

УДК 556.5.01

DOI: 10.34753/HS.2020.2.2.112

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КРИОГЕННЫХ ЯВЛЕНИЙ И ПРОЦЕССОВ НА ПИТАНИЕ РЕК РОССИИ ПОДЗЕМНЫМИ ВОДАМИ

М.Л. Марков

*Государственный гидрологический институт,
г. Санкт-Петербург, Россия
2014mml@gmail.com*

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF CRYOGENIC PHENOMENA AND PROCESSES ON THE SUPPLY OF RUSSIAN RIVERS WITH UNDERGROUND WATER

Mikhail L. Markov

*State hydrological Institute,
St. Petersburg, Russia
2014mml@gmail.com*

Аннотация. На значительной части территории России зима длится более 4 месяцев. Это приводит к образованию речного и озерного льдов, подземных льдов и наледей различного вида, промерзанию почвогрунтов и так далее. Все эти явления в той или иной степени влияют на сток рек. В условиях потепления климата, особенно в зимний период, стокоформирующая роль этих процессов снижается. Так как она до сих пор не оценена, то вопрос о ее значимости в гидрологическом режиме становится все более актуальным. Цель статьи – выполнить оценку совокупного влияния на подземное питание рек России многих криогенных явлений и процессов, формирующихся и происходящих в руслах рек, на водосборах, болотах и заболоченных территориях, в почво-грунтах, трещиноватых и рыхлых горных породах. В основе методики заложено представление о том, что внутригодовая изменчивость емкостных запасов подземных водоносных горизонтов, питающих большие реки, незначительна. Исходя из этого принято, что разница в питании рек подземными водами в зимнюю и летнюю межень определяет влияние всей совокупности криогенных процессов. Определение разницы между зимним и летним меженим стоком рек выполнено по картам летнего и зимнего минимального 30-ти суточного стока 80% обеспеченности.

В результате расчетов установлено, что криогенные явления и процессы контролируют 492 км³/год водных ресурсов России. В том числе: на европейской территории – 23; Урале и Западной Сибири – 36; Средней, Северо-

Abstract. In a large part of Russia, winter lasts for more than 4 months. This leads to the formation of river and lake ice, underground ice and ice of various types, freezing of soil, etc. All these phenomena affect the flow of rivers to one degree or another. In a warming climate, especially in winter, the flow-forming role of these processes is reduced. Since it has not yet been evaluated, the question of its significance in the hydrological regime is becoming more and more relevant. The purpose of the article is to assess the cumulative impact of many cryogenic phenomena and processes that form and occur in riverbeds, in catchments, swamps and wetlands, in soils, fractured and loose rocks on the underground nutrition of Russian rivers. The methodology is based on the idea that the intra-annual variability of the reservoir reserves of underground aquifers feeding large rivers is insignificant. Based on this, it is assumed that the difference in the supply of rivers with underground water in the winter and summer periods determines the influence of the entire set of cryogenic processes. The difference between the winter and summer inter-soil flow of rivers was determined using maps of the summer and winter minimum 30-day flow of 80% security.

As a result of calculations, it is established that cryogenic phenomena and processes control 492 km³/year of water resources in Russia. Including: in the European territory – 23; the Urals and Western Siberia – 36; Middle, North-Eastern Siberia and the far East – 433 km³/year. In other words, air temperature plays a significant role in the formation of almost 20% of the total annual flow of rivers in Russia's temperate and Northern latitudes

Markov M.L. Assessment of the impact of cryogenic phenomena and processes on the supply of Russian rivers with underground water. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2020, vol. 2, iss. 2, pp. 112-122. (In Russian; abstract in English). DOI: [10.34753/HS.2020.2.2.112](https://doi.org/10.34753/HS.2020.2.2.112)

Восточной Сибири и Дальнем Востоке – 433 км³/год. То есть в формировании почти 20% суммарного годового стока рек умеренных и северных широт России с устойчивой зимой значительную роль играет температура воздуха. Происходящее и прогнозируемое повышение зимней температуры воздуха на этих территориях может постепенно привести к ослаблению криогенного регулирования стока и к заметным изменениям в водном режиме.

