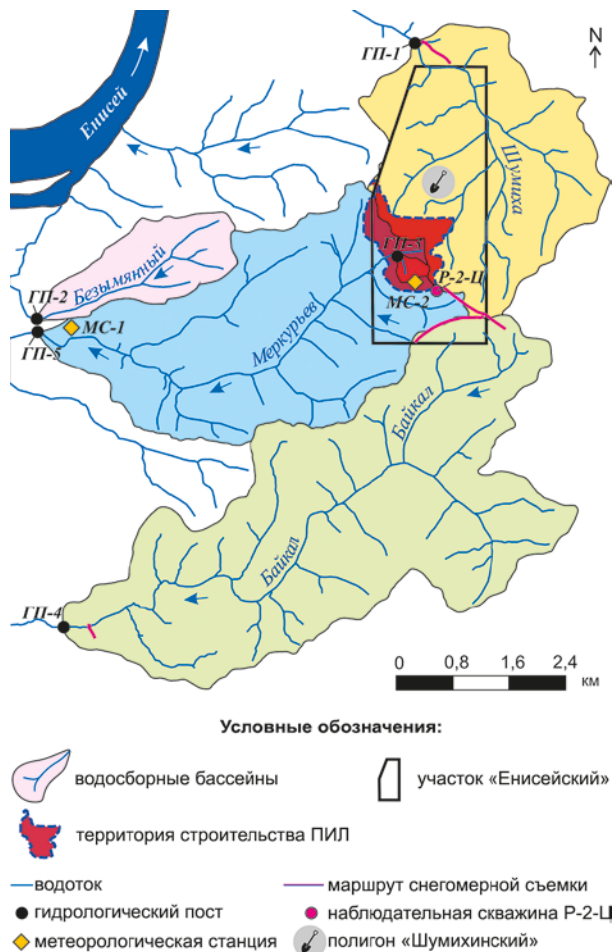


Рис. 1. Схема территории режимных воднобалансовых наблюдений

Расчет их морфометрических характеристик выполнялся на основе общедоступных цифровых моделей рельефа (ЦРМ) — SRTM, ASTER GDEM и ALOS [14], [15], [16]. Минимальный водосбор размером 0,13 км² замыкается гидрологическим постом ГП-3 и расположен в верховье ручья Меркурьев (рис. 1). Остальные посты замыкают водосборы площадью от 2,4 км² — на ручье Безымянный и до 18,3 км² — на р. Байкал (рис. 1). Наиболее контрастные морфометрические отличия проявляются между водосборными бассейнами р. Шумиха (гидропост ГП-1) и р. Байкал (гидропост ГП-4). Длина водосбора р. Шумиха составляет 4,1 км, а р. Байкал достигает 8 км. При примерно одинаковой средней ширине водосборов — 2,2 км, они резко отличаются формой: на р. Байкал — он более протяженный, что количественно выражается в значении коэффициента вытянутости, который для р. Шумиха составляет 1,8, а для р. Байкал — 3,5 [17].

Кроме режимных воднобалансовых наблюдений, проводилось детальное изучение поверхностного стока и динамики влажности грунтов в зоне аэрации (в верхней части зоны активного

водообмена). Для этой цели был организован гидрологический полигон «Шумихинский», расположенный в пределах водосбора гидропоста ГП-1 на р. Шумиха (рис. 1).

С гидрогеологической точки зрения участок «Енисейский» расположен в пределах Ангаро-Канского гидрогеологического массива трещинно-грунтовых вод, занимающего южную часть Енисейского края [18]. Участок находится в приводораздельной части междуречья р. Енисей и р. Кан (реки первого порядка), поэтому здесь выделяется основная зона питания подземных вод, формирующая региональный поток в указанные водотоки [19]. Для воднобалансовых исследований важно, что локальные потоки (до глубин 150–200 м) контролируются мезорельефом и разгружаются в водотоки второго и третьего порядка. На это указывает пространственное распределение уровней подземных вод, которое четко соотносится с высотами рельефа [19], [20]. Верхнюю часть гидрогеологического разреза в районе участка «Енисейский» составляет локально обводненный горизонт четвертичных покровных отложений, распространенный с поверхности до максимальной глубины 31,3 м при средней мощности около 10 м. В массиве коренных пород, залегающем ниже четвертичных отложений, до глубин 50–150 м выделяется водоносная толща, приуроченная к зоне экзогенной трещиноватости раннеархейских пород. Ее фильтрационные свойства варьируют в широком диапазоне — от 0,0002 до 1,58 м/сут. В интервале глубин 150–700 м преобладающими являются водонепроницаемые гнейсы, кристаллические сланцы, а также дайки метадолеритов, долеритов и габбро-диабазов с коэффициентами фильтрации до 0,005 м/сут [21]. Систематические режимные наблюдения за подземными водами в районе участка «Енисейский» ведутся с 2017 г. [22].

Методы. В рамках обсуждаемых работ применяется методика воднобалансовых режимных наблюдений, объединяющая полевые и расчетные методы. Поскольку с точки зрения долговременной безопасности воднобалансовые наблюдения необходимы для оценки слоя инфильтрации, то уравнение водного баланса можно записать следующим образом:

$$\Delta = (P_r + P_s) - Q - ET,$$

$$Q = Q_{sf} + Q_{bf},$$

$$\Delta = \Delta M_{sw} + \Delta G_{gw},$$

где Δ — невязка, или остаточный член воднобалансового уравнения, мм; ΔM_{sw} — изменение

запасов влаги в верхнем слое почво-грунтов, мм; ΔG_{gw} — изменение запасов влаги в водоносных горизонтах, дренируемых рекой, мм; P_r — годовая сумма жидких атмосферных осадков, выпавших в теплый период с апреля по октябрь, мм; P_s — годовая сумма твердых атмосферных осадков, выпавших в холодный период с ноября по март, мм; Q — годовой слой речного стока, измеренный на замыкающем гидропосту, мм; Q_{sf} — годовой слой быстрого поверхностного стока в составе речного стока, мм; Q_{bf} — годовой слой базового (почвенно-грунтового) стока в речном стоке, мм; ET — годовой слой эвапотранспирации, мм. Все статьи водного баланса выражаются в миллиметрах и вычисляются как средние для каждого водосбора [23]. Расчеты водного баланса выполнялись для гидрологического года, за начало которого принята дата 1 октября, поскольку гидрологический год начинается с началом осенней межени и включает все фазы гидрологического цикла водотока.

Таким образом, уравнение водного баланса состоит из приходной части, образуемой твердыми и жидкими атмосферными осадками ($P_s + P_r$), и суммы расходных статей поверхностного стока (Q) и эвапотранспирации (ET). Поэтому режимные наблюдения сочетали метеорологические наблюдения для определения приходной статьи баланса, гидрологические для определения слоя поверхностного стока и расчетные методы для вычисления годового слоя эвапотранспирации. Невязка, или остаточный член балансового уравнения Δ , представляет собой разность между приходной и расходной статьями водного баланса. Эта величина может быть положительной, и тогда Δ — суммарный слой воды, который пошел на пополнение запасов почвенных вод и инфильтрацию в грунтовые воды. Невязка может быть и отрицательной в случае превышения расходных статей баланса над слоем выпавших за год атмосферных осадков. Во втором случае ее величина определяет слой сработки запасов влаги в почвенно-грунтовой толще, которая обеспечила поверхностный сток.

