

Оригинальная статья / Original article

УДК 556.3

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-1-27-40>

Подземный сток центральной части Восточного Саяна, основные особенности его формирования и распределения

© П.С. Бадминов^a, С.Х. Павлов^b,
В.Е. Дмитриев-Добровольский^c, А.И. Оргильянов^d

^{a,b,d}Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация

^cИркутский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Резюме: Цель данной статьи заключается в определении подземного стока и выявлении основных особенностей его формирования и распределения по территории центральной части Восточного Саяна. Определение подземного стока рек исследуемой территории, имеющих временные ряды наблюдений за речным стоком, проводилось методом генетического расчленения гидрографов рек с учетом изъятия части стока на наледообразование. Для неизученных рек подземный сток определялся методом переходных коэффициентов по единичным расходам воды, полученным при проведении гидрометрической съемки зимней межени. Основные особенности формирования и распределения подземного стока выявлены в ходе корреляционного анализа величин подземного стока с основными стокоформирующими признаками. В результате впервые для большой труднодоступной территории был оценен подземный сток, рассмотрены особенности его формирования и пространственного распределения. На исследуемой территории модуль подземного стока изменяется в широких пределах от 0,5 до 25 л/(с·км²) и имеет свои особенности. На одних участках – в бассейнах р. Кирей и Ярма – происходит увеличение модуля стока с высотой местности, на других – в смежном бассейне р. Ока – модуль стока уменьшается, на третьих – в бассейне р. Большая Белая – эта связь выражена не столь ярко. Также не проявляется связь величины подземного стока с площадью водосбора, так как высокая расчлененность рельефа центральной части Восточного Саяна приводит к тому, что размеры площади водосбора не всегда являются показателем глубины эрозийного вреза русла. Особенности формирования и распределения подземного стока исследуемой территории обусловлены ландшафтно-климатическими условиями, в первую очередь распределением атмосферных осадков, и гидрогеологическими условиями конкретных водосборов, определяющихся геолого-структурными особенностями и характером развития многолетнемерзлых пород на разных участках исследуемой территории.

Ключевые слова: подземный сток, площадь водосбора, атмосферные осадки, модуль подземного стока, распределение подземного стока

Информация о статье: Дата поступления 18 января 2019 г.; дата принятия к печати 19 февраля 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 марта 2019 г.

Для цитирования: Бадминов П.С., Павлов С.Х., Дмитриев-Добровольский В.Е., Оргильянов А.И. Подземный сток центральной части Восточного Саяна, основные особенности его формирования и распределения. *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. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-27-40.

Underground runoff of the central part of the Eastern Sayan, its main formation and distribution features

© Prokopii S. Badminov^a, Sergey Kh. Pavlov^b,
Vladislav E. Dmitriev-Dobrovolsky^c, Aleksey I. Orgilianov^d

^{a,b,d}Institute of the Earth's crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

^cIrkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: The purpose of this paper is determination of underground runoff and identification of its main formation and distribution features in the central part of the Eastern Sayan. The groundwater runoff of rivers in the area under investigation having time series of river runoff observations was carried out by the method of genetic separation of runoff hydrographs considering the withdrawal of a part of the runoff to icing. The underground runoff of the

unexplored rivers was determined by the method of transition coefficients for unit water flows obtained at a hydro-metric survey of winter low flow. The main formation and distribution features of the underground runoff were identified in the course of the correlation analysis of underground runoff values with the main flow-forming characteristics. As a result, it is the first time when the underground runoff is estimated for a large, hard-to-reach territory. Consideration is given to its formation and spatial distribution features. The rate of the underground runoff in the studied area varies widely from 0.5 l/(s·km²) to 25 l/(s·km²) and has its own features. In some areas (the Kirei and Yarma river basins) the runoff rate increases with the height of the terrain. In the others, (the adjacent basin of the river Oka) the runoff rate decreases, and in some areas (the basin of the river Bolshaya Belaya) this relationship is not so distinctive. Also, the relationship between the amount of the underground runoff and the drainage area does not manifest itself, since the great roughness of the relief in the central part of the Eastern Sayan leads to the fact that the size of the drainage area is not always indicative of the depth of the erosion cutting of the channel. The formation and distribution features of the underground runoff in the studied area are specified by the landscape-climatic conditions, primarily by the distribution of precipitation and hydrogeological conditions of specific drainages determined by geological and structural features and the nature of permafrost development in different areas of the studied area.

Keywords: underground runoff, drainage area, precipitation, rate of underground runoff, underground runoff distribution

Information about the article: Received January 18, 2019; accepted for publication February 19, 2019; available online March 28, 2019.

For citation: Badminov P.S., Pavlov S.Kh., Dmitriev-Dobrovolsky V.E., Orgilianov A.I. Underground runoff of the central part of the Eastern Sayan, its main formation and distribution features. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* = *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*, 2019, vol. 42, no. 1, pp. 27–40. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-27-40.

Введение

Подземные воды являются одним из важнейших природных ресурсов. Формирование основной части подземного стока территории Присяянья происходит в горноскладчатой области (Восточный Саян), поэтому количественное определение величины подземного стока центральной части Восточного Саяна позволяет оценить обеспеченность региона подземными водами, а также выявить особенности и характер его пространственного распределения.

Центральная часть Восточного Саяна охватывает Окинское плоскогорье с окружающими хребтами Большой Саян, Окинский хребет и склоны Передового горного хребта, представляющего собой горноскладчатое обрамление Сибирской платформы. Исследованием особенностей распределения и формирования подземного стока этой труднодоступной территории практически не занимались. В связи с необходимостью изучения гидрогеологических и инженерно-геологических условий Боксонского месторожде-

ния бокситов подземный сток был исследован на ограниченном участке в верховьях р. Ока [1]. Оценка величины подземного стока на региональном уровне путем его выделения на гидрографах рек проведена в работах [2–4]. На карте подземного стока территории СССР [2] на основе свойственной горным странам высотной поясности атмосферных осадков показано увеличение модуля подземного стока с высотой местности. В работах [3, 4] дается обратная зависимость модуля подземного стока от высоты, а решающая роль отводится многолетнемерзлым породам, способствующим развитию наледных явлений. Наиболее общие закономерности формирования подземного стока в горноскладчатых областях Байкальского региона рассматривались Б.И. Писарским [5] с выделением поясности подземного стока.

