

На правах рукописи



БАДМИНОВ Прокопий Сократович

**ПОДЗЕМНЫЙ СТОК ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ
ВОСТОЧНОГО САЯНА**

Специальность 1.6.6. Гидрогеология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск-2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИЗК СО РАН, г. Иркутск).

Научный руководитель: **Алексеев Сергей Владимирович**, доктор геолого-минералогических наук, ФГБУН Институт земной коры СО РАН, зав. лабораторией гидрогеологии

Официальные оппоненты: **Дутова Екатерина Матвеевна**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, профессор отделения геологии, ИШПР, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Тугарина Марина Александровна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры Прикладная геология, ФГБОУ ВО Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск

Ведущая организация: ФГБУН Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, г. Чита

Защита диссертации состоится « **20** » **апреля** **2022 г.** в **14:00 ч.** на заседании диссертационного совета 24.1.062.01 при ФГБУН Институте земной коры СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИНЦ СО РАН (г. Иркутск, ул. Лермонтова, д.128) и на сайте: <http://www.crust.irk.ru/images/upload/newsfull202/2941.pdf>

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по указанному адресу ученому секретарю совета к.г.-м.н. Бабичевой Виктории Аркадьевне.

Тел: (3952)42-61-33, факс: (3952)42-69-00, e-mail: khak@crust.irk.ru

Автореферат разослан « ___ » **марта** 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат геол.-мин. наук



В.А. Бабичева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Подземные воды в настоящее время являются одним из важнейших компонентов природных ресурсов. Они являются надежным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения населения, обеспечивают промышленные предприятия водами производственно-технического назначения, используются в сельском хозяйстве для орошения земель. В связи с этим, большое значение приобретает всестороннее изучение подземного стока и естественных ресурсов подземных вод, особенно зоны интенсивного водообмена, которые наиболее доступны для извлечения и дальнейшего использования, хорошо восполняются и имеют ряд преимуществ по сравнению с поверхностными водами. Региональная оценка естественных ресурсов подземных вод и подземного стока является основой для рационального использования и охраны подземных вод, а также необходима для решения задач, связанных с условиями их формирования и пространственного распределения, и роли в общем водном балансе.

В горно-складчатых областях, к которым относится исследуемая территория Восточного Саяна, процессы формирования подземного стока изучены значительно слабее по сравнению с платформенными регионами. Методы изучения подземного стока горных стран не в полной мере используют количественную оценку влияния природных условий. Для определения особенностей формирования и распределения подземного стока необходимо расширение числа параметров и выявление взаимосвязи с основными факторами его формирования. Необходимость решения этой задачи связана с тем, что формирование основной части подземного стока территории Присаянья происходит в горно-складчатой области, а транзит и разгрузка в платформенной, наиболее густонаселенной области. Поэтому количественное определение подземного стока центральной части и северо-восточного склона Восточного Саяна дает представление о величине водообеспеченности подземными водами целого региона.

Объектом научного исследования являются подземные воды центральной части Восточного Саяна, расположенной на стыке территорий Республики Бурятия (Окинское плоскогорье) и Иркутской области (северо-восточный склон).

Цель работы - изучение условий формирования подземного стока, определение его величины и основных особенностей пространственно-временного распределения с использованием методов многомерного анализа (факторного, кластерного, регрессионного).

Задачи исследования:

1. Выявление основных природных факторов, влияющих на пространственно-временное распределение подземного стока.
2. Обоснование возможности оценки подземного стока в горно-складчатых областях при отсутствии режимных наблюдений.
3. Количественный расчет признакового пространства (геолого-структурные, морфометрические и гидрометеорологические признаки) и установление взаимосвязи между признаками.

4. Выявление особенностей пространственно-временного распределения и локализации подземного стока.
5. Оценка и картографирование подземного стока.
6. Районирование территории по условиям формирования подземного стока методами многомерного анализа.

Исходный материал и методы исследований. Для оценки подземного стока и изучения его пространственного распределения на исследуемой территории применен метод генетического расчленения гидрографа и гидрометрическая съемка осенней и зимней межени. Гидродинамический метод позволил оценить на исследуемой территории только ту часть подземного стока, которая не реализуется в русловую сеть. Он использован в бассейне р. Черной Зимы в процессе проведения детальных поисков пресных подземных вод для водоснабжения Белозиминского ГОКа.

В основу диссертации положены материалы полевых, теоретических и экспериментальных исследований автора, полученные в течение более чем двадцатилетнего периода при проведении экспедиционных работ на территории горно-складчатых областей юга Восточной Сибири. Гидрометрическая съемка осенней и зимней межени в бассейнах рек Ока, Белая, Урик проведена при помощи авиадесантных работ, по рекам Ярма, Кирей осуществлялся сплав, в бассейнах р. Зима и в верховьях р. Ока проложены автомобильные, конные и пешие маршруты. В общей сложности обследованы бассейны 89 рек на стационарных и разовых гидрометрических постах. В диссертации также использованы опубликованные и фондовые сведения по климатическим, гидрологическим, гидрогеологическим, геолого-геофизическим данным.

Научная новизна работы и вклад автора:

1. Раскрыты процессы формирования и распределения подземного стока центральной части Восточного Саяна.
2. Впервые для исследуемой территории дана количественная оценка подземного стока с учетом всего многообразия факторов его формирования и распределения.
3. Исследована возможность применения существующих методов оценки и картирования подземного стока для сложных гидрогеологических условий горно-складчатых областей.
4. Собраны и обобщены сведения по геолого-структурным, гидрогеологическим, гидрометеорологическим условиям центральной части Восточного Саяна, которые представлены в виде исходных данных для построения моделей.
5. На основе составленной карты подземного стока подсчитаны естественные ресурсы подземных вод и проведено районирование для исследуемой территории по условиям формирования и распределения подземного стока.

Автор принимал участие в проведении среднемасштабной гидрогеологической съемки листов N-47-XXIII, N-47-XXIV в бассейнах рек Ока и Большая Белая. Большинство трудоемких расчетов при получении исходных данных для достижения поставленной цели исследования выполнены непосредственно самим автором или при его участии.

Основные защищаемые положения:

1. В центральной части Восточного Саяна, наряду с общеизвестными закономерностями увеличения характеристик подземного стока с высотой местности, выявлены площади, на которых происходит как увеличение, так и уменьшение значений модуля подземного стока для высокогорных районов.

2. Характеристики подземного стока имеют в целом дискретный характер распределения. Наблюдаемые значения модулей подземного стока симбатны количеству атмосферных осадков и не зависят от площади водосбора.

3. На основании установленных закономерностей распределения подземного стока в центральной части Восточного Саяна выделены два округа – Окинский и Присяянский. Первый охватывает высокогорную часть складчатого сооружения, второй – выступ фундамента Сибирской платформы. Естественная граница между округами проходит по зоне Главного Саянского разлома.

Практическое значение:

1. Карта подземного стока, составленная для исследуемой территории, дает возможность эффективно решать практические вопросы планирования водохозяйственных мероприятий и рационального использования подземных вод, определять перспективные участки для проведения поисково-разведочных работ на подземные воды разного целевого назначения.

2. Результаты расчетов количественных показателей подземного стока позволяют оценить в целом обеспеченность ресурсами подземных вод рассматриваемого региона и выявить их роль в общих водных ресурсах, а также могут быть использованы при различных водно-балансовых расчетах.

3. Методический подход, правомерность использования которого обоснована при оценке подземного стока исследуемой территории, может быть рекомендован и для других регионов, находящихся в сходных структурно-гидрогеологических условиях.

4. Материалы диссертации могут быть использованы планирующими органами, а также водохозяйственными организациями при составлении перспективных планов комплексного развития Восточной Сибири.