Режимные наблюдения за динамикой метеорологических показателей выполнялись с использованием двух автоматических метеорологических станций МС-1 и МС-2 (рис. 1). Первая расположена в нижней части водосбора руч. Меркурьев, а вторая — на общем водоразделе р. Шумиха, руч. Меркурьев и р. Байкал. Обе станции позволяли проводить постоянные наблюдения за следующими показателями: температура атмосферного воздуха, относительная влажность, атмосферное давление, направление и скорость ветра, количество и интенсивность

жидких атмосферных осадков. Слой твердых атмосферных осадков, выпавших за период отрицательных температур с ноября по март, определялся отдельно. Для этого каждый год в конце марта выполнялись маршрутные снегомерные съемки (рис. 1). Значение влагозапасов в снеге в миллиметрах воды, измеренное на последнюю декаду марта, учитывалось в водном балансе как сумма твердых осадков за холодный период года.

Гидрологические наблюдения выполнялись на пяти постах (рис. 1 и рис. 2Б, Г) и включали в себя измерения уровней воды с частотой до 1 раза в 30 минут при свободном русле, измерения расходов воды (далее ИРВ) на каждом гидропосту (рис. 2А, В) и некоторых ее физико-химических показателей (рН, Eh, электропроводность). На основании этих данных выполнялся расчет срочных суточных объемов стока и его годового объема. Поскольку в зимнее время русло всех водотоков покрывается льдом, то вычисления велись отдельно для открытого установившегося потока и для затрудненного стока в этот период. Для свободного русла строилась кривая расходов, выражающая соотношение расходов воды и уровней, а также уравнение регрессии, аппроксимирующее их связь [24]. Для расчета



Рис. 2. Гидрологические наблюдения: А — измерение расхода воды в конце зимней межени на р. Байкал; Б — общий вид гидропоста ГП-5 на руч. Меркурьев; В — измерение расхода воды на ГП-1, р. Шумиха; Г — общий вид гидропоста ГП-2, руч. Безымянный

стока при неустановившемся потоке и затрудненном стоке в зимний период применялась линейная интерполяция между значениями ИРВ и математическое гидрологическое моделирование стока.

С точки зрения обоснования и прогноза величин инфильтрации важно проанализировать, какую долю в годовом объеме поверхностного стока, зафиксированном на гидропосту, составляет вода, двигавшаяся непосредственно по поверхности водосборного бассейна, и вода, которая сначала профильтровалась в почвенно-грунтовую толщу, а затем достигла русла водотока. Первый путь принято называть быстрым стоком, а второй — базовым. Для выявления годовых объемов этих двух видов стока выполнялось расчленение годового гидрографа. Такой анализ проводился двумя методами: Куделина [25], [26] и Лайна — Холлика [27], которые отличаются прежде всего по тому, как выделяется базовая составляющая стока в фазу половодья и в эпизоды дождевых паводков. Также для оценки базовой составляющей стока выполнялись наблюдения уровней грунтовых вод в скважине Р-2-Ц. Эта скважина имеет глубину 200 м и расположена в водораздельной части бассейнов р. Байкал, Шумиха и руч. Меркурьев (рис. 1). Ее конструкция позволяла наблюдать естественную внутригодовую динамику уровней грунтовых вод в зоне активного водообмена. На основании таких наблюдений вычислялась величина инфильтрационного питания подземных вод на водораздельной части территории.

Эвапотранспирация представляет собой наиболее трудно измеряемый элемент водного баланса. К настоящему времени разработаны ряд методов расчета эвапотранспирации [28]. С некоторой долей условности все расчетные методы разделяют на воднобалансовые, эмпирические и микроклиматические [29]. Воднобалансовые методы подразумевают расчет эвапотранспирации как разности всех известных статей водного баланса. Такой подход в данном исследовании не применялся, так как одной из задач работ было именно определение разности (невязки) статей водного баланса. Для расчета годового водного баланса использовались эмпирические и микроклиматические методы. Эвапотранспирация рассчитывалась на основании шести методов, затем полученные значения сравнивались со средними величинами и подбирались величина, дающая минимальную невязку баланса [28]. Для расчетов применялись уравнения Тюрка, Ольденкопа, Постникова и Харгрейвса, в основе которых лежат эмпирические соотношения между реальной

эвапотранспирацией и годовой величиной испаряемости, которая в этих подходах зависит только от средней годовой температуры воздуха. Методы Пенмана — Монтейта и Пристли — Тейлора относят к микроклиматическим методам расчета. Уравнение Пенмана — Монтейта в модификации ФАО-56 является, возможно, наиболее детальным и при этом относительно легким для вычислений. Это уравнение описывает связь между эталонной эвапотранспирацией с покрытой растительностью поверхностью почвы и такими микроклиматическими величинами, как отраженная солнечная радиация, скорость ветра на высоте 2 м, температура воздуха, дефицит влажности [30]. Большинство требуемых параметров измеряются непосредственно на метеостанциях МС-1 и МС-2 в районе участка «Енисейский», что позволяет считать данный метод наиболее точным. Метод Пристли — Тейлора близок к методу Пенмана — Монтейта, так как тоже основан на уравнении Пенмана, но не учитывает аэродинамические параметры в явном виде [31]. Выполненные расчеты показали, что для каждого воднобалансового года либо метод Пенмана — Монтейта, либо метод Пристли — Тейлора позволяли вычислить такую величину эвапотранспирации, которая приводила к наименьшей невязке водного баланса.

Результаты

Жидкие и твердые атмосферные осадки представляют собой единственную приходную статью водного баланса исследуемой территории, поскольку в области водосборов явно отсутствуют инженерные мероприятия, такие как переброска воды из других водосборных бассейнов и полив. Предполагается также, что линии поверхностного и подземного водоразделов совпадают по крайней мере в верхней части гидрогеологического разреза, то есть в зоне активного водообмена. Это предположение важно для водобалансовых работ, так как влага из зоны активного водообмена формирует базовую часть поверхностного стока. За шестилетний период наблюдений годовая сумма осадков менялась от 488 мм в 2021 г. до 763 мм в 2020 г. Всего был зафиксирован 621 день с дождем. Наибольшее количество осадков наблюдалось в июне и июле, так максимальный показатель в июне 2020 г. составил 169,8 мм. Это говорит о том, что в отдельные годы месячная сумма осадков может быть сравнимой с влагозапасом в снежном покрове, который формирует фазу половодья. За все время режимных наблюдений годовые объемы атмосферных осадков на исследуемой территории

были всегда выше справочных: Сухобузимская (373 мм), Красноярск, опытное поле (454 мм), Уяр (425 мм) [32]. Очевидно, это можно связывать с расположением территории воднобалансовых наблюдений на западном макросклоне Енисейского кряжа, а поскольку в районе преобладают юго-западные ветра, то именно он получает большее количество осадков.

Из всех дождливых дней 448, то есть почти 72%, характеризовались суточной суммой осадков в диапазоне от 0,25 до 5 мм. При этом суточный слой эвапотранспирации, по результатам моделирования, в летние месяцы может меняться от 0,5 до 5 мм, а в отдельные дни — до 6–7 мм. Таким образом, в летне-осеннюю межень суточные осадки менее 5 мм могут почти полностью расходоваться на эвапотранспирацию. В этих условиях интенсивность дождевого события и часть суток, когда оно произошло, становятся важными факторами, определяющими формирование волны дождевого паводка на водотоках и фильтрацию порции влаги в почвенно-грунтовую толщу. Хорошим примером такой динамики влагооборота послужило лето 2022 г., когда при большом количестве дождей дождевые паводки формировались редко (рис. 3). На графике хорошо видно, как при частых дождях среднесуточные расходы продолжают снижаться до меженных значений, а паводки формируются только начиная с середины августа в ответ на большой слой выпавших осадков.