Целью данных исследований является количественное определение подземного стока центральной части Восточного Саяна с использованием методик, применимых к горноскладчатым обла-

стям [3, 5–9], и выявление основных особенностей его пространственного распределения и формирования.

Исследуемый район целиком находится на территории Алтае-Саянского нагорья в центральной части Восточного Саяна и включает среднее и верхнее течение р. Ока, Большая Белая, Урик, Ерма, Тагна, Зима и Кирей (бассейн р. Ангара), сток которых формируется главным образом за счет атмосферных осадков (рис. 1).

Реки отличаются невысоким половодьем, устойчивой летне-осенней и очень низкой зимней меженью. На наиболее крупных реках в течение года наблюдаются два паводка – весенний и летний, последний более значительный и приходится на июль-август. Ледовый покров

устанавливается с начала ноября по конец апреля. Все мелкие реки перемерзают с образованием русловых наледей.

Основу геологического разреза исследуемой территории составляют сильно дислоцированные метаморфические породы архей-протерозоя. Они представлены мраморами, гнейсами и кристаллическими сланцами в нижней части разреза и метаморфическими сланцами, слагающими его верхнюю часть. Эти толщи прорваны гранитоидными интрузиями преимущественно палеозойского возраста. Большую перестройку территория претерпела в мезокайнозой, когда древнее основание было вовлечено в горообразовательные процессы, сопровождавшиеся базальтовым вулканизмом и накоплением осадков.



Рис. 1. Обзорная карта региона (штриховка с контуром – район исследований)
Fig. 1. Overview map of the region (research area is marked by hatching)

Широкое развитие на исследуемой территории получили многолетнемерзлые породы. Для низкогогорья и среднегогорья характерно островное распространение многолетнемерзлых пород (мощность 10–30 м). Выше гипсометрической отметки 1800–1900 м развит сплошной слой многолетнемерзлых пород мощностью до 200 м и более [10], который препятствует инфильтрации атмосферных осадков и определяет большую роль наледного регулирования в этой зоне [11]. Образование наледей определяется не только суровыми климатическими условиями, наличием многолетней мерзлоты, но и достаточно высокими запасами подземных вод.

Основными областями формирования подземных вод являются горные массивы, а общее количество и площадное распределение атмосферных осадков, выпадающих в горах (800–1000 мм), более чем достаточно для формирования их ресурсов. Несмотря на значительную мощность многолетнемерзлых пород, по тектонически ослабленным зонам развиты талики, по которым происходит питание, движение и разгрузка подземных вод, особенно если это связано с наличием карбонатных отложений, благоприятствующих накоплению в них подземных вод.

Методы исследований

В настоящее время методы оценки подземного стока достаточно хорошо освещены в работах [6, 7, 12–15], однако для оценки подземного стока исследуемой территории имеющийся фактический материал позволяет применить только методы генетического расчленения гидрографа и гидрометрической съемки зимней межени. Использование меженных гидрометрических съемок актуально для количественной оценки подземного стока при отсутствии или ограниченных данных наблюдений за стоком рек [8]. Единичные замеры расходов воды в зимний меженный период произведены на 90 разовых

гидрометрических створах. В пределах Окинского плоскогорья (верховье р. Ока) зимняя гидрометрическая съемка была проведена в 2015–2016 гг. Меженные расходы притоков р. Ока в ее среднем течении (склоновая часть Восточного Саяна), Урик, Большая Белая, Тагна, Ерма определены в ходе авиадесантных работ в декабре 1990 г. Меженные расходы р. Кирей, Зима и их притоков определялись неоднократно в течение 1988–1990 гг. Бассейны рек из-за сложности геологического строения являются гетерогенными, поэтому створы размещались в устьях почти всех малых притоков и по возможности на главной реке для взаимного контроля каждого измеренного расхода совокупностью предшествующих измерений и выяснения мест притока подземных или поглощения речных вод.

При обработке результатов гидрометрических съемок основная задача заключается в трансформировании единичных расходов воды в среднее значение для данного месяца, года и многолетнее для получения расчетных характеристик [9]. В качестве рек-аналогов приняты основные дрены территории с достаточно длительными рядами наблюдений за речным стоком в замыкающих створах. В основу оценки подземного стока рек-аналогов положен метод генетического расчленения речного гидрографа [6], рассматривающий различные схемы дренирования реками водовмещающих пород. Процедуре расчленения и реконструкции подверглись более 200 фактических гидрографов, принадлежащих расчетным водосборам р. Ока – п. Сарам, р. Орлик – п. Орлик, р. Тисса – п. Балакта, р. Кирей – п. Уйгат, р. Зима – п. Зулумай, р. Тагна – п. Хор-Тагна, р. Большая Белая – п. Инга, р. Урик – п. Шанхар. Для учета изъятия части стока на наледообразование проведена реконструкция гидрографов рек в зимний период по экспоненциальному уравнению регрессии, предложенному Ж.В. Буссинеском для описания

интенсивности уменьшения дебита родников в периоды отсутствия питания подземных вод [8]:

$$Q = Q_0 e^{-at},$$

где $t = t_2 - t_1$ – период сработки запасов, с; Q – расход воды в период времени t , м³/с; a – 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 составляет потери речного стока на наледообразование. Анализ гидрографов рек в зимний период показывает, что на нисходящей ветви выделяется до трех самостоятельных участков. Подобный характер строения нисходящей ветви гидрографа выявлен при детальном исследовании стока сезонно-талого слоя малых горных рек бассейна р. Колыма [16, 17]. В результате этих исследований установлено, что формирование таких самостоятельных участков связано с различиями в условиях водоотдачи пород, слагающих верхнюю часть разреза бассейна. Направленный процесс уменьшения мощности сезонно-талого слоя в ноябре-декабре завершается его перемерзанием, и в дальнейшем реки питаются подмерзлотными и надмерзлотными водами таликовых зон. Например, в долине р. Боксон в аллювиальных отложениях есть участки, где сезонная и многолетняя мерзлота полностью не смыкается и надмерзлотные воды существуют в жидком виде круглый год [1, 11]. В устьевых частях крупных притоков и на самом магистральном водотоке авторами прослежено значительное развитие полыней в течение всего зимнего периода, что свидетельствует о существовании постоянных подрусловых таликов.