Апробация результатов исследований. Основные результаты, рассматриваемые в диссертационной работе докладывались и обсуждались: на XV, XVI молодежных конференциях «Геология и геофизика Восточной Сибири» (Иркутск, 1992, 1994); на XIII, XIV, XVI, XVII, XIX, XXII Всесоюзных и Всероссийских совещаниях по подземным водам Сибири и Дальнего Востока (Томск, 1991, Иркутск, 1994, Новосибирск, 2000, Красноярск, 2003, Тюмень, 2009, Новосибирск, 2018); на конференции «Гидроминеральные ресурсы Восточной Сибири» (Иркутск, 2001); на XXXIII и XXXVIII международных конгрессах гидрогеологов (Мехико, 2004 и Краков, 2010); на III международной научной конференции памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова (Санкт-Петербург, 2018); на Всероссийской научно-практической конференции с Международным участием «Геонауки 2019» (Иркутск, 2019).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 240 страницах текста. Она содержит 47 таблиц, 77 рисунков и список литературы из 219 наименований.

Благодарности. Автор приносит глубокую благодарность своему первому научному руководителю доктору геолого-минералогических наук, профессору Б.И. Писарскому за научное и методическое руководство при работе над диссертацией, а также нынешнему руководителю доктору геолого-минералогических наук С.В. Алексееву. Автор искренне признателен д.г.-м.н. профессору А.П. Хаустову, кандидатам геолого-минералогических наук С.Х. Павлову, Ю.Н. Диденкову, А.В. Паршину, С.Г. Аржанникову, Л.Л. Шабынину, м.н.с. М.Н. Васиной, гидрогеологу ПГО «Бурятгеология» к.г.-м.н. Н.Л. Мельничуку, вед. инженеру И.Г. Крюковой за ценные советы и поддержку. Автор благодарит гидрогеологов Ангарской экспедиции ПГО «Иркутскгеология» В.Г. Пятаева, З.П. Пашовкину; руководителя Центра мониторинга окружающей среды по Республике Бурятия к.г.-м.н. В.Г. Кочневу, вед. инженера Оргильянова А.И. за предоставление материалов по подземному стоку и помощь при проведении экспедиционных работ на исследуемой территории. Автор выражает благодарность всем сотрудникам лаборатории гидрогеологии и охраны подземных вод Института земной коры. Отдельную благодарность автор приносит своим родителям за понимание и поддержку на всех этапах подготовки диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I. Обзор изученности территории

В главе дан обзор гидрогеологической изученности исследуемой территории, рассмотрена роль исследователей, внесших наибольший вклад в изучении подземного стока. Отмечено, что региональные работы по оценке подземного стока носят единичный характер и что, помимо малочисленности и пространственной неоднородности, материалы наблюдений основной гидрометеорологической сети Росгидромета не отражают динамику подземного стока в период зимней межени.

Глава II. Природные факторы формирования и пространственного распределения подземного стока

Исследуемая территория расположена в центральной части горной системы Восточный Саян и его отрогах, на северо-восточном склоне Передового хребта и включает бассейны рек Большой и Малый Кирей, Зима, Тагна, Ерма, Урик, а также средние и верхние течения рек Ока, Большая Белая (рисунок 1).

Среди природных факторов, оказывающих влияние на формирование и распределение подземных вод, основное значение имеют физико-географические и геокриологические условия, геологическое строение территории.

Климат района отличается резкой континентальностью, проявляющейся в больших величинах годовых амплитуд температур воздуха. Период с отрицательными среднемесячными температурами воздуха для большей части территории продолжается

с октября по апрель. Средняя многолетняя температура воздуха изменяется от $-1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (п. Сарам), до $-4,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (п. Орлик).

Атмосферные осадки являются одним из важнейших стокоформирующих факторов, влияющих на режим и количественные показатели подземного стока. Корреляционный анализ многолетних рядов атмосферных осадков по 33-м метеостанциям и постам Восточного Саяна позволил выявить весьма сложный характер их распределения. На каждом конкретном участке горной страны решающими в распределении атмосферных осадков являются орография, сочетание долин, их пространственные соотношения и экспозиция, а в крупных бассейнах – региональные особенности атмосферной циркуляции. С учетом этих особенностей для крупных бассейнов рек Уда, Ока, Белая и Китой построены районные зависимости осадков от высоты местности и составлена схема распределения среднемноголетних осадков (рисунок 2), согласно которой значительная часть исследуемой территории находится в области избыточного увлажнения. Бассейны рек Окинского плоскогорья, прикрытые горными хребтами от влагонесущих масс, увлажнены в меньшей степени.



Рисунок 1. Обзорная карта региона (штриховка - район исследований)

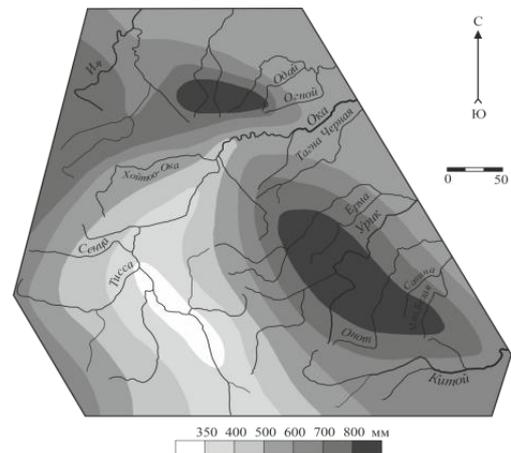


Рисунок 2. Схема распределения атмосферных осадков на территории Восточного Саяна

Многолетняя мерзлота имеет сплошное распространение на высоких хребтах, приподнятых плато и водоразделах (150-265 м), уменьшаясь на северо-восток; в среднегорье она имеет прерывистое, а в низкогорье и в долинах рек островное распространение. Сплошность криолитозоны нарушается таликами. Сквозные талики отмечены в местах выхода крупнодебитных карстовых источников. Сквозные и несквозные подрусловые и подозерные талики связываются отепляющим воздействием поверхностных вод. В центральной части Восточного Саяна талики отмечаются только вдоль русел рек (долинные) и изредка на крутых склонах южной экспозиции. Долинные талики разобщают мерзлую зону на отдельные блоки и объединяют подземные воды в единые водонапорные системы, обеспечивая их питание и разгрузку.

Геологическое строение территории оказывает огромное влияние на формирование подземных вод. Оно зависит от литологического состава и мощности пород, степени их метаморфизации, трещиноватости и тектонической проработки, которые определяют

пути инфильтрации, места концентрации и разгрузки подземных вод, а также формирование их химического состава и температурного режима. Восточный Саян в общем плане рассматривается многими геологами как крупное антиклинальное поднятие (мегаантиклинорий), а исследуемый район, охватывающий северо-восточную часть – в качестве выступа фундамента окраины Сибирской платформы, к которому в дальнейшем причленились каледонские структуры. На большей части исследуемой территории Восточного Саяна развиты метаморфические образования, слагающие фундамент Сибирской платформы и Алтае-Саянской складчатой области, магматические породы различного состава. Также широко распространены эффузивные и карбонатосодержащие породы, включающие докембрийские метаморфические образования, осадочно-метаморфические образования нижнего протерозоя, нижнего протерозоя-риффея. Рыхлые отложения развиты в долинах рек и на горных склонах.

Тектонические зоны, развитые в изверженных и метаморфических породах, обуславливают гидравлическую взаимосвязь между водоносными зонами и являются путями глубокой инфильтрации осадков. Они формируют потоки трещинно-жильных вод (линейно-вытянутые зоны) и в отдельных случаях являются очагами разгрузки подземного стока. На площади исследований, в первую очередь, это разломы, контролируемые структурные блоки (Хусан-Жалгинский, Онотский, Бирюсинский, Урикско-Окинский разломы, Передовой надвиг, Ермино-Горхонская зона разломов и др.).