Влагозапасы в твердых осадках, накопленные к концу марта в снежном покрове, за период наблюдений менялись от минимума в 116 мм в марте 2022 г. до максимума — 181 мм в марте 2021 г. Таким образом, от 16% до 37% в суммарном количестве осадков за гидрологический год составляют твердые осадки. При этом процесс инфильтрации влаги в зону активного водообмена демонстрирует зависимость от величины влагозапасов в снежном покрове. Уровни грунтовых вод в зоне активного водообмена на водоразделе резко возрастают в конце апреля и начале мая в ответ на таяние снега, что видно по графику уровней в скважине Р-2-Ц (рис. 4). Расчет по методике [33] показывает, что слой инфильтрации в результате таяния снега варьировал от 69 до 106 мм со средней за шесть лет величиной 88 мм (рис. 4), то есть за счет этого может формироваться от 68% до 90% годового слоя инфильтрации. Затем эта инфильтрационная влага делится на две части. Большая из них дренируется и расходуется на поверхностный сток, составляя базовую часть в фазы летне-осенней и зимней межени. Другая часть идет на пополнение запасов грунтовых вод. После окончания снеготаяния, в летне-осеннюю межень, могут наблюдаться кратковременные подъемы уровней грунтовых вод, вызванные наиболее крупными дождями (рис. 4), а незначительные по объему дожди не приводят к инфильтрации из-за интенсивной эвапотранспирации.

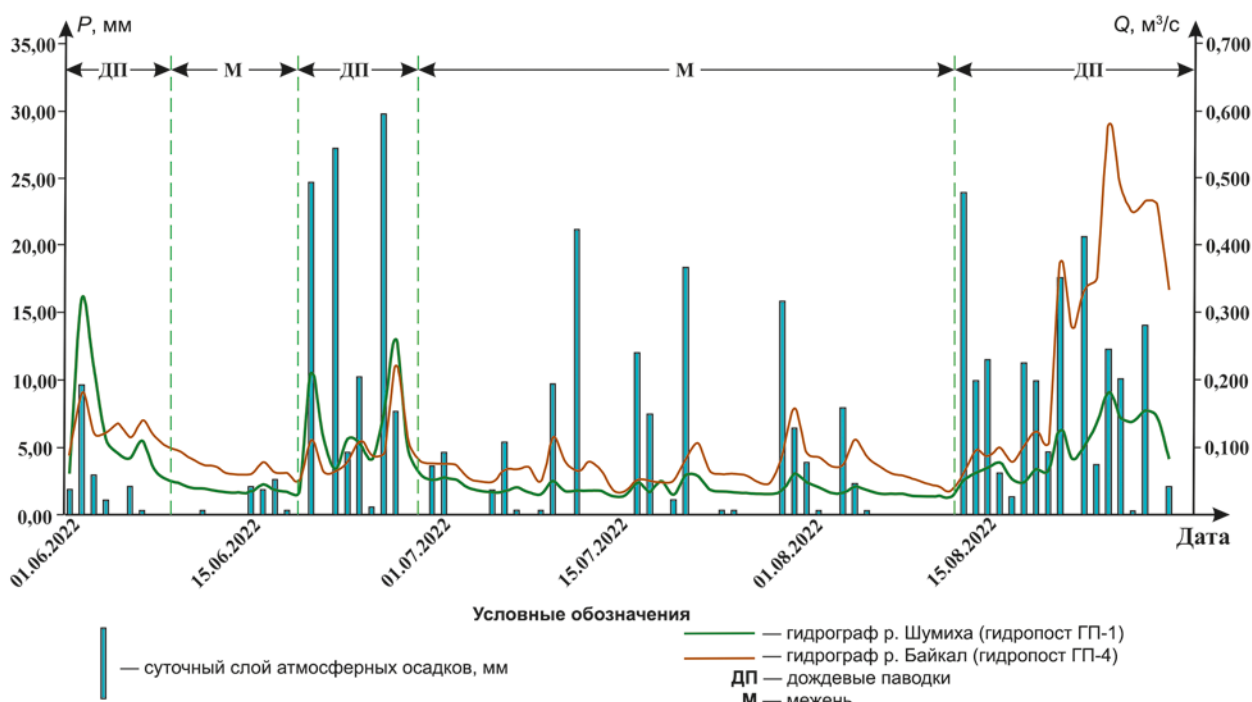
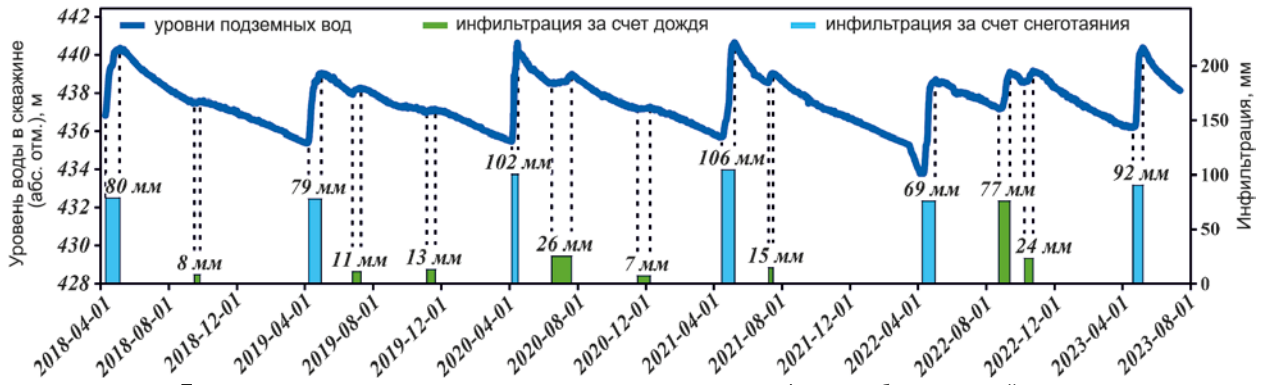


Рис. 3. Динамика летних атмосферных осадков и гидрографы стока двух основных водотоков территории наблюдений, 2022 г.



Примечание: пунктирными линиями показаны интервалы на графике колебания уровней воды, отвечающие временным интервалам поступления инфильтрации на уровень грунтовых вод

Рис. 4. Уровненный режим в скважине Р-2-Ц и рассчитанные по [33] слои инфильтрации

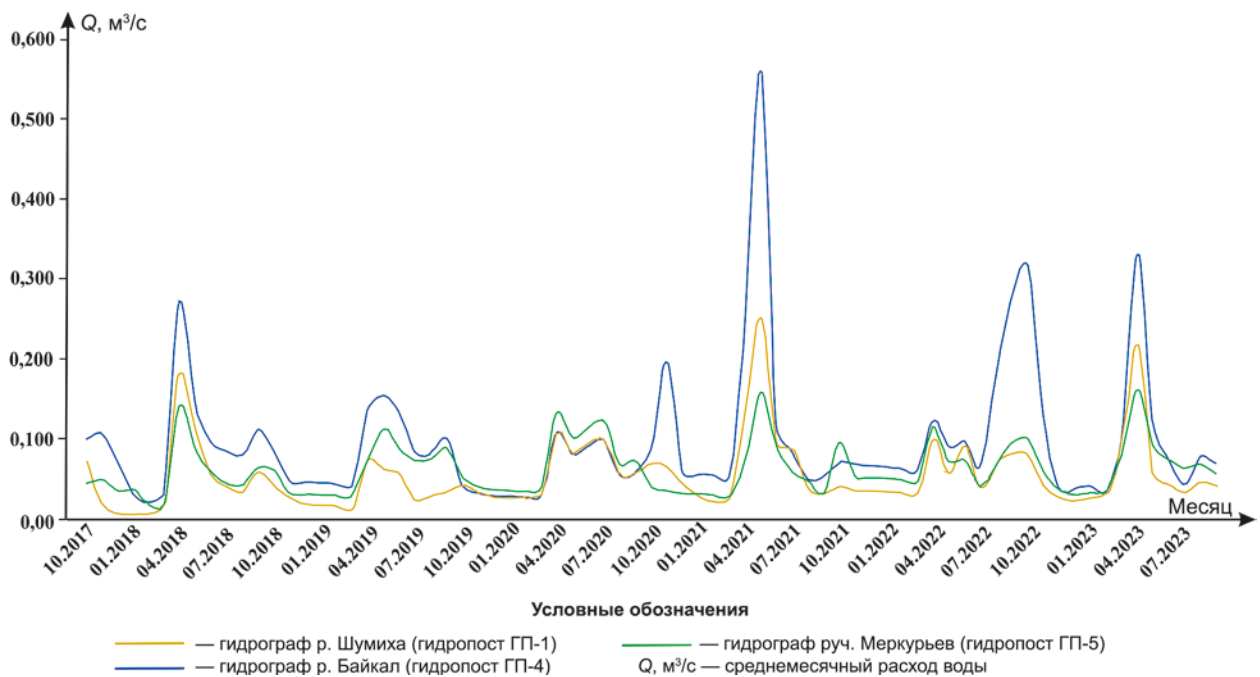


Рис. 5. Гидрографы водотоков на трех гидрологических постах за шестилетний период