Ключевые слова: минимальный зимний и летний сток; подземное питание рек; наледи; речной и сезонный подземный лед; болота; криогенное регулирование стока; изменение климата

Введение

На значительной территории России часть года сохраняются отрицательные температуры воздуха. Это приводит к формированию разнообразных криогенных явлений, связанных с фазовыми переходами вода-лед/снег-вода: речного и озерного льдов; подземных льдов и наледей различного вида; промерзание почвогрунтов и так далее. Все эти явления в той или иной степени влияют на сток рек. Оценке влияния отдельных природных криогенных явлений на формирование речного стока посвящено множество работ [Соколов, 1975; Алексеев, Фурман, 1976; Кравченко, 1986; Обязов, Смахтин, 2013; Обязов, Смахтин, 2014; Марков, Гуревич, 2019; и другие]. Установлено, что основное их влияние сказывается на подземном питании рек. Вместе с тем до сих пор нет общей оценки влияния криогенных явлений на сток рек. В зарубежных публикациях таких оценок автор также не обнаружил. Возможно, до недавнего времени такие исследования не были столь актуальны, как это стало в последние 20-30 лет в связи с произошедшим и ожидаемым в дальнейшем потеплением климата, особенно в зимний период. Поэтому цель настоящей статьи – выполнить оценку совокупного влияния на подземное питание рек России многих

with a stable winter. The current and projected increase in winter air temperature in these territories may gradually lead to a weakening of cryogenic regulation of runoff and to noticeable changes in the water regime.

Keywords: minimum winter and summer runoff; underground river feeding; ice; river and seasonal underground ice; swamps; cryogenic flow regulation; climate change

криогенных явлений и процессов, происходящих в руслах рек, на водосборах, болотах и заболоченных территориях, в почво-грунтах, трещиноватых и рыхлых горных породах.

Методика

В основе методики определения криогенного регулирования подземного питания рек заложено представление о том, что внутригодовая изменчивость емкостных запасов подземных водоносных горизонтов, питающих большие реки, незначительна. Подземные воды, особенно из глубоких водоносных горизонтов, более зарегулированы и имеют меньшую изменчивость в течение года, чем поверхностные. Это подтверждают и незначительные коэффициенты вариации минимального зимнего и летне-осеннего стока рек, которые составляют 0,15-0,25 для большинства средних и больших рек северных районов России¹. В южных районах эти коэффициенты больше из-за малого участия в питании подземных вод. В северных районах, например, это проявляется в равенстве межлетних зимних и летних расходов родников, участвующих в питании наледей [Марков, Василенко, Гуревич, 2016].

Исследования изотопного состава речных вод показали, что в питании рек, особенно в северных широтах, участвуют подземные воды с

¹СНиП 2.01.14-83. Определение расчетных гидрологических характеристик. М.: Стройиздат, 1985. 40 с.

«возрастом» в среднем от 4 до 6 лет, что возможно только при соответствующем объеме, определяющем и малую внутригодовую изменчивость [Романов и др., 1983; Соколов, 1996].

Исходя из незначительной внутригодовой изменчивости ресурсов основных водоносных горизонтов, питающих реки, можно допустить, что подземное питание рек зимой должно быть близким или равным меженному летнему стоку (при отсутствии осадков). Если же есть разница, то есть основания принять ее за влияние разнообразных криогенных явлений и процессов, затрудняющих или перераспределяющих во времени подземное питание рек с зимы на лето.

Определение разницы между зимним и летним межнным стоком рек выполнено по картам летнего и зимнего минимального 30-ти суточного стока 80% обеспеченности, приведенным в СНиП 2.01.14-83. Эти карты

составлены по данным гидрологических наблюдений до 1980 г. на средних реках с площадями водосборов до 50-75 тыс. км². В период, за который использованы данные о стоке при построении карт, еще не произошло изменений в формировании гидрологического режима из-за климата. То, что в расчетах приняты значения межнного стока 80% обеспеченности, повышает объективность оценок по двум причинам. Во-первых, в очень маловодные годы реки преимущественно питаются из более глубоких водоносных горизонтов с очень малой внутригодовой изменчивостью. Во-вторых, в их стоке роль поверхностных (талых и дождевых) вод мала. Величины отклонений зимних от летних минимальных 30-ти суточных расходов воды 80% обеспеченности, характеризующих криогенное регулирование подземного питания рек России приведены на рисунке 1.