Глава III. Условия формирования и распределения подземного стока

Природные факторы формирования подземного стока охарактеризованы совокупностью признаков: $M_{н.с.}$ (модуль подземного стока), X (количество атмосферных осадков), $K_{тр.}$ (коэффициент трещиноватости), $F_{б}$ (площадь бассейна), $H_{б}$ (высота бассейна), H_p (средняя отметка русла), $I_{б}$ (уклон бассейна), I_p (уклон русла), L (расстояние до удаленной точки бассейна), L_p (длина реки), N (порядок водотока), S (частота потоков), D (густота речной сети), $H_{эр.}$ (глубина эрозионного вреза), K (комплексный показатель расчленения рельефа), которые определены для 89 речных бассейнов.

На первом этапе была составлена корреляционная матрица признаков. Анализ корреляционной матрицы признаков показал отсутствие какого-либо одного ведущего фактора в формировании подземного стока на всей территории. Однако корреляционные зависимости, построенные для отдельных бассейнов, и карта распределения модуля подземного стока позволили выявить следующие особенности:

1. Зависимость модуля подземного стока от высоты местности не является единой для всей территории и для различных бассейнов рек носит разнонаправленный характер (рисунок 3). В бассейнах рек Кирея и Зимы наблюдается увеличение модуля подземного стока с высотой местности от 1-2 л/с*км² в предгорьях до 14-25 л/с*км² в водораздельных частях Шиитского хребта (рисунок 3а), что хорошо согласуется с ведущими факторами формирования подземного стока. Здесь, в пределах массива с высотой местности отмечается увеличение количества атмосферных осадков,

возрастает интенсивность экзогенных процессов – увеличивается глубина и скорость процессов выветривания, следовательно, возрастает мощность трещиноватой зоны и улучшаются ее коллекторские свойства. Морфологические характеристики водосборов, одним из ярких проявлений которых является значительное увеличение количества озер, свидетельствующее о геолого-структурных особенностях территории, благоприятствуют для формирования подземного стока и прерывистого развития многолетней мерзлоты в бассейнах рек Кирей и Ярма. Сами реки в верховьях пересекают до 2-3 проточных озер, накапливая речной сток в период паводков, и обеспечивают формирование очень высоких значений модульных характеристик в зимнюю межень. В смежном бассейне р. Зима, где на тех же высотных отметках отсутствуют верховые озера, модуль подземного стока в полтора-два раза ниже.

В бассейнах рек Ока, Большая Белая наблюдается обратная зависимость модуля подземного стока с высотой, связанная в первую очередь с ландшафтно-климатическими условиями (рисунок 3б). Расположенное в верховьях этих рек Окинское плато является для них естественным водосбором. Со всех сторон оно окружено горными цепями, препятствующими проникновению влагонесущих масс, поэтому здесь атмосферных осадков выпадает в полтора раза меньше чем на остальной территории. Низкие фильтрационные характеристики пород благоприятствуют более активному развитию многолетнемерзлых пород, служащих водоупорным экраном. Уменьшение объема подземного стока происходит и в результате его аккумуляции процессами наледообразования. Особенно ярко это выражено в бассейне р. Ока.

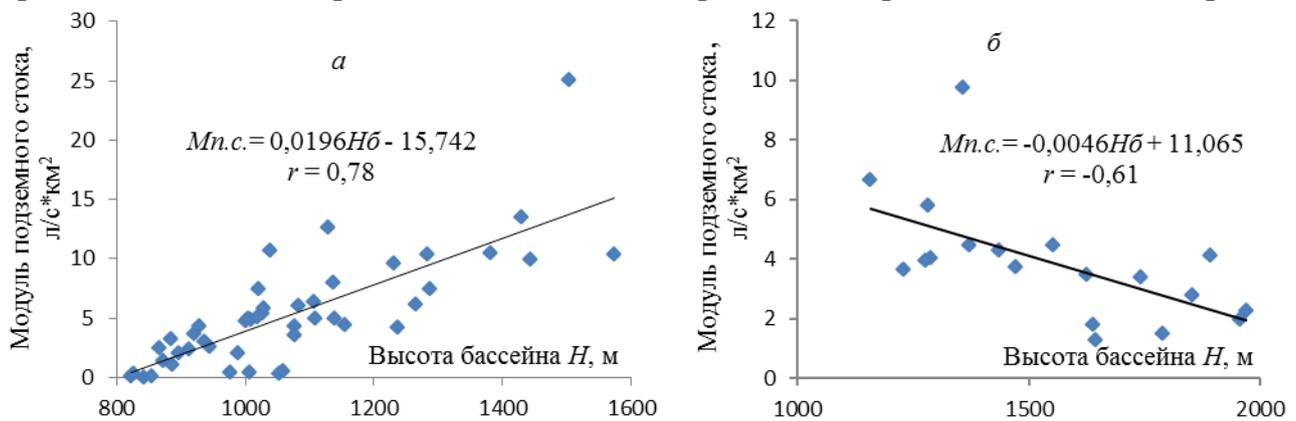


Рисунок 3. График связи модуля подземного стока с высотой бассейна: а) бассейны рек Кирей и Белая Зима; б) бассейны рек Ока, Большая Белая и Урик

2. В пределах гидрогеологического массива подземный сток в реки формируется за счет подземных вод зоны экзогенной трещиноватости и трещинно-жильных вод обводненных разломов. Особенности структурно-гидрогеологических условий приводят к тому, что при высокой расчлененности рельефа размеры площади водосбора не всегда являются ведущим показателем глубины дренирования. Поэтому здесь не проявляется связь модуля подземного стока с площадью водосбора и не выделяются критические площади, при которых происходит стабилизация подземного стока (рисунок 4а). С одной стороны, в склоновой части подземный сток приурочен к малым водосборам. Хорошее развитие речной сети и глубокие врезы русел рек на малых

водосборах (до 300 км²) обеспечивают благоприятные условия разгрузки подземных вод и высокий темп водообмена. Подземный сток реализуется в русловую сеть в основной массе на площади до 300 км² в 60 % изученных бассейнов, редко 500-600 км² и более. С другой стороны, наглядно демонстрируется роль гидрогеологических условий водосборов в формировании подземного стока различных бассейнов, близких по площади. В целом, наблюдается тенденция увеличения модуля подземного стока с ростом количества атмосферных осадков вне зависимости от площади водосборов (рисунок 4б).

3. Зависимость от литологических особенностей и геолого-структурных условий. Отмечается увеличение модуля подземного стока с появлением в составе пород карбонатных разностей, как правило, в различной степени закарстованных и обладающих более высокими фильтрационными свойствами и тектонической раздробленностью территории.