В силу того, что на территории исследований в настоящее время отсутствует водозабор поверхностных и грунтовых вод, расходными статьями водного баланса являются поверхностный сток и эвапотранспирация. Режим исследованных водотоков имеет вполне отчетливые внутригодовые фазы — осенне-зимнюю межень, весеннее половодье, весенне-летне-осеннюю межень с дождевыми паводками (рис. 5).

Фаза осенне-зимней межени начинается в октябре, когда происходит постепенное снижение уровней и расходов воды (табл. 1), которое может прерываться некоторым количеством дождевых или талых паводков. Так, максимальный осенний ИРВ наблюдался на р. Байкал 13 октября 2022 г. Величина расхода воды составила 0,3007 м³/с и была связана с выпадением дождей 12 и 13 октября, которые имели

сравнительно небольшой объем — суммарно за два дня 12,2 мм осадков. Это событие иллюстрирует ситуацию, когда при уже низких температурах воздуха минимальное количество воды расходуется на эвапотранспирацию и даже небольшие осадки вызывают большой объем дождевого паводка.

На исследованных водотоках поверхностный сток не прерывается в зимнее время. Даже на водосборе с минимальной площадью в верховьях руч. Меркурьев в этот период он существует с расходами от 0,00019 до 0,00070 м³/с. Ледовый покров на водотоках устанавливался в первой декаде ноября или реже — в последней трети октября. Полностью от льда русло освобождалось в первой или второй декаде мая и, таким образом, ледовые явления продолжались от 152 до 187 дней.

Таблица 1. Средние за шестилетний период (2017–2023 гг.) показатели поверхностного стока по месяцам

Месяц	ГП-1		ГП-2		ГП-3		ГП-4		ГП-5	
	$Q_{m,mean}^*$ м ³ /с	$Q_{m,max}^*$ м ³ /с	$Q_{m,mean}^*$ м ³ /с	$Q_{m,max}^*$ м ³ /с	$Q_{m,mean}^*$ м ³ /с	$Q_{m,max}^*$ м ³ /с	$Q_{m,mean}^*$ м ³ /с	$Q_{m,max}^*$ м ³ /с	$Q_{m,mean}^*$ м ³ /с	$Q_{m,max}^*$ м ³ /с
10	0,0574	0,2360	0,0062	0,0556	0,0008	0,0057	0,1168	0,5171	0,0654	0,2565
11	0,0371	0,1834	0,0077	0,0154	0,0003	0,0004	0,0969	1,0293	0,0449	0,2090
12	0,0262	0,0543	0,0071	0,0085	0,0002	0,0003	0,0511	0,0880	0,0373	0,0527
01	0,0224	0,0343	0,0060	0,0082	0,0001	0,0005	0,0439	0,0654	0,0355	0,0511
02	0,0214	0,0396	0,0059	0,0107	0,0004	0,0008	0,0418	0,0634	0,0327	0,0495
03	0,0259	0,0581	0,0063	0,0371	0,0005	0,0013	0,0426	0,0616	0,0329	0,0724
04	0,1130	0,8960	0,0289	0,2013	0,0024	0,0094	0,1637	1,7889	0,1029	0,4779
05	0,1306	0,8083	0,0107	0,1052	0,0021	0,0051	0,2264	1,7918	0,1156	0,4851
06	0,0749	0,4590	0,0118	0,0614	0,0010	0,0041	0,1090	0,9853	0,0862	0,4527
07	0,0552	1,2098	0,0125	0,1615	0,0017	0,0450	0,0819	0,5982	0,0695	0,7448
08	0,0437	0,1828	0,0087	0,0247	0,0011	0,0043	0,0827	0,5804	0,0605	0,1920
09	0,0520	0,4044	0,0092	0,0256	0,0010	0,0045	0,1139	0,6877	0,0705	0,2352

* $Q_{m,mean}$ – средний за шесть лет месячный расход воды; $Q_{m,max}$ – максимальный суточный за шесть лет расход воды в данном месяце.

Следует отметить, что измерения стока в течение осенне-зимней межени дают максимально важную информацию для гидрогеологического моделирования и обоснования величин инфильтрации в силу того, что в эту фазу он весь формируется грунтовыми водами. При этом реализация этих измерений является наиболее трудоемким процессом из-за отрицательных температур воздуха и формирования наледи. Для анализа меженного зимнего стока важную роль играет гидрологическое математическое моделирование.

Накопленные режимные данные показывают, что расходы воды на всех водотоках, как правило, линейно снижаются от октября к концу декабря и, по-видимому, достигают минимальных годовых значений в январе (табл. 1). Например, на ГП-1 минимальный ИРВ составил 0,0196 м³/с и был зафиксирован 22 декабря. Среднесуточные расходы на р. Шумиха варьировали от 0,018 до 0,0343 м³/с и от 0,021 до 0,0654 м³/с на р. Байкал (табл. 1).

За шестилетний период наблюдений осенне-зимняя межень чаще заканчивалась в третьей, а в отдельные годы во второй декаде апреля. При этом наибольший паводок наступал почти в одно время, между 23 и 30 апреля. Абсолютные максимумы ИРВ половодья за время измерений были зафиксированы 29 апреля 2021 г. В этот день на р. Шумиха ИРВ составил 0,9685 м³/с, на р. Байкал — 2,1298 м³/с, а на руч. Меркурьев — 0,489 м³/с. Среднесуточные расходы воды варьировали от 0,031 до 0,8960 м³/с на р. Шумиха

и от 0,0385 до 1,7889 м³/с — на р. Байкал. Фаза половодья за период режимных наблюдений заканчивалась в первой декаде мая, а в отдельные годы оно могло продолжаться до 15—16 мая. При его длинной растянутой фазе на талый сток накладываются отдельные дождевые паводки. Таким образом, в мае происходит постепенный спад его объемов, и, не позднее второй декады мая, на водотоках наступает летне-осенняя межень (табл. 1). Минимальный сток устанавливается, как правило, в последней трети июля и продолжается до первой декады сентября. Эта общая картина может меняться в зависимости от количества и интенсивности дождевых паводков. Можно отметить, что отдельные дождевые паводки характеризуются расходами воды, сравнимыми с расходами половодья. Так, например, на р. Шумиха 10 июля 2021 г. зафиксирован ИРВ, равный 0,6078 м³/с, а среднесуточный расход 7 июля 2021 достиг 1,2098 м³/с. Среднесуточные меженные расходы в конце июля, августе и начале сентября могут опускаться до величин, сравнимых с расходами зимней межени. Так, например, в конце августа 2023 г. на р. Шумиха они опускались до 0,0264 м³/с, а на р. Байкал — до 0,0242 м³/с.