Для бассейнов рек, у которых отсутствуют наблюдения за стоком, потери на наледообразование определялись по эмпирической формуле В.В. Кравченко [18], предложенной для центральной части

Восточного Саяна в зависимости от площади и высоты водосбора:

$$h_{\Pi/F_{\Pi}} = h_{\Pi/F=5000} 0,6 \left(\frac{F_{\Pi}}{F_1} \right)^{0,06};$$

$$h_{\Pi/F=5000} = aH + b,$$

где $h_{\Pi/F_{\Pi}}$ – слой наледного стока при фактической площади водосбора, мм; $h_{\Pi/F=5000}$ – величина потерь стока, приведенная к площади водосбора 5000 км², мм; F_{Π} – фактическая площадь водосбора, км²; F_1 – единичная площадь, км²; H – средняя высота водосбора, м; a и b – районные параметры, равные для центральной части Восточного Саяна соответственно 0,005 и 2,3. Метод расчета потерь стока на образование речного льда и наледей основан на тесной связи между этой величиной и зимним речным стоком, выраженным в модульных коэффициентах. Проверочными расчетами установлено, что отличие в расчетах потерь речного стока на наледообразование, определенное по реконструкции гидрографа и по эмпирической формуле, составляет от 11 до 22 % и не превышает величины ошибки при гидрологических расчетах для горных рек.

Для приведения данных зимней гидрометрической съемки к годовым и многолетним значениям использованы переходные коэффициенты, установленные по соотношениям подземного стока периода выполнения съемок с общей величиной годового стока. Правомерность использования для расчетов многолетних значений подземного стока данных единичных измерений расходов воды и точность получаемых результатов обеспечиваются производством работ в периоды, когда речной сток сформирован практически целиком за счет подземных вод, то есть является генетически однородным. В качестве контрольного метода проверки результатов съемок служит последовательный расчет величин подземного стока в замыкающем створе, бассейн которого разбит гидрометрическими створами на отдельные участки. Сходи-

мость результатов расчета по замыкающему створу с расчетом средневзвешенных величин подземного стока, полученных по отдельным створам, служит критерием точности выполненных работ. Например, среднемноголетний подземный сток, определенный по разовому расходу зимнего речного стока для замыкающего створа р. Ока – п. Сарам, составил 45,5 м³/с, а суммарный подземный сток притоков р. Ока, полученный при помощи приводки эпизодических измерений к многолетним, равнялся 45,9 м³/с.

Высокая сходимость результатов, полученных по методу переходных коэффициентов, свидетельствует о приемлемой точности произведенных работ и применимости данного метода для исследуемой территории. Данные по подземному стоку, полученные для замыкающих горноскладчатую область створов, приведены в табл. 1.

Для выявления основных особенностей формирования и распределения подземного стока использован метод корреляционного анализа, с помощью

Таблица 1

**Величины модулей подземного стока
в пределах центральной части Восточного Саяна**

Table 1

**Values of underground runoff rates
within the central part of the Eastern Sayan**

Река – створ	Дата замера	Измеренный меженный расход Q, м ³ /с	Средне-много-летний меженный расход Q _{ср.мне.} , м ³ /с	Q _{ср.мне.} , налед-ный по эмпирической формуле, м ³ /с	Q _{ср.мне.} , налед-ный гидрограф, м ³ /с	Q _{ср.мне.} под-земный с поте-рями, м ³ /с	Сред-няя высота водо-сбора H, м	Пло-щадь водо-сбора F, км ²	Мо-дуль под-зем-ного стока M, л/(с·км ²)
р. Ока – п. Сарам*	–	–	45,5	–	8,74	54,3	1970	18534	2,93
р. Зима – граница с платформой	17.12.1988	2,35	2,38	0,05	–	2,43	1004	484	5,03
р. Одай – граница с платформой	16.12.1990	0,78	0,76	0,02	–	0,78	993	138	5,62
р. Хор-Тагна – граница с платформой	14.12.1990	4,12	3,02	0,17	–	3,19	1282	753	4,24
р. Кирей – выше устья р. Ярма	17.12.1990	9,06	9,34	0,15	–	9,49	1232	978	9,70
р. Ярма – устье	17.12.1990	1,63	1,68	0,05	–	1,73	1078	394	4,39
р. Большая Белая – граница с платформой	15.12.1990	6,50	5,33	0,45	–	5,78	1440	2600	2,22
р. Ерма – устье	18.12.1990	3,83	3,18	0,08	–	3,26	1281	548	5,95
р. Урик – п. Шанхар	18.12.1990	8,77	6,46	0,71	–	7,17	1870	3230	2,22
Суммарный сток	–	–	77,6	10,5	–	88,1	–	–	–