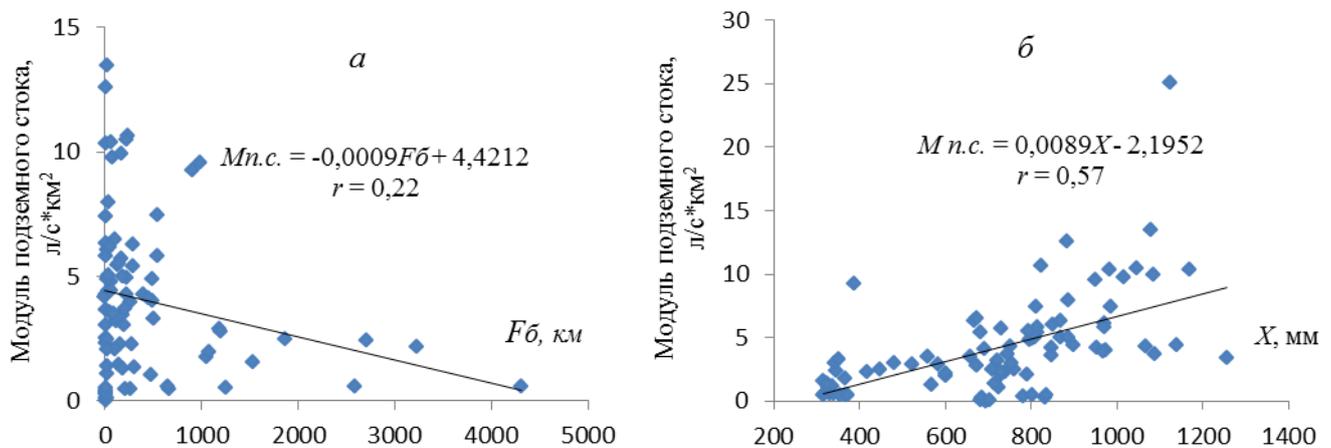


Рисунок 4. Изменение величины модуля подземного стока от размеров: а - площади водосбора ($F\bar{b}$); б - количества атмосферных осадков (X)

Естественные ресурсы подземных вод основных водоносных зон определены по балансовому уравнению:

$$\bar{Q} = \sum_{i=1}^n F_i M_i$$

где: \bar{Q} – среднееголетний подземный сток на замыкающем створе (определен с помощью переходных коэффициентов), л/с; F_i – площадь распространения водоносных зон в границах водосбора (определены по геологической карте масштаба 1:200000), км²; M_i – среднееголетние модули подземного стока соответствующих водоносных зон, л/с*км².

Результаты оценки подземного стока и его пространственное распределение представлены на карте естественных ресурсов подземных вод (рисунок 5) и в таблице распределения естественных ресурсов подземных вод (таблица 1).

Общая величина естественных ресурсов подземных вод исследуемой территории равна 100,29 м³/с при среднем значении модуля 3,67 л/с*км². Основные ресурсы подземных вод формируются в интрузивных образованиях AR-PZ. При общей площади водоносной зоны 10322 км² суммарная величина ресурсов составляет 41,74 м³/с или

41,62 % от общих ресурсов подземных вод исследуемой территории, что может быть обусловлено не только широким распространением интрузивных образований, но и высокой региональной (экзогенной) и тектонической трещиноватостью гранитоидов. Высокий модуль подземного стока осадочно-метаморфических образований $6,32 \text{ л/с*км}^2$ связан с наличием в них карбонатных разностей и отсутствием многолетнемерзлых пород. Также близко к среднему модуль стока в аллювиальных Q_4 и карбонатных $PR-C$ отложениях. Небольшая изменчивость модуля подземного стока для остальной территории указывает на то, что накопление и движение подземных вод осуществляется в породах с близкими фильтрационными свойствами в верхней трещиноватой зоне. В главе также рассмотрены условия формирования подземного стока в области развития многолетнемерзлых пород и в малых водосборах.

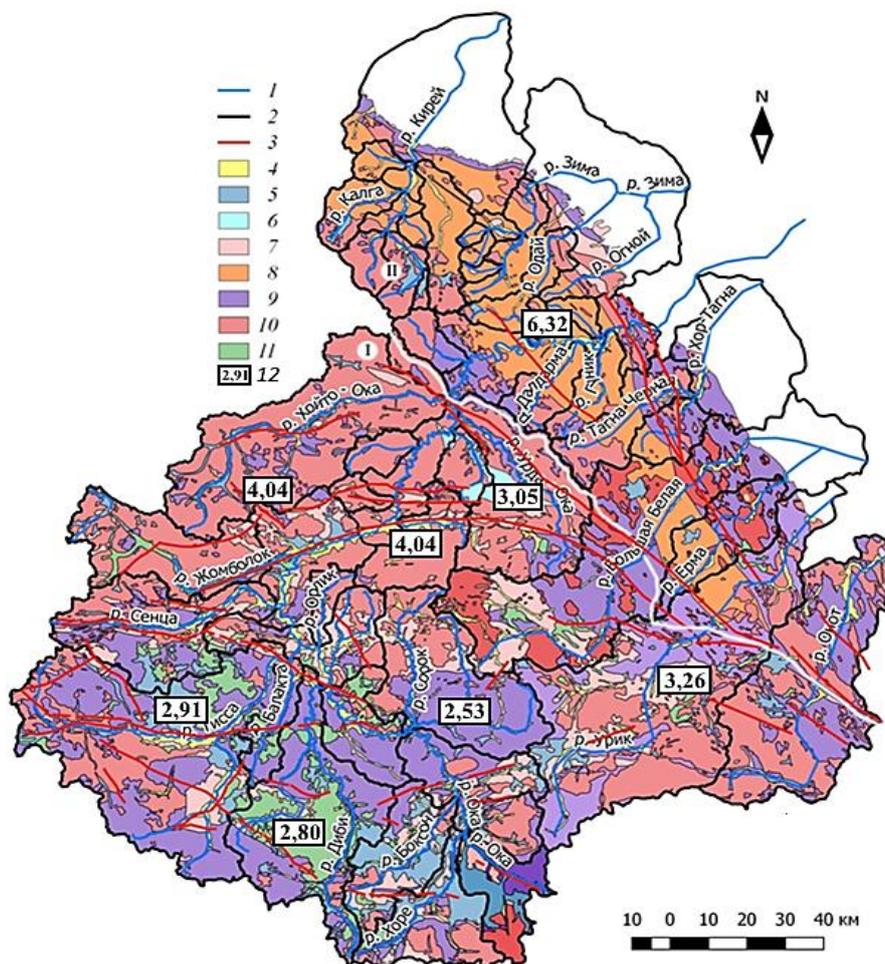


Рисунок 5. Карта природных ресурсов подземных вод центральной части Восточного Саяна (I – высокогорная часть, II – склоновая часть).

1 – реки; 2 – границы водосборов; 3 – тектонические нарушения; 4 – современный аллювиальный водоносный горизонт Q_4 ; 5 – водоносная зона средне-верхнечетвертичных ледниковых и водноледниковых отложений долин и водоразделов $Q_{2,3}$; 6 – водоносная зона юрских отложений J_{nr} ; 7 – водоносная зона трещиноватости протерозойских-нижнекембрийских карбонатных пород $PR-C$; 8 – водоносная зона осадочно-метаморфических нижнепротерозойских-нижнерифейских вулканогенно-терригенных флишевых пород Урикско-Ийского грабена PR_1-R ; 9 – водоносная зона архейско-протерозойских метаморфических пород Шарыжалгайского выступа, Бельско-Китойской, Гарганской, Хангарульской, Шутхулайской глыб и Окинского антиклинория $Ar-PR$; 10 – водоносная зона архейско-палеозойских интрузивных пород $Ar-PZ$; 11 – водоносная зона трещиноватости эффузивных пород $N-Q$; 12 – модуль подземного стока основных водоносных зон $M_{n.c.}$, л/с*км^2 .

Таблица 1. Распределение естественных ресурсов подземных вод по основным водоносным зонам

Водоносная зона		Общая площадь распространения (F)		Расход подземного стока (Q)		Модуль подземного стока (M _{п.с.})	Коэффициент водопроницаемости (T)
Образования	Возрастной индекс	км ²	%	м ³ /с	%	л/с·км ²	м ² /сут
Осадочные	Q ₄	1617	5,91	6,54	6,52	4,04	200-250
	Q ₂₋₃	1785	6,53	5,19	5,17	2,91	30-50
	J	95	0,35	0,29	0,29	3,05	20-60
	PR-С	2344	8,57	7,65	7,63	3,26	60-240
Осадочно-метаморфические	PR ₁ -R	2712	9,92	17,14	17,09	6,32	1-50
Метаморфические	Ar-PR	7131	26,01	18,01	17,96	2,53	2-20
Интрузивные	Ar-PZ	10322	37,76	41,74	41,62	4,04	5-24
Эффузивные	N-Q	1332	4,87	3,73	3,72	2,80	20
Итого:		27338	100	100,29	100	3,67	

Результаты исследований, изложенные в главах 2, 3, подтверждают **первое защищаемое положение:** в центральной части Восточного Саяна, наряду с общеизвестными закономерностями увеличения характеристик подземного стока с высотой местности, выявлены площади, на которых происходит как увеличение, так и уменьшение значений модуля подземного стока для высокогорных районов.