Эвапотранспирация с поверхности каждого водораздела зависит от большого числа факторов, среди которых наиболее значимыми являются влажность поверхностного слоя почвогрунтов, фаза развития и состояние растительности, метеорологические факторы и прежде всего — среднесуточная температура воздуха,

определяющая величину потенциального испарения. За шестилетний период годовая эвапотранспирация менялась от 321 до 535 мм. Ее максимальная величина рассчитана для 2020 г. при наибольшей за гидрологический год сумме атмосферных осадков.

Обсуждение

Результаты режимных метеорологических и гидрологических наблюдений позволили более обоснованно обсуждать величины инфильтрации воды в районе участка «Енисейский». Ежегодный слой инфильтрации можно оценить по величине невязки водного баланса, по слою базового стока на основании срезки годового гидрографа, а также по величинам модулей стока, рассчитанным для межлетнего зимнего периода. Для каждого водосборного бассейна были рассчитаны годовые водные балансы, а затем средние балансы за шестилетний период (табл. 2). Результаты показывают, что каждый годовой водный баланс имеет некоторую величину невязки Δ , которая фактически описывает годовое изменение влагозапасов в пределах водосборного бассейна (табл. 2). Для самых малых водосборов, руч. Безымянный и верховья руч. Меркурьев, в величину невязки Δ входят еще некоторые потери воды из-за неполного дренирования грунтовых вод водотоком. В результате межгодовая изменчивость невязок баланса на таких водосборах значительно больше. Годовые величины невязок баланса водосборов р. Шумиха, р. Байкал и руч. Меркурьев за шестилетний период менялись в широких пределах: от –59 мм и до 100 мм. Средняя за шестилетний период величина невязки составила 41 мм (табл. 2). Таким образом, за период наблюдений 41 мм осадков расходовался на инфильтрацию, пополнение запасов грунтовых вод, потери на неполное дренирование грунтовых вод. Эта величина соответствует модулю стока, равному $1,30 \text{ л/с}\cdot\text{км}^2$, и составляет порядка 7% от

среднего слоя выпавших атмосферных осадков. При этом следует отметить очевидные отличия невязок баланса между пятью изученными водосборами. Поскольку для всех водосборов применялись одинаковые методы учета атмосферных осадков и расчета эвапотранспирации, то все отличия в невязках баланса можно связать только с особенностями поверхностного стока. Ежегодные невязки баланса водосборов р. Шумиха, р. Байкал и руч. Меркурьев за шестилетний период менялись в широких пределах: от –59 мм и до 100 мм, но усредненные за шесть лет невязки имеют положительную величину у всех водосборов. Это говорит о том, что за многолетний период преобладает аккумуляция влаги в зоне активного водообмена. Это та влага, которая расходуется в том числе и на инфильтрацию в глубокие горизонты. Минимальная невязка получена для водосбора р. Шумиха, а максимальная для водосбора гидропоста ГП-3 на руч. Меркурьев, который имеет самую маленькую площадь и покрывает приводораздельную территорию в верховье ручья (рис. 1). Территория водосбора гидропоста ГП-3 относится преимущественно к зоне питания грунтовых вод. Здесь наибольшее количество выпавших атмосферных осадков расходуется на инфильтрацию, а не на поверхностный сток. Это и приводит к максимальной положительной невязке водного баланса в верховье руч. Меркурьев (табл. 2). Параллельно этот же процесс, можно выявить по наблюдениям за уровнями грунтовых вод в скважине Р-2-Ц, которая также расположена на приводораздельной территории недалеко от гидропоста ГП-3. По всей видимости, для малых водотоков, дренирующих низкогорный ландшафт, невязка баланса отражает степень дренирования водотоком горизонтов грунтовых вод зоны активного водообмена. То есть, в полученные значения невязки входит как величина изменения запасов влаги в зоне аэрации, так и некоторая часть потерь воды с площади водосбора из-за неполного дренирования грунтовых

Таблица 2. Средние за шестилетний период (2017–2023 гг.) показатели водного баланса

Водный объект (индекс гидрологического поста)	Площадь водосборного бассейна (F), км ²	Осадки ($P_r + P_s$), мм	Сток общий (Q), мм	Сток базовый ($Q_{сб}$), мм	*ET, мм	Невязка (Δ), мм
р. Шумиха (ГП-1)	9,3	601	199	123	399	4
руч. Безымянный (ГП-2)	2,4	600	125	76	399	76
руч. Меркурьев (ГП-3)	0,13	602	120	95	402	80
р. Байкал (ГП-4)	18,3	595	178	105	398	20
руч. Меркурьев (ГП-5)	11,9	600	173	111	399	28
Средние показатели:		599	159	102	399	41

* ET – годовой слой эвапотранспирации

вод водотоком. В результате невязка баланса в общем случае растет с уменьшением площади водотока (табл. 2). На эту общую тенденцию накладываются локальные особенности геологии, геоморфологии и природно-территориальных комплексов каждого водосборного бассейна. В силу наличия таких особенностей минимальная невязка баланса получена для водосбора гидропоста ГП-1, несмотря на то, что площадь водосбора у него не самая большая.

Слой базового стока составляет от 60 до 68 % общего слоя стока с водосборного бассейна и в среднем равен 102 мм, что отвечает величине модуля базового стока (M_b) 3,23 л/с·км². Это показывает, что в среднем за шестилетний период наблюдений 18 % выпавших атмосферных осадков расходуется на фильтрацию в почвенно-грунтовую толщу и формирует затем базовую составляющую поверхностного стока. Средний слой инфильтрации за счет таяния снега по наблюдениям за уровнем грунтовых вод составил 88 мм, поэтому можно первоначально говорить, что именно таяние снега обеспечивает основную часть инфильтрации и базового стока.

Описанные выше данные обобщаются величинами модулей стока, которые характеризуют отдельные процессы в общей схеме влагооборота территории участка «Енисейский». Для общего поверхностного стока (M_o) они сильно варьируют между водосборными бассейнами и составляют от минимума у руч. Безымянный, равного 3,94 л/с·км², и до максимума у р. Шумиха — 6,32 л/с·км². Средняя величина для территории в районе участка «Енисейский» составляет 5,18 л/с·км² и характеризует общий поверхностный сток, который можно измерить на замыкающем гидрологическом посту. Часть его участвовала в фильтрации через почвенно-грунтовую толщу и в водообмене с верхним горизонтом грунтовых вод. Она определяется как базовая на основании срезки гидрографа и характеризуется средним годовым модулем стока 3,23 л/с·км². При расчете по среднему расходу воды на гидропосту в январе, модуль базового стока может составлять от 2,40 до 2,98 л/с·км². Кроме этих двух величин, характеризующих непосредственно наблюдаемый сток, часть выпавших осадков накапливается в почвенно-грунтовой толще и участвует в инфильтрации в более глубокие горизонты грунтовых вод. Слой влаги, участвующей в этом процессе, при режимных наблюдениях определяется как невязка водного баланса и характеризуется средним за шестилетний период модулем, равным 1,30 л/с·км².

Выводы

Полученные за шестилетний период результаты режимных воднобалансовых наблюдений показывают сложную как внутригодовую, так и межгодовую динамику приходной и расходных статей водного баланса. Анализ данных говорит о необходимости продолжения режимных наблюдений для увеличения длины ряда наблюдений. Это особенно важно в связи с тем, что использование только фондовых метеорологических и гидрологических данных недостаточно для обоснования величин инфильтрации при создании моделей для оценки долговременной безопасности подземного сооружения. Прежде всего это касается величин атмосферных осадков, которые явно выше в пределах изучаемой территории, по сравнению с метеостанциями данного региона. Так, например, выполненные снегомерные съемки определяют величины влагозапасов в снеге, заметно отличающиеся от величин, представленных в фондовых данных. При этом от слоя влаги, который накоплен в снежном покрове, зависит общая увлажненность водосборов в теплый период года, а это влияет и на объемы летних паводков и стока в межень.