*Примечание. * – среднемноголетние данные по гидрографу речного стока.*

*Note. * – long-term average annual data by the river flow hydrograph.*

которого определена степень взаимосвязи подземного стока и морфометрических, геолого-тектонических, климатических характеристик для 90 водосборов рек исследуемой территории. В качестве морфометрических признаков, характеризующих особенности строения речных бассейнов, русел рек и влияющих на подземный сток, согласно источнику [5] приняты: площадь речного водосбора (F , км²); средняя высота речного бассейна (H_6 , м); средняя отметка продольного профиля русла (H_p , м); средний уклон бассейна (I_6 , ‰); средний уклон реки (I_p , ‰); расстояние до наиболее удаленной точки бассейна (l , км); длина реки (L_p , км). Площади речных водосборов и длины реки сняты с топографических карт различного масштаба с помощью программного обеспечения QGIS. Средняя отметка продольного профиля речного русла снималась с графика продольного профиля, построенного на основе данных с топографических карт. Средняя высота и уклон речного бассейна рассчитывались методом средневзвешенного в пределах высотных поясов. Данные о высотах получены с цифровой модели рельефа SRTM [19]. Средний уклон русла реки представляет собой отношение падения реки, то есть разности высот наиболее удаленных точек, соответствующих истоку и устью, к соответствующей гидрографической длине реки. Оценка порядка водотоков произведена по общеизвестной классификации Р.Е. Хортон [20], согласно которой самые малые неразветвленные водотоки относятся к первому порядку, следующие, принимающие на себя потоки первого порядка, – ко второму и т. д. Главная река относится к высшему порядку, характеризующему одновременно порядок всей речной системы. Также в качестве морфологических признаков использовались следующие показатели горизонтального и вертикального расчленения рельефа: частота потоков (S , км⁻²), густота речной сети (D , км/км²);

мощность эрозионного вреза рек ($H_{вр}$, м); комплексный показатель расчленения рельефа (K). Мощность эрозионного вреза рек определяется как разность между средней высотой водосбора и средней отметкой продольного профиля речного русла. Комплексный показатель расчленения рельефа K представляет собой произведение удвоенной густоты речной сети на мощность эрозионного вреза рек и отражает в совокупности как горизонтальное, так и вертикальное расчленение рельефа речного бассейна [21]. Величины атмосферных осадков (X) сняты с соответствующих карт распределения среднегодовых осадков в бассейне р. Ангара. При оценке подземного стока в горно-складчатых и особенно тектонически активных областях, где преимущественно распространены плотные кристаллические породы, важное значение приобретает изучение трещиноватости водовмещающих пород. Главный параметр трещиноватости – степень раскрытости породы, под которой понимается выраженное в процентах отношение суммы произведений длин трещин на их зияние (среднее расстояние между стенками трещин) к исследуемой площади. В тех случаях, когда надежные данные о зиянии отсутствуют, рекомендуется определять коэффициент трещиноватости ($K_{тр}$, км/км²) как отношение суммарной длины трещин в пределах исследуемого участка к его площади [22]. Приближенно коэффициент трещиноватости можно вычислить как частное от деления суммарной длины разломов к площади водосбора. Результаты корреляционного анализа приведены в табл. 2.

Результаты исследований и их обсуждение

В целом подземный сток центральной части Восточного Саяна в пределах горноскладчатой области, оцененный методом генетического расчленения гидрографа с учетом наледообразования, составляет 88,1 м³/с при среднем значении

Таблица 2
Корреляционная матрица признаков формирования подземного стока
Table 2
Correlation matrix of underground runoff formation features

	<i>F</i>	<i>H_б</i>	<i>H_р</i>	<i>l_б</i>	<i>l_р</i>	<i>l</i>	<i>L_р</i>	<i>N</i>	<i>S</i>	<i>D</i>	<i>H_{вр}</i>	<i>K</i>	<i>K_{тр}</i>	<i>X</i>	<i>M_{п.с.}</i>
<i>F</i>	1	0,42	0,24	-0,02	-0,35	0,85	0,89	0,59	-0,23	-0,09	0,6	0,48	-0,1	-0,41	-0,14
<i>H_б</i>	0,42	1	0,94	0,15	-0,47	0,63	0,58	0,71	-0,42	-0,08	0,74	0,63	-0,32	-0,57	-0,12
<i>H_р</i>	0,24	0,94	1	0,02	-0,33	0,4	0,36	0,54	-0,41	-0,11	0,46	0,4	-0,36	-0,44	-0,06
<i>l_б</i>	-0,02	0,15	0,02	1	-0,07	0,09	0,06	0,17	0,17	0,56	0,33	0,51	0,12	-0,06	-0,1
<i>l_р</i>	-0,35	-0,47	-0,33	-0,07	1	-0,56	-0,53	-0,75	0,47	-0,11	-0,56	-0,5	-0,13	0,47	0,23
<i>l</i>	0,85	0,63	0,4	0,09	-0,56	1	0,95	0,78	-0,34	-0,1	0,83	0,62	-0,14	-0,53	-0,17
<i>L_р</i>	0,89	0,58	0,36	0,06	-0,53	0,95	1	0,75	-0,33	-0,11	0,78	0,58	-0,13	-0,49	-0,18
<i>N</i>	0,59	0,71	0,54	0,17	-0,75	0,78	0,75	1	-0,32	0,14	0,77	0,71	-0,12	-0,46	-0,14
<i>S</i>	-0,23	-0,42	-0,41	0,17	0,47	-0,34	-0,33	-0,32	1	0,37	-0,3	-0,1	0,05	0,26	0,03
<i>D</i>	-0,09	-0,08	-0,11	0,56	-0,11	-0,1	-0,11	0,14	0,37	1	0,03	0,49	0,2	0,05	-0,08
<i>H_{вр}</i>	0,6	0,74	0,46	0,33	-0,56	0,83	0,78	0,77	-0,3	0,03	1	0,83	-0,13	-0,58	-0,19
<i>K</i>	0,48	0,63	0,4	0,51	-0,5	0,62	0,58	0,71	-0,1	0,49	0,83	1	-0,07	-0,47	-0,15
<i>K_{тр}</i>	-0,1	-0,32	-0,36	0,12	-0,13	-0,14	-0,13	-0,12	0,05	0,2	-0,13	-0,07	1	-0,04	-0,18
<i>X</i>	-0,41	-0,57	-0,44	-0,06	0,47	-0,53	-0,49	-0,46	0,26	0,05	-0,58	-0,47	-0,04	1	0,54
<i>M_{п.с.}</i>	-0,14	-0,12	-0,06	-0,1	0,23	-0,17	-0,18	-0,14	0,03	-0,08	-0,19	-0,15	-0,18	0,54	1

модуля 3,19 л/(с·км²), потери подземного стока на наледообразование – 10,5 м³/с (см. табл. 1). Подземный сток выражен величиной модуля стока, который имеет дискретный характер пространственного распределения и изменяется в широких пределах (0,5–25 л/(с·км²)), в связи с этим он отображен на карте по площадному принципу (рис. 2).