Глава IV. Оценка подземного стока

Для оценки подземного стока на исследуемой территории применен метод генетического расчленения гидрографа и гидрометрическая съемка зимней межени. В качестве реки-аналога использованы реки в замыкающих створах с достаточно длительными рядами наблюдений за речным стоком. В основу оценки подземного стока реки-аналога положен комплексный гидролого-гидрогеологический метод генетического расчленения речного гидрографа с учетом изъятия части стока на наледообразование (рисунок 6).

Для учета изъятия части стока на наледообразование проведена реконструкция гидрографов рек в зимний период по экспоненциальному уравнению, предложенному Буссинеском для описания интенсивности уменьшения дебита родников в периоды отсутствия питания подземных вод:

$$Q = Q_0 e^{-\alpha(t_2-t_1)}$$

$t = t_2 - t_1$ – период сработки запасов, с; Q – расход воды в период времени t , м³/с; α – коэффициент истощения, характеризующий скорость сработки запасов, с⁻¹. В начале кривой спада t равно нулю, Q будет равно Q_0 .

Разница между теоретической кривой и реальным гидрографом за зимний период будет равняться потерям речного стока на наледообразование.

Для бассейнов рек с отсутствием наблюдений за стоком потери на наледообразование определялись по эмпирической формуле Кравченко В.В., выведенной для рек горно-складчатого обрамления в зависимости от площади и высоты водосбора.

Для приведения данных зимней гидрометрической съемки к годовым и многолетним значениям использованы переходные коэффициенты, характеризующие соотношения подземного стока периода выполнения съемок с общей величиной годового стока.

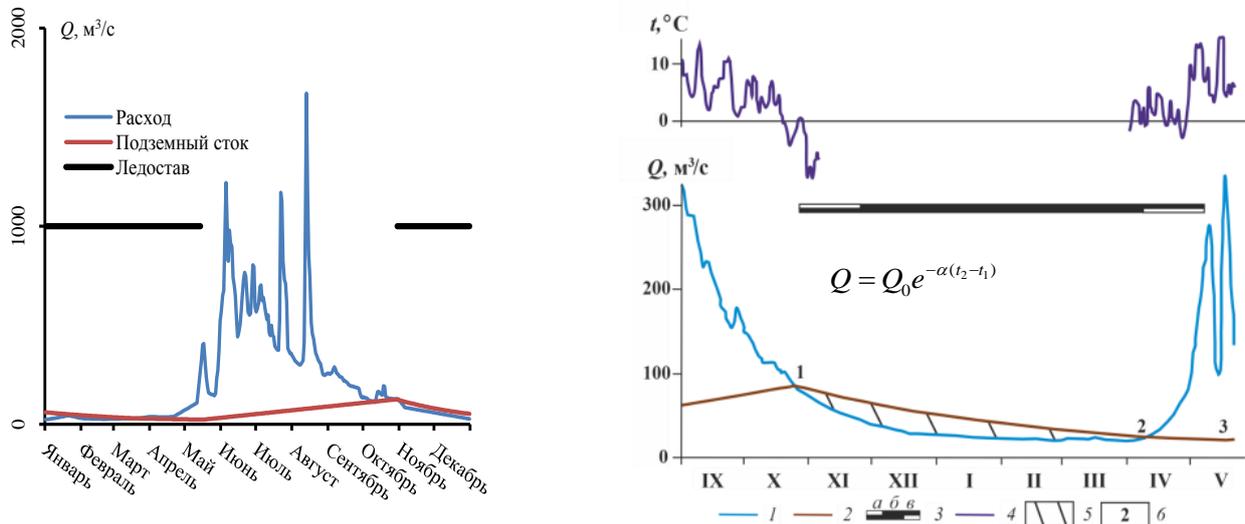


Рисунок 6. Определение подземного стока р. Ока в створе п. Сарам по гидрографу речного стока. 1 – речной сток; 2 – подземный сток; 3 – ледовая обстановка (а – начало ледовых явлений, забереги; б – ледостав; в – конец ледовых явлений, ледоход); 4 – температура воздуха; 5 – потери речного стока на наледообразование; б – переломные точки.

Правомерность использования для расчетов многолетних значений подземного стока данных единичных измерений расходов воды и точность получаемых результатов обеспечивается производством работ в периоды, когда речной сток сформирован за счет подземных вод, то есть является генетически однородным.

Среднемноголетний подземный сток, определенный по гидрографу речного стока с учетом наледообразования для замыкающего створа р. Ока-п. Сарам составил 54,3 м³/с. Суммарный подземный сток притоков р. Ока, полученный при помощи приводки эпизодических измерений к многолетним, равен 55,5 м³/с.

Относительная ошибка метода переходных коэффициентов составляет всего 2,2 %, что говорит о высокой точности произведенных работ и применимости данного метода для исследуемой территории.

Возможность использования в качестве аналога стационарных гидрометрических створов, замыкающих бассейн, рассмотрена на примере данных двухлетних наблюдений за стоком в бассейне реки Зимы ниже стрелки рек Черная и Белая Зима и на стационарном створе Зулумай, а также на примере совместных многолетних наблюдений за стоком в бассейне р. Ока на верхнем створе р. Орлик-п. Орлик и замыкающем створе р. Ока-п. Сарам. Результаты корреляционного и регрессионного анализов указывают на высокую, близкую к линейной, степень связи между средними месячными значениями расходов подземного стока независимого периода приводимых рек с рекой-аналогом. Учитывая подобные условия формирования и синхронность

многолетних колебаний стока, а также высокий коэффициент парной корреляции значений стока рек Ока и Орлик, Зима и Зима ниже стрелки Белой и Черной Зимы, выбор в качестве аналога реки в замыкающем створе достаточно обоснован.

Данные по подземному стоку, полученные для замыкающих горно-складчатую область створов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Данные по подземному стоку для рек центральной части Восточного Саяна

Река – Створ	Дата замера	Измеренный меженный расход Q , м ³ /с	Среднегололетний меженный расход Q , м ³ /с	$Q_{\text{ср.мнг.}}$ наледный по эмпирической формуле, м ³ /с	$Q_{\text{ср.мнг.}}$ наледный гидрограф, м ³ /с	$Q_{\text{ср.мнг.}}$ подземный с потерями, м ³ /с	Средняя высота водосбора H , м	Площадь водосбора F , км ²	M , л/с*км ²
р. Ока – Сарам*	-	-	45,5	-	8,9	54,4	1970	18534	2,93
р. Зима – граница с платформой	17.12.1988	2,35	2,90	0,40	-	3,30	1004	484	6,81
р. Одай – граница с платформой	16.12.1990	0,78	0,80	0,10	-	0,90	993	138	6,10
р. Хор-Тагна – граница с платформой	14.12.1990	4,12	3,83	0,67	-	4,50	1282	753	5,90
р. Кирей – выше устья Ярмы	17.12.1990	9,06	10,75	1,75	-	12,5	1232	978	12,7
р. Ярма – устье	17.12.1990	1,63	1,98	0,32	-	2,30	1078	394	5,80
р. Бол.Белая – граница с платформой	15.12.1990	6,50	6,55	1,24	-	7,79	1440	2600	3,00
р. Ерма – устье	18.12.1990	3,83	2,94	0,56	-	3,50	1281	548	6,38
р. Урик – Шанхар	18.12.1990	8,77	9,32	-	1,78	11,1	1870	3230	3,45
Суммарный сток	-	-	84,57	15,72	-	100,29	-	-	-

* – среднегололетние данные по гидрографу речного стока

Подземный сток выражен величиной модуля стока, который имеет дискретный характер пространственного распределения и изменяется в широких пределах (0,5 – 25,0 л/с*км²), в связи с чем отображен на карте по площадному принципу (рисунок 7).