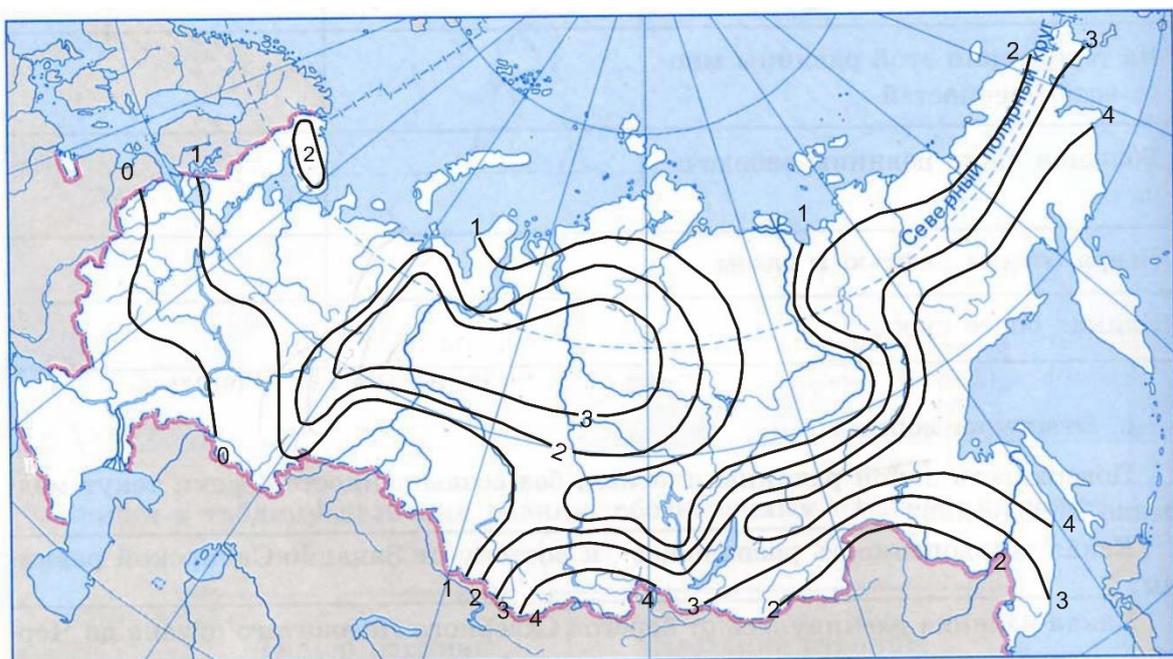


Рисунок 1. Криогенное регулирование подземного питания рек России, л/с км²

Figure 1. Cryogenic regulation of underground supply of Russian rivers, l/s km²

Результаты и обсуждения

Распределение по территории России отклонений зимнего подземного питания рек от летнего изменяется от 0 до 4 л/с км², достигая в северо-восточных районах 5 л/с км². Наименьшие значения характерны для юга европейской

территории и районов распространения сплошной многолетней мерзлоты. В первом случае это связано со слабым развитием криогенных явлений в южных областях. Еще южнее зимний сток выше летнего, так как там велика роль испарения в водном балансе водосборов в летний период. Некоторое

снижение разницы в северных районах, вероятно, обусловлено тем, что здесь мало участие подземных вод в питании в силу наличия многолетней мерзлоты. Самые большие значения влияния криогенных явлений характерны для горных районов. Также увеличение влияния криогенных факторов прослеживается в Восточной Сибири, где большинство рек перемерзает и формируются десятки тысяч наледей речных и подземных вод, сезонные подземные льды в речных долинах и гольцовые – в горах. В обширных районах Западной Сибири увеличение роли отрицательных температур воздуха в формировании стока рек, вероятно, сказывается из-за промерзания насыщенного водой деятельного слоя и мочажин болот. Вопрос аккумуляции болотных вод во льду и влияние этого процесса на сток рек с высокой степенью

заболоченности еще слабо изучен. Для России этот вопрос актуален, так как заболоченность страны (все оторфованные земли вне зависимости от мощности торфяного горизонта) составляет 21,6% (3,69 млн. км²) [Вомперский и др., 2005]. Например, если взять только площадь болот с мощностью торфа >50 см – 975 тыс. км², то при замерзании на ней слоя воды в 10 см объем льда составит 97 км³. Даже если половина этой воды не будет участвовать в зимнем стоке северных рек, это составит около 0,8 л/с км² потерь в их питании, но сохранит обводненность болот.

В целом криогенное регулирование питания рек России подземными водами составляет почти 492 км²/год (таблица 1), что для сравнения, например, в 2 раза больше среднего годового стока р. Волги.

Таблица 1. Объем криогенного регулирования питания рек России подземными водами

Table 1. Volume of cryogenic regulation of groundwater supply to Russian river

Территория России	Средняя продолжительность зимы, мес.	Средний модуль криогенного регулирования стока, л/с км ²	Площадь территории с устойчивой зимой, млн. км ²	Объем криогенного регулирования подземного питания рек, км ³ /год
Центральная и северная европейская территория	4	1	2,2	23
Урал и Западная Сибирь	5	1,7	1,6	36
Средняя и Северо-Восточная Сибирь, Дальний Восток	6	2,5	11	433
Сумма			14,8	492

Важно отметить, что только часть воды из приведенного выше годового объема поступает в реки и аккумулируется во льду разных видов. Значительный объем подземных вод остается зимой в водоносных горизонтах и зоне аэрации, так как дренирующая способность рек либо полностью отсутствует при перемерзании речных русел, либо существенно сокращена из-за снижения пропускной способности подо льдом.