Анализ корреляционной матрицы признаков показал отсутствие какого-либо одного ведущего фактора в формировании подземного стока на всей территории, но корреляционные зависимости, построенные для отдельных бассейнов, и карта распределения модуля подземного стока позволили выявить зависимость модуля подземного стока от высоты местности. Эта закономерность не является единой для всей территории и для различных бассейнов рек носит разнонаправленный характер. В бассейнах р. Кирей и Зима наблюдается увеличение модуля подземного стока с высотой водосбора от 1–2 л/(с·км²) в предгорьях до 14–25 л/(с·км²) в водораздельных частях Шитского хребта (рис. 3).

Эта особенность 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, а следовательно, возрастает мощность трещиноватой зоны и улучшаются ее коллекторские свойства. Вполне вероятно, что высокие модули подземного стока связаны с наличием большого количества озер в истоках р. Кирей и Ярма. Сами реки в верховьях пересекают до двух-трех 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 р. Ока, Большая Белая наблюдается обратная зависимость модуля подземного стока с высотой, связанная в первую очередь с ландшафтно-

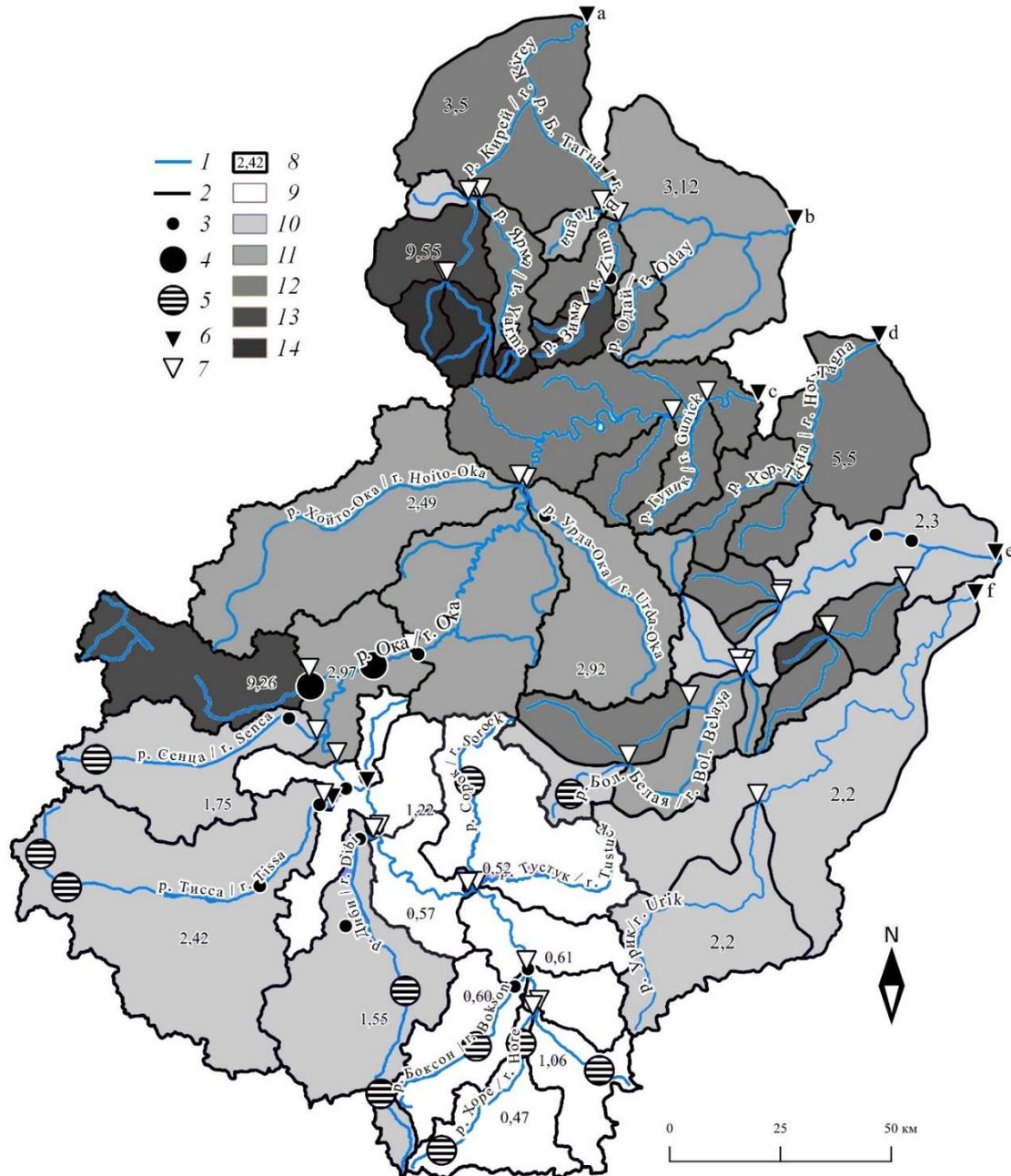


Рис. 2. Карта распределения модуля подземного стока центральной части Восточного Саяна:

1 – реки; 2 – границы речных водосборов; 3, 4 – участки наибольшего развития полыней (по источнику [11] с дополнениями авторов): 3 – длиной от 1 до 2 км, 4 – длиной более 5 км; 5 – участки развития крупных наледей; 6 – разовый гидрометрический створ; 7 – стационарный гидрологический пост: а – Уйгат, б – Зулумай, с – Сарам, d – Хор – Тагна, e – Инга, f – Шанхар; 8 – величина модуля подземного стока, л/(с·км²): 9 – от 0,5 до 1,5 – низкий, 10 – от 1,5 до 2,5 – средний, 11 – от 2,5 до 3,5 – высокий, 12 – от 3,5 до 6,5 – весьма высокий, 13 – от 6,5 до 10 – исключительно высокий, 14 – более 10 – высочайший