Дискретность проявляется в контрастных изменениях модуля подземного стока на коротком в плане расстоянии, являющихся следствием резкой изменчивости фильтрационно-емкостных свойств пород, связанных с появлением в них карбонатных пород-коллекторов, разной степенью тектонической и экзогенной трещиноватости пород. Контрастность рельефа предопределяет неравномерность распределения общего увлажнения территории, различные морфологические и морфометрические характеристики часто в смежных водосборах.

Результаты исследований, изложенные в главах 3, 4, подтверждают **второе защищаемое положение:** характеристики подземного стока имеют в целом дискретный характер распределения. Наблюдаемые значения модулей подземного стока симбатны количеству атмосферных осадков и не зависят от площади водосбора.

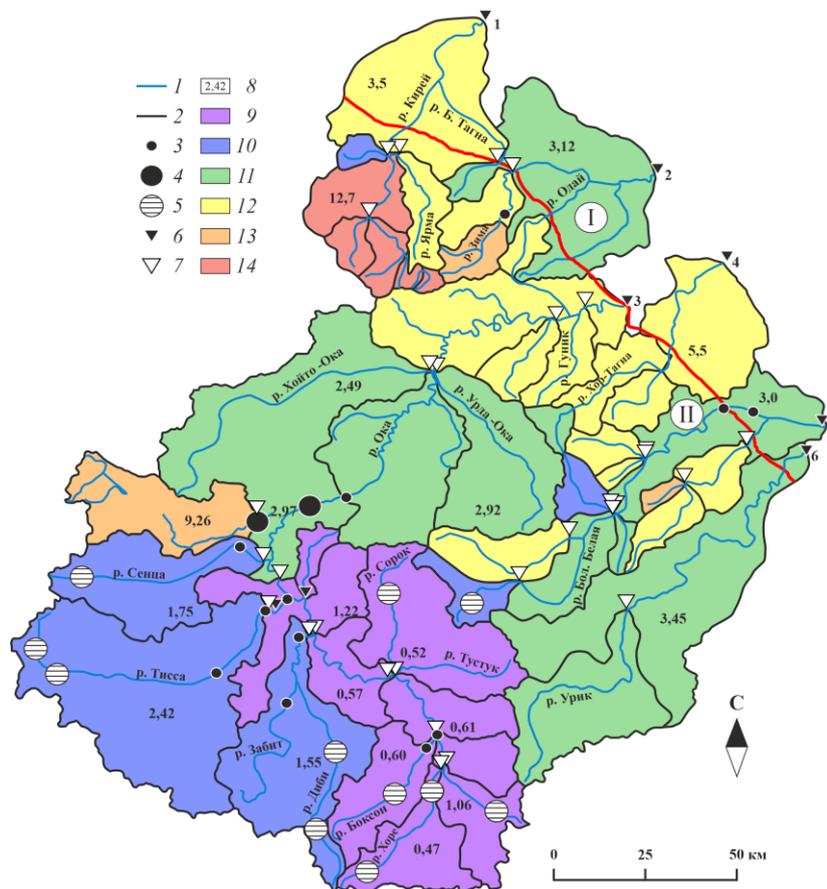


Рисунок 7. Карта подземного стока центральной части Восточного Саяна

I – Сибирская платформа, II – горно-складчатое обрамление

I – реки; 2 – границы речных водосборов. Участки наибольшего развития полей (по Зонову Б.В., Шульгину М.Ф., 1966 с дополнениями авторов): 3 – длиной от 1 до 2 км; 4 – длиной более 5 км; 5 – участки развития крупных наледей; 6 – стационарный гидрологический пост: 1 – р. Кирей-Уйгат; 2 – р. Зима-Зулумай; 3 – р. Ока-п. Сарам, 4 – р. Тагна-Хор-Тагна; 5 – р. Большая Белая-Новостройка, 6 – р. Урик-Шанхар. 7 – разовый гидрометрический створ; 8 – значение модуля подземного стока, л/с*км²: 9 – от 0,5 до 1,5 (весьма низкий); 10 – от 1,5 до 2,5 (низкий); 11 – от 2,5 до 3,5 (средний); 12 – от 3,5 до 7,0 (высокий); 13 – от 7,0 до 10 (весьма высокий); 14 – более 10 (исключительно высокий).

Глава V. Многомерный анализ процессов формирования подземного стока

Районирование исследуемой территории по условиям формирования и распределения подземного стока проведено на основе построения факторной и кластерной модели, а также с использованием метода множественной регрессии. Факторный анализ дает нам возможность провести классификационные построения без использования мер сходства и разграничения группировок, а использование факторных поверхностей для районирования территории по условиям формирования подземного стока выглядит целесообразным, так как такие поверхности носят комплексный характер и отражают комбинации признаков.

На исследуемой территории по факторным нагрузкам, рассчитанным для каждого из 89 речных бассейнов, выделяется два округа Окинский (высокогорная часть) и Присяянский (склоновая часть) (рисунок 8). Для исследуемого региона пространственная изменчивость подземного стока контролируется величиной атмосферных осадков X в совокупности с горизонтальным расчленением рельефа S и уклонами русел рек I_p ответственными за темпы водообмена и степень промытости

горных пород. Локальные вариации подземного стока связаны с воздействием высотного положения речных бассейнов H_b и русел рек H_p , а, следовательно, и вертикального расчленения рельефа H_{gp} .

В основу кластерного анализа положен принцип разбиения исходного множества объектов на группы (кластеры) с помощью критерия оптимальности. Результат кластеризации представляется в виде таксономического дерева – дендрограммы, которая представляет собой граф, напоминающий дерево и используемый для графического изображения взаимных связей между объектами из заданного множества. Иерархический уровень расположения объектов подчеркивает степень их сходства на основе измеряемых признаков.

В конечной схеме районирования можно принять деление на два класса при мере сходства $\rho = 0,42$. Большинство объектов (77 из 89) объединились при достижении этой меры сходства. На этом уровне классификации в один класс объединились речные бассейны Окинского плоскогорья – Окинский округ (с верховьями рек Большая Белая, Урик) и склоновой части – Присяянский округ от зоны Главного Саянского разлома до выхода на платформу (рис. 8). Бассейны рек Хара, Буйрагта, Ермосха, находящиеся на стыке выделенных классов, не принадлежат ни к одному из них и объединяются с ними в один единственный класс, при более высоких мерах сходства $\rho = 0,44 - 0,66$. Бассейн реки Ока в замыкающем створе Сарам (самый крупный по площади водосбора) завершает иерархические построения, объединяя все 89 речных бассейнов при мере сходства $\rho = 1,00$.