За шестилетний период наблюдений (с 2017 по 2023 г.) получены результаты, позволяющие более детально обосновать величину инфильтрации влаги. Средний годовой модуль базового стока за этот период составил 3,23 л/с·км². Эта величина определяет общий объем воды, который участвует в процессе фильтрации в верхней зоне активного водообмена. При этом поверхностный сток в январе, который формируется грунтовыми водами, характеризуется средними модулями от 2,40 до 2,98 л/с·км². Кроме этих объемов, непосредственно образующих поверхностный сток, в среднем за период наблюдений расходовалось 1,30 л/с·км² на пополнение запасов почвенно-грунтовых вод и на инфильтрацию в зону замедленного водообмена. Таким образом, модуль инфильтрации в глубокие горизонты грунтовых вод на участке «Енисейский» за шестилетний период наблюдений был в среднем несколько ниже значения 1,30 л/с·км².

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам АО «Красноярскгеология» А. Ю. Озерскому и В. А. Караулову, сотрудникам ФГБУ «Государственный гидрологический институт» А. Д. Журавлевой и Л. С. Курочкиной за многолетнее плодотворное сотрудничество.

Литература

1. РБ-003-21. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Оценка долгосрочной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов». — М. : ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2021. 67 с.
2. Кочкин Б. Т., Богатов С. А., Савельева Е. А. Эволюция ПГЗРО в Нижнеканском массиве под воздействием климатических факторов // Радиоактивные отходы. 2021. № 1 (14). С. 63–75. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-63-75.
3. Многолетние изменения элементов водного баланса на воднобалансовых и болотных станциях : Научно-прикладной справочник / под ред. М. Л. Маркова. — Санкт-Петербург : ООО «РИАЛ», 2021. 202 с.
4. Савичев О. Г., Болом И., Харанжевская Ю. А. Многолетние изменения элементов водного баланса бассейнов малых рек на юге Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 316. № 1: Науки о Земле. С. 124–128.
5. Харанжевская Ю. А. Водный баланс водосборов средних рек южно-таежной подзоны Западной Сибири и многолетние изменения его элементов // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2013. № 6. С. 102–109.
6. Чалов Р. С., Денисова И. С., Григорьев В. Ю. Изменение элементов водного баланса в бассейнах крупнейших притоков Байкала в конце XX — начале XXI вв. // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 6. С. 635–642.
7. 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.
8. Надёжина Е. Д., Школьник И. М., Стернзат А. В., Пикалёва А. А. Ожидаемые изменения испарения в XXI в. в зоне тайги Европейской части России // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 5. С. 538–549.
9. Vereecken H., Huisman J. A., Hendricks Franssen H. J., Brüggemann N., Bogaen H. R., Kollet S., Javaux M., van der Kruk J. and Vanderborght J. Soil hydrology: Recent methodological advances, challenges, and perspectives // Water Resources Research. 2015. Vol. 51. P. 2616–2633. DOI: 10.1002/2014WR016852.
10. Виноградов Ю. Б. Современные проблемы гидрологии. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. 320 с.
11. Михайлов В. Н., Добролюбов С. А. Гидрология : учебник для вузов. — Москва, Берлин : Директ-Медиа, 2017. 752 с.
12. Lehmann F., Vishwakarma B. D., and Bamber J. How well are we able to close the water budget at the global scale? // Hydrology and Earth System Sciences. 2022. Vol. 26. P. 35–54. DOI: 10.5194/hess-26-35-2022.
13. География Сибири в начале XXI века. Природа. / Отв. ред. Ю. М. Семенов, А. В. Белов. Т. 2. — Новосибирск : ГЕО, 2015. 390 с.
14. Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L. et al. The shuttle radar topography mission // Rev. Geophys. 2007. Vol. 45. P. 1–33.
15. ASTER GDEM Validation Team. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2. Summary of Validation Results. 2011. 26 p.
16. Xu W., Li J., Peng D., Yin H., Jiang J., Xia H., Wen D. Vertical Accuracy Assessment and Improvement of Five High-Resolution Open-Source Digital Elevation Models Using ICESat-2 Data and Random Forest: Case Study on Chongqing, China // Remote Sens. 2024. Vol. 16. P. 1903. DOI: 10.3390/rs16111903.
17. Лучшева А. А. Практическая гидрология. — Л. : Гидрометиздат, 1976. 439 с.
18. Гидрогеология СССР. Красноярский край и Тувинская АССР / Под ред. Сидоренко А. В. Т. XVIII. — М. : Недра, 1972. 272 с.
19. Rumynin V. G., Sindalovskiy L. N., Nikulenkov A. M., Leskova P. G. Effect of anisotropy and depth-dependent hydraulic conductivity on concentration curve response to nonpoint-source pollution // Journal of Hydrology. 2020. Vol. 591. P. 125319. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125319.
20. Румынин В. Г. Опыт изучения глинистых толщ и кристаллических массивов как геологических сред для окончательной изоляции РАО // Радиоактивные отходы. 2017. № 1 (1). С. 44–55.
21. Озерский А. Ю., Караулов В. А. Гидрогеологические исследования при изысканиях для подземного строительства в пределах массива кристаллических пород в южной части Енисейского кряжа // Инженерные изыскания. 2012. № 11. С. 52–59.
22. Гупало В. С., Казаков К. С., Коновалов В. Ю., Неуважаев Г. Д., Озерский Д. А. Анализ подходов к консервации и ликвидации скважин на участке недр «Енисейский» (Красноярский край, Нижнеканский массив) // Радиоактивные отходы. 2020. № 4 (13). С. 30–41. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-30-41.
23. Клибашев К. П., Горошков И. Ф. Гидрологические расчеты. — Л. : Гидромет, 1970. 460 с.
24. РД 52.08.915–2021. Обработка и обобщение данных наблюдений за стоком воды на реках и каналах при подготовке справочных изданий водного кадастра. — Санкт-Петербург, ФГБУ «ГТИ», 2022. 231 с.
25. Морозов П. Н. Подземный сток и методы его определения (конспект лекций). — Л. : ЛГМИ, 1975. 60 с.

26. *Rets E. P. et al.* Algorithm grwat for Automated Hydrograph Separation by BI Kudelin's Method: Problems and Perspectives // *Water Resources*. 2022. Vol. 49. № 1. Pp. 23–37. DOI: 10.1134/S0097807822010146.
27. *Ladson A. R. et al.* A standard approach to baseflow separation using the Lyne and Hollick filter // *Australasian Journal of Water Resources*. 2013. Vol. 17. № 1. Pp. 25–34. DOI: 10.7158/W12-028.2013.17.1.
28. Методы изучения и расчета водного баланса / отв. ред. Вуглинский В. С. — Л.: Гидрометеиздат, 1981. 397 с.
29. *Yates D., Strzepek K.* Potential evapotranspiration methods and their impact on the assessment of river basin runoff under climate change. *International Institute of Applied Systems Analysis. Working Papers* 94–46. 1994. 28 p.
30. *Sindikubwabo C., Qi F., Li R., Yu T., Cheng W.* Evaluation of 32 Simple Equations against the Penman–Monteith Method to Estimate the Reference Evapotranspiration in the Hexi Corridor, Northwest China // *Water*. № 12 (10). 2020. P. 2772. <https://doi.org/10.3390/w12102772>
31. *Longobardi A., Villani P.* The Use of Micrometeorological Data to Identify Significant Variables in Evapotranspiration Modeling // *Procedia Environmental Sciences*. Vol. 19. 2013. P. 267–274. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.031>.
32. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Красноярский край. Сер. 3. Части 1–6. Вып. 21. Книга 1. — Л.: Гидрометеиздат, 1990. 624 с.
33. *Meinzer O. E.* The occurrence of groundwater in the United States with a discussion of principles. *US Geol. Survey Water Supply Pap.*, 1923. Vol. 489. 321 p.