Fig. 2. Distribution map of the rate of the underground runoff of the central part of the Eastern Sayan:

1 – rivers; 2 – boundaries of river drainage; 3, 4 – sites of the greatest development of polynya holes (according to [11] with the additions of the authors): 3 – from 1 to 2 km long, 4 – more than 5 km long; 5 – areas of large icing development; 6 – disposable channel control; 7 – permanent hydrological station: a – Uigat, b – Zulumai, c – Saram, d – Khor – Tagna, e – Inga, f – Shankhar; 8 – underground runoff rate, l/(s·km²): 9 – from 0.5 to 1.5 – low, 10 – from 1.5 to 2.5 – medium, 11 – from 2.5 to 3.5 – high, 12 – from 3.5 to 6.5 – very high, 13 – from 6.5 to 10 – exceptionally high, 14 – more than 10 – the highest

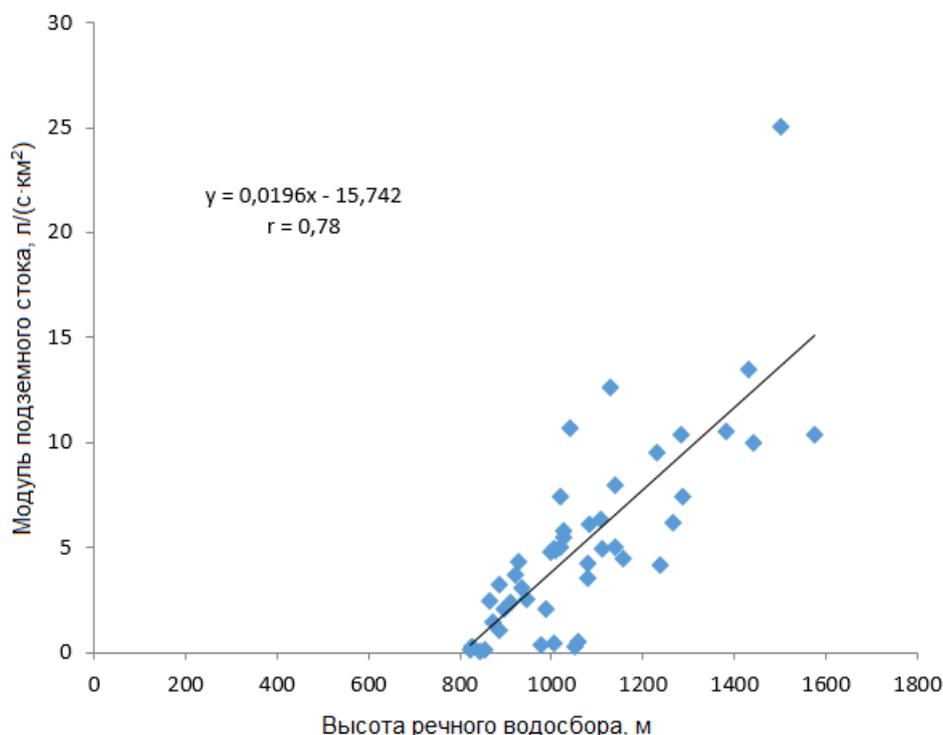


Рис. 3. График связи модуля подземного стока с высотой водосбора для р. Кирей и Белая Зима
Fig. 3. Graph of the underground runoff rate relationship with the drainage height of the Kirei and Belaya Zima rivers

климатическими условиями. Расположенное в верховьях этих рек Окинское плато является для них естественным водосбором. Со всех сторон оно окружено горными цепями, препятствующими проникновению влагонесущих масс, поэтому на этой территории атмосферных осадков выпадает в полтора раза меньше, чем на остальной. Низкие фильтрационные характеристики пород благоприятствуют более активному развитию многолетнемерзлых пород, служащих водупорным экраном. Уменьшение объема подземного стока происходит и в результате его аккумуляции в процессе наледообразования. В пределах гидрогеологического массива подземный сток в реки формируется за счет трещинно-грунтовых подземных вод зоны экзогенной трещиноватости и трещинно-жильных вод обводненных разломов. Особенности развития гидрогеологических условий приводят к тому, что при высокой расчле-

ненности 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. Эта зависимость указывает на следующую особенность распределения подземного стока. С одной стороны, в склоновой части подземный сток приурочен к малым водосборам. Хорошее развитие речной сети (среднее значение густоты речной сети $D = 0,6$, частоты потоков $S = 0,27$) и глубокие эрозионные врезы русла рек ($H_{вр} > 150$ м) на малых водосборах до 200–300 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 до 500–600 км².

С другой стороны, она наглядно демонстрирует роль гидрогеологических условий водосборов в формировании подземного стока различных бассейнов, близких по площади. Таким образом, следующей особенностью формирования подземного стока является зависимость от литологических особенностей и геологоструктурных 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. Так, появление в разрезе осадочно-метаморфических образований нижнего протерозоя карбонатных пород вызывает увеличение модуля подземного стока с 1,5–2 до 5 л/(с·км²) и выше при одинаковом увлажнении и схожих морфометрических характеристиках бассейнов. Повышенные величины модуля подземного стока до 10 л/(с·км²) и более в бассейне р. Кирей и Ярма приурочены к гранитоидам Саянского интрузивного комплекса. Возможно, экзогенная трещиноватость гранитоидов, слагающих горный массив, выше в сравнении с гнейсами и кристаллосланцами метаморфогенных комплексов Урикско-Ийского прогиба. Тектоническая раздробленность метаморфических пород, наоборот, превосходит таковую в гранитоидах в верховьях р. Кирей и Ярма, где закартированы единичные зоны нарушений ($K_{тр} = 0,01–0,17$), однако здесь на фоне интенсивного неотектонического воздымания основным фактором рельефообразования явилась ледниковая деятельность. С большой долей вероятности высокий подземный сток обеспечен наличием многочисленных озер (более 150) в истоках р. Кирей и Ярма и крупноглыбовых морен в долинах этих рек, служащих хорошим коллектором для подземных вод. Однако и это не является достаточным условием для накопления

подземных вод в гранитоидах Саянского интрузивного комплекса. Вполне возможно, что высокая относительная величина подземного питания обусловлена несовпадением поверхностного и подземного водосборов, но, к сожалению, на данном этапе исследований невозможно указать действительные границы и размеры подземного водосбора. Поэтому весь учтенный подземный сток относился только к тому малому водосбору или его части на замыкающем створе, для которого он был определен.