Методика построения регрессионных моделей основана на методе исключения и методе полного перебора признаков с расчетом их детерминированного вклада. В результате проведенного регрессионного анализа для четырех районов исследуемой территории составлены уравнения множественной регрессии (таблица 3), позволяющие прогнозировать прямые показатели подземного стока ($M_{n.c.}$) в зависимости от косвенных признаков, описывающих процесс формирования подземного стока на водосборе. Верховья рек Большой Белой и Урика не вошли ни в один район, но сформировать отдельный район не представляется возможным в виду ограниченности числа членов ряда (всего 4 речных бассейна), однако при более детальных исследованиях такое обособление вполне вероятно. В результате использования многомерных моделей (факторный анализ, кластерный анализ) исследуемая территория по условиям формирования и распределения подземного стока разделена на два округа Окинский и Присяянский. Окинский округ охватывает бассейны рек в верховьях рек Ока, Большая Белая, Урик и характеризуется в основном невысокими модулями подземного стока, умеренным количеством атмосферных осадков, связанных с закрытостью территории горными хребтами, развитием многолетнемерзлых пород, небольшими уклонами русел рек Окинского плоскогорья. Средние высоты бассейнов рек 1700 м и выше.

Несмотря на неблагоприятные условия, формирование и разгрузка подземного стока происходит в течение всего года и не прекращается в зимний межсезонный период.

Суровые климатические условия и сплошное развитие многолетнемерзлых пород способствуют широкому распространению наледных явлений, тем не менее,

многочисленные сквозные и несквозные талики обеспечивают питание подземных вод и их взаимосвязь с поверхностными водами.

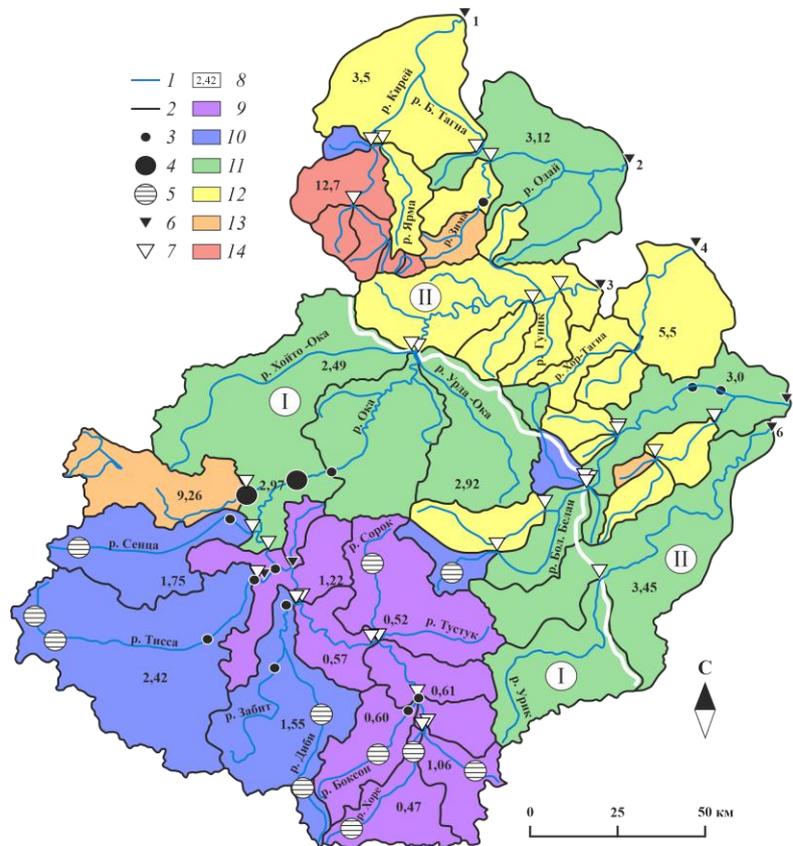


Рисунок 8. Районирование центральной части Восточного Саяна по результатам факторного и кластер-анализа Q – типа. I – Окинский округ, II– Присяянский округ.

Таблица 3. Уравнения множественной регрессии для прогнозируемых районов Восточного Саяна

№ района на карте	Прогнозируемый район	Уравнение множественной регрессии	Коэффициент корреляции	Ошибка прогноза, %
I	Бассейны верхнего течения р. Ока	$M_{прог.} = 3,05 + 0,006H_6 - 0,008H_p + 0,006I_6 - 0,005K + 0,003X$	0,71	26,7
II	Бассейны среднего течения р. Ока	$M_{прог.} = - 0,0041H_6 + 10,819$	- 0,96	8,68
III	Бассейны рек Кирей и Зима	$M_{прог.} = 0,095 + 0,027H_6 + 0,025H_p + 0,019I_p - 12,00S - 1,40K_{mp.} + 0,0042X$	0,75	21,5
IV	Бассейны рек Большой Белой, Тагны, Урика	$M_{прог.} = 15,95 - 0,009H_6 + 0,0046 H_p + 0,05I_p + 16,48 S - 4,97D - 0,0048X - 8,7K_{mp.}$	0,79	18,7

Присяянский округ занимает склоновую часть исследуемой территории и охватывает бассейны рек Кирей, Белая Зима, средние течения рек Ока, Большая Белая и Урик. Он характеризуется значительным количеством атмосферных осадков 600 мм и выше, отсутствием сплошного развития многолетнемерзлых пород, большими

значениями эрозионных врезов и уклонов русел рек, то есть признаками, обеспечивающими высокие модули подземного стока.

Результаты исследований, изложенные в главе 5, подтверждают *третье защищаемое положение*: на основании установленных закономерностей распределения подземного стока в центральной части Восточного Саяна выделены два округа – Окинский и Присяянский. Первый охватывает высокогорную часть складчатого сооружения, второй – выступ фундамента Сибирской платформы. Естественная граница между округами проходит по зоне Главного Саянского разлома.

Заключение

В представляемой диссертационной работе рассмотрена возможность применения существующих методов и методических приемов оценки и картирования подземного стока для сложных гидрогеологических условий горно-складчатых областей и обоснована методика определения величины подземного стока на основе комплексного гидролого-гидрогеологического метода с использованием гидрометрической съемки зимней межени, позволяющая по эпизодическим наблюдениям определить характеристики стока неизученных рек.

Использованная для исследований методика позволила определить среднемноголетние величины подземного стока, морфометрические характеристики для 89 бассейнов рек и выявить основные особенности его формирования и распределения, связанные с геолого-структурными и гидрогеологическими условиями исследуемой территории. Подземный сток центральной части Восточного Саяна в среднемноголетнем разрезе составил $100,29 \text{ м}^3/\text{с}$ при среднем модуле $3,67 \text{ л/с*км}^2$. Распределение подземного стока носит дискретный характер, на фоне которого достаточно отчетливо проявляются определенные закономерности: изменение модуля подземного стока с высотой бассейна; влияние количества атмосферных осадков на величину подземного стока; независимость относительной величины подземного стока от площади водосбора. Эти зависимости подземного стока отражают общую направленность процесса на региональном уровне. Подземный сток частных водосборов, при прочих равных условиях, определяется, главным образом, их гидрогеологическими условиями, обусловленными особенностями геолого-тектонического строения, литологического состава пород, морфологии и климата, то есть основными факторами формирования подземных вод региона.

Методический подход, примененный при оценке подземного стока центральной части Восточного Саяна, может быть рекомендован и для других регионов, находящихся в сходных структурно-гидрогеологических условиях.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации:

Работы в рецензируемых изданиях из перечня ВАК

1. Бадминов П.С. Поиски гидрогеотермальных резервуаров геофизическими методами в Монголо-Байкальском регионе / П.С. Бадминов, Д. Сурмаажав, А.Ю. Ескин, М.С. Шкиря // Науки о Земле и недропользование. – 2020. – № 1. – С. 36–49.