Информация об авторах

Иноземцев Святослав Анатольевич, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН (199004, Санкт-Петербург, В. О., Средний пр-кт, д. 41), e-mail: inozemtsev@hgepro.ru.

Владимиров Константин Владимирович, научный сотрудник, Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН (199004, Санкт-Петербург, В. О., Средний пр-кт, д. 41), e-mail: vladimirov@hgepro.ru.

Шварц Алексей Аркадьевич, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН (199004, Санкт-Петербург, В. О., Средний пр-кт, д. 41), e-mail: alarshv@hgepro.ru.

Румынин Вячеслав Геневич, доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, научный руководитель, Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН (199004, Санкт-Петербург, В. О., Средний пр-кт, д. 41), e-mail: rumynin@hgepro.ru.

Никуленков Антон Михайлович, кандидат геолого-минералогических наук, директор, Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН (199004, Санкт-Петербург, В. О., Средний пр-кт, д. 41), e-mail: annik@hgepro.ru.

Библиографическое описание статьи

Иноземцев С. А., Владимиров К. В., Шварц А. А., Румынин В. Г., Никуленков А. М. Водный баланс малых водосборных бассейнов и оценка величины инфильтрационного питания в районе участка «Енисейский» (Нижнеканский массив, Енисейский кряж) // *Радиоактивные отходы*. 2025. № 1 (30) С. 73–87. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-1-73-87.

WATER BUDGET OF SMALL WATERSHEDS AND THE GROUNDWATER INFILTRATION RECHARGE ESTIMATED WITHIN THE YENISEYSKIY SITE AREA (NIZHNEKANSKIY ROCK MASS, YENISEY RANGE)

Inozemtsev S. A., Vladimirov K. V., Shvarts A. A., Rumynin V. G., Nikulenkov A. M.

Saint-Petersburg Division of the E. M. Sergeev Institute of Environmental Geology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Article received on September 26, 2024

The water budget of a small stream watershed provides important information on the hydrological cycle components within the local area. The paper overviews the six-year observation of water budget elements in four small watersheds ranging in their size from 0.16 km² to 18.5 km². Annual precipitation over the six-year observation period ranged from 488 mm in 2021 to 763 mm in 2020. The total number of rainy days was 621. The maximum monthly precipitation of 169.8 mm was recorded in June 2020. Snow precipitation accounted for 16% to 37% of the total precipitation over the hydrological year. Calculations show that the snowmelt produced infiltration ranging from 69 mm to 106 mm with the six-year average of 88 mm. The water balance shows an annual change in water storage, which reached an average of 41 mm/year. This value represents 7% of the average annual precipitation layer. The baseflow was identified by separating the runoff hydrograph. Data analysis showed that the baseflow of the surface runoff was 102 mm on average over the six years evidencing that 60 to 70% of the surface runoff accounted for the baseflow.

Keywords: streams, watershed, water budget, precipitations, surface runoff, evapotranspiration, infiltration, stream hydrograph, Nizhnekanskiy massif, Yenisey Range, radioactive waste.

Acknowledgments

The authors would like to express their gratitude to the employees of JSC Krasnoyarsgeology A. Y. Ozersky and V. A. Karaulov, and of FSBI State Hydrological Institute A. D. Juravleva and L. S. Kurthkina for their long-standing collaboration.

References

1. RB-003-21. *Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoi energii "Otsenka dolgovremennoi bezopasnosti punktov glubinnogo zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov"* [Safety Guide for Nuclear Energy Use: Long-Term Safety Assessment of Deep Disposal Facilities for Radioactive Waste]. Moscow, FBI SEC NRS Publ., 2021. 67 p.
2. Kochkin B. T., Bogatov S. A., Saveleva E. A. Evolyuciya PGZRO v Nizhnekanskom massive pod vozdejstviem klimaticheskikh faktorov [Evolution of the Repository in Nizhnekanskiy Massif under the Influence of Climatic Factors]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive waste*, 2021, no. 1 (14), pp. 63–75. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-63-75.
3. *Mnogoletnie izmeneniya elementov vodnogo balansa na vodnobalansovykh i bolotnykh stantsiyakh : Nauchno-prikladnoi spravochnik. Pod red. M. L. Markova* [Long-term fluctuations in the water balance components at water balance and wetland stations. Scientific and applied reference book. Ed. by M. L. Markov]. Saint-Petersburg, OOO RIAL Publ., 2021. 202 p.
4. Savichev O. G., Bolom I., Kharanzhevskaya Yu. A. *Mnogoletnie izmeneniya elementov vodnogo balansa basseinov malykh rek na yuge Zapadnoi Sibiri* [Long-term fluctuations in the water balance elements of small river basins in the south of Western Siberia]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 1 : Nauki o Zemle [Earth Sciences], pp. 124–128.
5. Kharanzhevskaya Yu. A. *Vodnyy balans vodosborov srednikh rek yuzhno-tayezhnoy podzony Zapadnoy Sibiri i mnogoletniye izmeneniya yego elementov* [Water balance of medium sized river basins in southern Taiga subzone of West Siberia and long-term changes of its components]. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya — Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*, 2013, no. 6, pp. 102–109.
6. Chalov S. R., Denisova I. S., Grigor'ev V. Y. *Izmeneniya elementov vodnogo balansa v basseynakh krupneyshikh pritokov Baykala v kontse XX — nachale XXI vv.* [Fluctuations in the Water Balance Elements in the Basins of the Largest Tributaries of Lake Baikal in the Late XX—Early XXI Century]. *Vodnye resursy — Water resources*, 2023, vol. 50, no. 6, pp. 635–642. DOI: 10.31857/S0321059622600776.
7. Zhuravin S. A., Markov M. L., Gurevich E. V. *Mnogoletniye izmeneniya protsessov vlogooborota po dannym vodnobalansovykh stantsiy v tsentral'noy chasti basseyna r. Don* [Long-Term Fluctuations in the Moisture Circulation Processes According to Data from Water Balance Stations in the Central Don

Basin]. *Vodnye resursy — Water resources*, 2020, vol. 47, pp. 1031—1042. DOI: 10.1134/S0097807820060184.

8. Nadyozhina E. D., Shkol'nik I. M., Sternzat A. V., Pikalyova A. A. Ozhidayemyye izmeneniya ispareniya v XXI v. v zone taygi Yevropeyskoy chasti Ros-sii [Expected Changes in Evaporation in the Taiga Zone of European Russia in the XXI Century]. *Vodnye resursy — Water resources*, 2023, vol. 50, no. 5, pp. 538—549. DOI: 10.31857/S0321059623600096.

9. Vereecken H., Huisman J. A., Hendricks Franssen H. J., Brüggemann N., Bogena H. R., Kollet S., Javaux M., van der Kruk J. and Vanderborght J. Soil hydrology: Recent methodological advances, challenges, and perspectives. *Water Resources Research*, 2015. vol. 51, pp. 2616—2633. DOI: 10.1002/2014WR016852.

10. Vinogradov Yu. B. *Sovremennyyi problemy gidrologii* [Modern problems of hydrology]. Moscow, Akademiya Publ., 2008. 320 p.

11. Mikhajlov V. N., Dobrolyubov S. A. *Gidrologiya: uchebnyk dlya vuzov* [Hydrology: a textbook for universities]. Moscow, Berlin, Direkt-Media Publ., 2017. 752 p.

12. Lehmann F., Vishwakarma B. D., Bamber J. How well are we able to close the water budget at the global scale? *Hydrology and Earth System Sciences*, 2022, vol. 26, pp. 35—54. DOI: 10.5194/hess-26-35-2022.