Заключение

Использованные для исследований методики позволили определить средне-многолетние величины подземного стока, морфометрические характеристики для 90 бассейнов рек и выявить основные особенности его формирования и распределения, связанные с геологоструктурными и гидрогеологическими условиями исследуемой территории. Подземный сток в среднемноголетнем разрезе составил 88,1 м³/с при среднем модуле 3,19 л/(с·км²). Распределение подземного стока центральной части Восточного Саяна 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 определяется главным образом их гидрогеологическими условиями, связанными с особенностями геологоструктурного строения, литологического состава пород, морфологии и климата, то есть с основными факторами формирования подземных вод региона.

Библиографический список

1. Скворцов Г.Г. Мерзлотно-гидрогеологические условия южной части Восточных Саян в связи с проблемой рудничного строительства // *Материалы по подземным водам Восточной Сибири*. Иркутск: Вост.-Сиб. филиал АН СССР, 1957. С. 164–171.
2. Подземный сток на территории СССР / под ред. Б.И. Куделина. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1966. 301 с.
3. Естественные ресурсы подземных вод юга Восточной Сибири / отв ред. И.С. Зекцер. Новосибирск: Наука, 1976. 128 с.
4. Евстигнеев В.М., Шайбонов Б.Б. Географические закономерности низкого зимнего стока рек Бурятии // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 1994. № 5. С. 74–79.
5. Писарский Б.И. Закономерности формирования подземного стока бассейна озера Байкал. Новосибирск: Наука, 1987. 157 с.
6. Куделин Б.И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1960. 343 с.
7. Mei Y., Anagnostou E.N. A hydrograph separation method based on information from rainfall and runoff records // *Journal of Hydrology*. 2015. Vol. 523. P. 636–649.
8. Соколов Б.Л., Саркисян В.О. Подземное питание горных рек. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 240 с.
9. Ратнер Н.С. К расчету подземного притока в реки по данным единичных расходов воды // *Труды Государственного гидрологического института*. 1977. Вып. 240. С. 55–71.
10. Орешкин И.И. Вечная мерзлота на Ботогольском гольце в Восточных Саянах // *Землеведение*. 1935. Т. 37. Вып. 1. С. 83–97.
11. Зонов Б.В., Шульгин М.Ф. Гидрология рек бассейна Братского водохранилища. М.: Наука, 1966. 169 с.
12. Попов О.В. Подземное питание рек. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 291 с.
13. Боровский Б.В., Марков М.Л. Является ли меженный расход рек мерой питания подземных вод или общего подземного стока? // *Разведка и охрана недр*. 2014. № 5. С. 10–16.
14. Hendriks M.R. *Introduction to Physical Hydrology*. Oxford; New York: Oxford University Press, 2010. 331 p.
15. M.P. Miller, H.M. Johnson, D.D. Susong, D.M. Wolock. A new approach for continuous estimation of baseflow using discrete water quality data: Method description and comparison with baseflow estimates from two existing approaches // *Journal of Hydrology*. 2015. Vol. 522. P. 203–210.
16. Глотова Л.П., Глотов В.Е. Роль подземных вод в общем стоке малых горных рек бассейна реки Колыма // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14. С. 2321–2324.
17. Ushakov M.V. Laws Depletion Streamflow in Basin Kolyma in Winter Lowest Water Level // *Emerging Patterns, Breakthroughs and Challenges: 4th International Multidisciplinary Conference on Hydrology and Ecology*. Rennes, 2013. P. 15.
18. Кравченко В.В. Роль наледей в формировании зимнего речного стока и ледяного покрова рек западной части зоны БАМа // *Труды Государственного гидрологического института*. 1986. Вып. 312. С. 34–84.
19. SRTM Data. CGIAR – Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI) // SRTM 90m DEM Digital Elevation Database [Электронный ресурс]. URL: <http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/> (01.09.2018).
20. Хортон Р. Е. Эрозионное строение рек и водосборных бассейнов. М.: Издательство иностранной литературы, 1948. 159 с.
21. Многомерный анализ гидрогеологических систем горноскладчатых областей / отв. ред. И.С. Ломоносов. Новосибирск: Наука, 1986. 109 с.
22. Писарский Б.И., Шерман С.И. Параметры трещиноватости и их значение при гидрогеологических исследованиях // *Формирование и геохимия подземных вод Сибири и Дальнего Востока*. М.: Наука, 1967. С. 25–29.

References

1. Skvortsov G.G. *Merzlotno-gidrogeologicheskie usloviya yuzhnoi chasti Vostochnykh Sayan v svyazi s problemoi rudnichogo stroitel'stva* [Permafrost-hydrogeological conditions of the southern part of The Eastern Sayan in terms of mine construction]. *Materialy po podzemnym vodam Vostochnoi Sibiri* [Materials on the groundwater of Eastern Siberia]. Irkutsk: The East-Siberian branch of the USSR Academy of Sciences Publ., 1957, pp. 164–171. (In Russ.).
2. Kudelin B.I. *Podzemnyi stok na territorii SSSR* [Groundwater runoff in the USSR]. Moscow: Moscow University Publ., 1966, 301 p. (In Russian).
3. Zektser I.S. *Estestvennye resursy podzemnykh vod yuga Vostochnoi Sibiri* [Natural resources of groundwater in the south of Eastern Siberia]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1976, 128 p. (In Russ.).
4. Evstigneev V.M., Shaibonov B.B. Geographic patterns of low winter flow of rivers in Buryatia.

Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya [Moscow University Bulletin. Series 5: Geography], 1994, no. 5, pp. 74–79. (In Russ.).

5. Pisarskii B.I. *Zakonomernosti formirovaniya podzemnogo stoka basseina ozera Baikal* [Formation patterns of the underground runoff of the lake Baikal basin]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1987, 157 p. (In Russ.).

6. Kudelin B.I. *Printsipy regional'noi otsenki estestvennykh resursov podzemnykh vod* [Principles of regional groundwater resource assessment]. Moscow: Moscow University Publ., 1960, 343 p. (In Russ.).

7. Mei Y., Anagnostou E.N. A hydrograph separation method based on information from rainfall and runoff records. *Journal of Hydrology*, 2015, vol. 523, pp. 636–649.

8. Sokolov B.L., Sarkisyan V.O. *Podzemnoe pitanie gornyykh rek* [Underground intake of mountain rivers]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1981, 240 p. (In Russ.).

9. Ratner N.S. To calculation of river underground inflow according to the unit cost of water. *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta* [Proceedings of the State Hydrological Institute], 1977, iss. 240, pp. 55–71. (In Russ.).

10. Oreshkin I.I. Permafrost on Botogolsky bald mountain in the Eastern Sayan. *Zemlevedenie* [Earth Sciences], 1935, vol. 37, iss. 1, pp. 83–97. (In Russ.).

11. Zonov B.V., Shul'gin M.F. *Gidrologiya rek basseina Bratskogo vodokhranilishcha* [Hydrology of Bratsk reservoir basin rivers]. Moscow: Nauka Publ., 1966, 169 p. (In Russ.).

12. Popov O.V. *Podzemnoe pitanie rek* [Underground intake of rivers], Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1968, 291 p. (In Russ.).

13. Borevskii B.V., Markov M.L. Is river low-water flow a measure contributing to underground water or common underground water inflow? *Razvedka i okhrana nedr* [Prospect and Protection of Mineral Resources], 2014, no. 5, pp. 10–16. (In Russ.).

14. Hendriks M.R. *Introduction to Physical Hydrology*. Oxford; New York: Oxford University Press, 2010, 331 p.

15. M.P. Miller, H.M. Johnson, D.D. Susong, D.M. Wolock. A new approach for continuous estimation of baseflow using discrete water quality data: Method description and comparison with baseflow estimates from two existing approaches. *Journal of Hydrology*, 2015, vol. 522, pp. 203–210.

16. Glotova L.P., Glotov V.E. Role of underground waters in the common drain of small mountain rivers at Kolyma river basin. *Izvestiya samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2012, vol. 14, pp. 2321–2324. (In Russ.).

17. Ushakov M.V. Laws Depletion Streamflow in Basin Kolyma in Winter Lowest Water Level. *Emerging Patterns, Breakthroughs and Challenges: 4th International Multidisciplinary Conference on Hydrology and Ecology*. Rennes, 2013, p. 15.

18. Kravchenko V.V. The role of icing in the formation of winter river runoff and ice cover of rivers in the Western part of the Baikal-Amur mainline zone. *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta* [Proceedings of the State Hydrological Institute], 1986, iss. 312, pp. 34–84. (In Russ.).

19. SRTM Data. CGIAR – Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI). SRTM 90m DEM Digital Elevation Database. Available at: <http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/> (accessed 1 September 2018).

20. Horton R. E. *Eroziionnoe stroenie rek i vodosbornyykh basseinov* [Erosional structure of rivers and drainage basins]. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoi literatury Publ., 1948, 159 p. (In Russ.).

21. Lomonosov I.S. *Mnogomernyi analiz gidrogeologicheskikh sistem gomoskladchatykh oblastei* [Multivariate analysis of hydrogeological systems of folded areas]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1986, 109 p. (In Russ.).

22. Pisarskii B. I., Sherman S. I. *Parametry treshchinovatosti i ikh znachenie pri gidrogeologicheskikh issledovaniyakh* [Fracture parameters and their importance in hydrogeological studies]. *Formirovanie i geokhimiya podzemnykh vod Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Groundwater Formation and Geochemistry in Siberia and the Far East]. Moscow: Nauka Publ., 1967, pp. 25–29. (In Russ.).

Критерии авторства

Бадминов П.С., Павлов С.Х., Дмитриев-Добровольский В.Е., Оргильянов А.И. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Prokopii S. Badminov, Sergey Kh. Pavlov, Vladislav E. Dmitriev-Dobrovolsky, Aleksey I. Orgilianov have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Информация об авторах

Бадминов Прокопий Сократович, ведущий инженер лаборатории гидрогеологии Института земной коры СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация; *e-mail: prokop_sbad@mail.ru*

Павлов Сергей Харитонович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии Института земной коры СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация; *e-mail: spavlov@crust.irk.ru*

Дмитриев-Добровольский Владислав Евгеньевич, магистрант Иркутского государственного университета, г. Иркутск, Российская Федерация; *e-mail: vladis.box@yandex.ru*

Оргильянов Алексей Июльевич, ведущий инженер лаборатории гидрогеологии Института земной коры СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация; *e-mail: irig@crust.irk.ru*

Information about the authors

Prokopii S. Badminov, Leading Engineer of the Hydrology Laboratory of the Institute of the Earth's crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation; *e-mail: prokop_sbad@mail.ru*

Sergey Kh. Pavlov, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher of the Hydrology Laboratory of the Institute of the Earth's crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation; *e-mail: spavlov@crust.irk.ru*

Vladislav E. Dmitriev-Dobrovolsky, Master's Degree Student of Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation; *e-mail: vladis.box@yandex.ru*

Aleksey I. Orgilianov, Leading Engineer of the Hydrology Laboratory of the Institute of the Earth's crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation; *e-mail: irig@crust.irk.ru*