2. **Бадминов П.С.** Подземный сток бассейна реки Ока (Восточный Саян) / П.С. Бадминов, А.И. Оргильянов, С.Х. Павлов и др. // География и природные ресурсы. – 2020. – № 2. – С. 127–134.
3. **Бадминов П.С.** Подземный сток центральной части Восточного Саяна, основные особенности его формирования и распределения / П.С. Бадминов, С.Х. Павлов, В.Е. Дмитриев-Добровольский, А.И. Оргильянов // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. – 2019. Т. 42, – № 1. – С. 27–40.
4. **Бадминов П.С.** Окинская гидротермальная система (Восточный Саян) / П.С. Бадминов, А.В. Иванов, Б.И. Писарский, А.И. Оргильянов // Вулканология и сейсмология. – 2013. – № 4. – С. 27–39.
5. **Бадминов П.С.** Оценка глубинных температур термальных источников Хангая и Восточного Саяна с помощью гидрохимических геотермометров / П.С. Бадминов, Д. Ганчимэг, А.И. Оргильянов и др. // Вестник Бурятского государственного университета, Химия, физика. – № 3, 2011, Улан-Удэ. – С. 90–94.
6. Павлов С.Х. Геологические факторы и физико-химические процессы формирования подземных вод Тункинской впадины / С.Х. Павлов, К.В. Чудненко, В.А. Голубев, А.И. Оргильянов, **П.С. Бадминов** и др. // Геодинамика и тектонофизика. – 2018. Том. 9, – №1. – С. 221–248.
7. Вилор Н.В. Комплексное применение геолого-геофизических методов при изучении геотермальных ресурсов в Южном Прибайкалье (Восточная Сибирь, Иркутская область) / Н.В. Вилор, Ю.А. Давыденко, М.С. Шкиря, М.А. Вилор, **П.С. Бадминов** и др. // Отечественная геология. – 2018. – № 1. – С. 69–81.
8. Вилор Н.В. Поиски геотермальных ресурсов в Южном Прибайкалье при комплексном использовании геолого-геофизических методов / Н.В. Вилор, **П.С. Бадминов**, А.Е. Будяк и др. // Разведка и охрана недр. – 2017. – №7. – С. 57–61.

Публикации в других изданиях

9. **Бадминов П.С.** Методика оценки подземного стока в реках складчатых областей (на примере Белозиминского водозабора в Восточных Саянах) // Геология Восточной Сибири. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 1994. – С. 98–101.
10. **Бадминов П.С.** Новые данные о минеральных водах западной части Восточного Саяна / П.С. Бадминов, А.И. Оргильянов, Б.И. Писарский // Сборник научных трудов «Гидроминеральные ресурсы Восточной Сибири». – Иркутск: ИрГТУ, 2001. – С. 6–14.
11. **Бадминов П.С.** Естественные ресурсы подземных вод / П.С. Бадминов, И.Г. Крюкова, А.И. Оргильянов // Экологический атлас бассейна озера Байкал. – Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2015, карта №44, М 1:5000000. – С. 59.
12. **Бадминов П.С.** Подземные воды / П.С. Бадминов, И.Г. Крюкова, А.И. Оргильянов // Экологический атлас бассейна озера Байкал. – Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2015, карта №28, М 1:5000000. – С. 32.
13. Китов А.Д. Вторая 2014 года экспедиция на Мунку-Сардык и сезонные особенности прохождения / А.Д. Китов, К.А. Вишняков, **П.С. Бадминов** и др. // Вестник кафедры географии Вост.-Сиб. Гос. Академии образования, – Иркутск, 2014. № 2-3 (10). – С. 73–79.

Публикации в материалах совещаний и конференций

14. **Бадминов П.С.** Изменчивость гидрометеорологических параметров на территории Восточного Саяна // Тезисы доклада к XV конфер. молодых научных сотрудников по геологии и геофизике Восточной Сибири. – Иркутск. – 1992. – С. 20–21.
15. **Бадминов П.С.** Основные закономерности пространственно-временного распределения подземного стока в северо-восточной части Восточного Саяна. // Мат-лы Всеросс. совещ. по подземным водам Востока России (XIV совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока). – Иркутск. – 1994. – С. 73.
16. **Бадминов П.С.** Формирование подземного стока в бассейне р. Боксон в области развития многолетнемерзлых пород (Восточный Саян) / П.С. Бадминов, В.Е. Дмитриев-Добровольский,

А.В. Грозин // Мат-лы Всеросс. науч.-практич. конфер. «Геонауки 2019». – Иркутск. – 2019. – С. 26–30.

17. **Бадминов П.С.** Подземный сток Окинской впадины (Восточный Саян) / П.С. Бадминов, А.И. Оргильянов, В.Е. Дмитриев-Добровольский // Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии. Сборник докладов междунар. научн. конфер. памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова. Под редакцией О.М. Макарьевой. – СПб: Наукоемкие технологии, 2018. – С. 532–537.

18. **Бадминов П.С.** Подземный сток бассейна р. Оки в пределах горноскладчатой области (Восточный Саян) / П.С. Бадминов, А.И. Оргильянов, С.Х. Павлов, В.Е. Дмитриев-Добровольский // Подземные воды Востока России: мат-лы Всеросс. совещ. по подземным водам Востока России (XXII Совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с междунар. участием), Новосибирск, 18-22 июня 2018г. [отв. ред.: Д.А. Новиков, С.В. Алексеев, А.Ф. Сухорукова]. – Новосибирск: ИПЦНГУ, 2018. – С. 57–62.

19. **Бадминов П.С.** Окинская гидротермальная система / П.С. Бадминов, А.В. Иванов // Подземные воды Востока России: мат-лы Всеросс. совещ. по подземным водам Востока России с междунар. участием (XIX Совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока), Тюмень, 22-25 июня 2009 г. [отв. ред. В.М. Матусевич]. – Тюмень: Тюменский дом печати, 2009. – С. 315–317.

20. **Бадминов П.С.** Формирование минеральных вод западной части Восточного Саяна (по изотопным данным) / П.С. Бадминов, Б.И. Писарский, А.И. Оргильянов, Л.В. Хабарин // Мат-лы Всеросс. совещ. по подземным водам Востока России (XVII Всеросс. совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока). – Красноярск: ИрГТУ, 2003. – С. 42–44.

21. **Бадминов П.С.** Минеральные воды на водоразделах Восточного Саяна / П.С. Бадминов, А.И. Оргильянов, Г.М. Шпейзер // Тезисы докладов Всеросс. совещ. по подземным водам Востока России (XVI Совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока). – Новосибирск, 2000. – С. 135.

22. Демонтерова Е.И. Источники растворенного вещества термальных вод в районе проявления четвертичного вулканизма Восточного Саяна: вариации $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ в травертинах / Е.И. Демонтерова, **П.С. Бадминов**, А.В. Иванов, А.И. Оргильянов и др. // Изотопная геохронология в решении проблем геодинамики и рудогенеза: мат-лы II Росс. конфер. по изотопной геохронологии. – Санкт-Петербург, 2003. – С. 142–144.

23. Pisarsky B.I. Formation and evolution of hydromineral systems in Mongol-Baikalian region and prospect assessment of the resources use / B.I. Pisarsky, A.I. Orgilyanov, **P.S. Badminov** // Groundwater Quality Sustainability. XXXVIII IAN Congress, – Krakow, University of Silesia, 2010. – P. 444–445.

24. Pisarsky B.I., Brandt I.S., Brandt S.B., Ivanov A.I., Rasskazov S.V., Orgilyanov A.I., **Badminov P.S.** Different behavior of helium in ground waters of the Baikal and Mongolia regions / B.I. Pisarsky, I.S. Brandt, S.B. Brandt, A.B. Ivanov, S.V. Rasskazov, A.I. Orgilyanov, **P.S. Badminov** // Groundwater flow understanding from local to regional scales. XXXIII IAN Congress, – Mexico, 2004. – P. 351–355.