13. *Geografiya Sibiri v nachale XXI veka. Priroda* [Geography of Siberia at the beginning of the 21st century. Nature]. Vol. 2. Edt. by Yu. M. Semenov, A. V. Belov. Novosibirsk, GEO Publ., 2015. 390 p.

14. Farr T. G., Rosen P. A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L. et al. The shuttle radar topography mission. *Rev. Geophys.*, 2007, vol. 45, pp. 1—33.

15. ASTER GDEM Validation Team. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2. Summary of Validation Results. 2011. 26 p.

16. Xu W., Li J., Peng D., Yin H., Jiang J., Xia H., Wen D. Vertical Accuracy Assessment and Improvement of Five High-Resolution Open-Source Digital Elevation Models Using ICESat-2 Data and Random Forest: Case Study on Chongqing, China. *Remote Sens.*, 2024, vol. 16, p. 1903. DOI: 10.3390/rs16111903.

17. Luchsheva A. A. *Prakticheskaya gidrologiya* [Practical hydrology]. Leningrad, Gidrometioizdat Publ., 1976. 439 p.

18. *Gidrogeologiya SSSR. Krasnoyarskii krai i Tuvinskaya ASSR* [Hydrogeology of the USSR. Krasnoyarsk Territory and Tuva]. Edt. by Sidorenko A. V. Vol. XVIII. Moscow, Nedra Publ., 1972. 272 p.

19. Rumynin V. G., Sindalovskiy L. N., Nikulenkova A. M., Leskova P. G. Effect of anisotropy and depth-dependent hydraulic conductivity on concentration curve response to nonpoint-source pollution. *Journal of Hydrology*, 2020, vol. 591, p. 125319. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125319.

20. Rumynin V. G. Opyt izucheniya glinistykh tolshch i kristallicheskikh massivov kak geologicheskikh sred dlya okonchatel'noj izolyacii RAO [Experience of Studying the Clay Masses and Crystalline Core areas as Geological Environment for RW Final Isolation]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive waste*, 2017, no. 1, pp. 44—55.

21. Ozerskii A. Yu., Karaulov V. A. Gidrogeologicheskie issledovaniya pri izyskaniyakh dlya podzemnogo stroitelstva v predelakh massiva kristallicheskikh porod v yuzhnoj chasti Eniseiskogo kryazha [Hydrogeological studies preceding the underground excavation in the crystalline rock massif in the southern part of the Yenisei ridge]. *Inzhenernye izyskaniya — Engineering surveys*, 2012, no. 11, pp. 52—59.

22. Gupalo V. S., Kazakov K. S., Konovalov V. Yu., Neuvazhaev G. D., Ozerskiy D. A. Analiz podhodov k konservacii i likvidacii skvazhin na uchastke nedr "Enisejskiy" (Krasnoyarskiy kraj, Nizhnekanskiy massiv) [Evaluation of Approaches for Well Abandonment and Temporary Shutdown at the "Yeniseiskiy" Site (Krasnoyarsk Territory, Nizhnekanskiy Rock Massif)]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive waste*, 2020, no. 4 (13), pp. 30—41. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-30-41.

23. Klibashev K. P., Goroshkov I. F. *Gidrologicheskie raschety* [Hydrological calculations]. Leningrad, Gidromet Publ., 1970. 460 p.

24. RD 52.08.915–2021. *Obrabotka i obobshchenie dannykh nablyudenii za stokom vody na rekakh i kanalakh pri podgotovke spravochnykh izdaniy vodnogo kadastra* [Processing and generalization of observation data on river and channel water flows required to prepare reference publications on the water cadaster]. Saint-Petersburg, FSBI State Hydrological Institute Publ., 2022. 231 p.

25. Morozov P. N. *Podzemnyi stok i metodi ego opredeleniya (konspekt lekczii)* [Underground runoff and its estimation methods (lecture notes)]. Leningrad, LGMI Publ., 1975. 60 p.

26. Rets E. P. et al. Algorithm grwat for Automated Hydrograph Separation by BI Kudelin's Method: Problems and Perspectives. *Water Resources*, 2022, vol. 49, no. 1, pp. 23—37. DOI: 10.1134/S0097807822010146.

27. Ladson A. R. et al. A standard approach to base-flow separation using the Lyne and Hollick filter. *Australasian Journal of Water Resources*, 2013, vol. 17, no. 1, pp. 25—34. DOI: 10.7158/W12-028.2013.17.1.

28. *Metody izutcheniya i rastcheta vodnogo balansa / otv. red. Vuglinskij V. S.* Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1981. 397 s.

29. Yates D., Strzepek K. Potential evapotranspiration methods and their impact on the assessment of river basin runoff under climate change. *International*

- Institute of Applied Systems Analysis. Working Papers 94–46. 1994. 28 p.
30. Sindikubwabo C., Qi F., Li R., Yu T., Cheng W. Evaluation of 32 Simple Equations against the Penman–Monteith Method to Estimate the Reference Evapotranspiration in the Hexi Corridor, Northwest China // *Water*. № 12 (10). 2020. P. 2772. <https://doi.org/10.3390/w12102772>.
31. Longobardi A., Villani P. The Use of Micrometeorological Data to Identify Significant Variables in Evapotranspiration Modeling // *Procedia Environmental Sciences*. Vol. 19. 2013. P. 267–274. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.031>.
32. *Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR. Krasnoyarskii krai. Ser. 3. Chasti 1–6. 21. Kniga 1* [Scientific and applied reference book on the climate of the USSR. Krasnoyarsk region. Series 3. Parts 1–6. Issue 21. Book 1]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990. 624 p.
33. Meinzer O. E. The occurrence of groundwater in the United States with a discussion of principles. US Geol. Survey Water Supply Pap., 1923. Vol. 489. 321 p.

Information about the authors

Inozemtsev Sviatoslav Anatolievich, Ph.D. of Biological Science, Leading Research Scientist, Saint-Petersburg Division of the E. M. Sergeev Institute of Environmental Geology of the Russian Academy of Sciences (41, Sredny ave. V. O., St. Petersburg, 199004, Russia), e-mail: inozemtsev@hgepro.ru.

Vladimirov Konstantin Vladimirovich, Research Assistant, Saint-Petersburg Division of the E. M. Sergeev Institute of Environmental Geology of the Russian Academy of Sciences (41, Sredny ave. V. O., St. Petersburg, 199004, Russia), e-mail: vladimirov@hgepro.ru.

Shvarts Aleksey Arkadievich, Ph.D. of Geological and Mineralogical Sciences, Head of the Laboratory, Saint-Petersburg Division of the E. M. Sergeev Institute of Environmental Geology of the Russian Academy of Sciences (41, Sredny ave. V. O., St. Petersburg, 199004, Russia), e-mail: alarshv@hgepro.ru.

Rumynin Vyacheslav Genievich, Doctor of Science, Corresponding member of the RAS, Scientific Director, Saint-Petersburg Division of the E. M. Sergeev Institute of Environmental Geology of the Russian Academy of Sciences (41, Sredny ave. V. O., St. Petersburg, 199004, Russia), e-mail: rumynin@hgepro.ru.

Nikulenkov Anton Mihylovich, Ph.D. of Geological and Mineralogical Sciences, Director of Saint-Petersburg Division, Saint-Petersburg Division of the E. M. Sergeev Institute of Environmental Geology of the Russian Academy of Sciences (41, Sredny ave. V. O., St. Petersburg, 199004, Russia), e-mail: annik@hgepro.ru.

Bibliographic description

Inozemtsev S. A., Vladimirov K. V., Shvarts A. A., Rumynin V. G., Nikulenkov A. M. Water Budget of Small Watersheds and the Groundwater Infiltration Recharge Estimated within the Yeniseyskiy Site Area (Nizhnekanskiy Rock Mass, Yenisey Range). *Radioactive Waste*, 2025, no. 1 (30), pp. 73–87. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-1-73-87. (In Russian).