В холодный период года сохраняется приток подземных вод к речным долинам под

действием силы тяжести. Эти воды при отсутствии или существенном снижении дренирования гидрографической сетью аккумулируются в приречной части бассейна. В конце зимы с потеплением они участвуют в формировании весеннего половодья. Так, например, на р. Шаманке в Прибайкалье экспериментально установлено, что в первой половине половодья подземные воды составляют более 3/4 объема стока [Кравченко, 1992]. Из-за «половодья подземных вод» до начала

водоотдачи снежного покрова коэффициенты стока весеннего половодья на некоторых реках Сибири равны или больше 1², а период минимального зимнего стока нередко смещается к середине зимы с увеличением площади водосбора. Под названием «черная вода» известны также паводки подземных вод весной на реках Якутии [Шепелев, 2014].

Основная часть естественных ресурсов подземных вод России (без субаквальной разгрузки в моря и подруслового стока), разгружающихся в реки России (далее – ЕРПВ) составляет примерно 790 км³/год [Шварцев, 1996]. Они определены по расчленению гидрографов речного стока на поверхностную и подземную составляющую. Описанное выше перераспределение части подземного стока в реки с холодного периода на теплый (в том числе на весеннее половодье) затрудняет оценку естественных ресурсов подземных вод по расчленению гидрографа на генетические составляющие. Частично эта проблема решена путем учета³ в оценках ЕРПВ объема подземного притока в реки, аккумулированного в речном льду и наледях [Атлас снежно-ледовых ресурсов мира, 1997; и другие]. Вместе с тем, трудно определяема часть подземных вод, которая остается в речном бассейне из-за снижения дренирующей способности гидрографической сети при образовании ледяного покрова и других процессов криогенного характера [Zhuravin, Markov, 2010; Лавров, Марков, 2018; Марков, 2018; и другие]. Важно также отметить, что неизвестно какая часть этих «недренированных» зимой подземных вод руслами рек поступает в реки в теплый период текущего года и с какой интенсивностью. Объем подземных вод, не поступавших из-за криогенных процессов в речную сеть в течение года или ряда лет вообще не учитывается в оценках ЕРПВ и относится не к ресурсам, а к запасам подземных вод. При происходящем потеплении зим, ослаблении криогенного регулирования стока наблюдается увеличение

подземного питания рек, что отмечено во множестве публикаций. Возникает дискуссионный вопрос – увеличение зимнего стока характеризует рост естественных ресурсов подземных вод или нет [Боревский, Марков, 2014]? Если в росте зимнего стока принимают участие и те подземные воды, которые были отнесены к запасам, но в новых криогенных условиях они дренируются реками, то их нельзя однозначно рассматривать в качестве показателей ЕРПВ. Это может привести к завышенным оценкам ЕРПВ, что, возможно, имеет место в некоторых работах [Современные ресурсы, 2015]. Не исключено, что происходящее снижение обводненности в центральных и южных районах России, где зимы практически не стало, связано и с вовлечением емкостных запасов в подземное питание рек [Zotov, Shum, Frolova, 2015; Зотов, Фролова, Шам, 2016]. Также этим можно объяснить и деградацию первичной гидрографической сети [Иванова, Ларионов, 1996], усыхание лесов в приводораздельных зонах. Но в этот же период есть примеры подтопления территорий [Разумов, Разумова, Молчанов, 2015]. Подтапливаемые территории расположены в основном на прибрежных участках средних и больших рек. Здесь рост расходов воды, поступающей с верхних звеньев гидрографической сети, привел к повышению минимальных уровней воды в реках (до 1-1,5 м), что сказалось на снижении их дренирующей роли [Марков, Гуревич, 2019]. Возможно, происходит постепенное пространственное перераспределение части водных ресурсов с приводораздельных территорий вниз к речным долинам крупных рек, при «усыхании» верховий. На водосборах верхних звеньев гидрографической сети приходная часть водного баланса подземных водоносных горизонтов (рост осадков и инфильтрации при снижении промерзания почво-грунтов) выросла, но расходная часть выросла больше за счет вовлечения в подземное питание рек сработки части емкостных запасов. Стабилизация между

² Практические рекомендации по расчету гидрологических характеристик в зоне хозяйственного освоения БАМа. Л.: Госкомгидромет, 1986. 108 с.

³ Расчет подземного питания рек криолитозоны (Методическое пособие). Л.: Гидрометеиздат, 1989. 106 с.

приходной и расходной частью водного баланса может наступить при общем снижении обводненности территорий, когда уровни подземных вод зоны интенсивного водообмена снизятся и, соответственно, снизится дренирующая способность рек. Это будет соответствовать состоянию адаптации водной системы речных бассейнов к изменению климата и, возможно, к переходу к новому «квазистационарному» состоянию в гидрологическом режиме. До наступления стабилизации в водном балансе речных бассейнов, расположенных в районах с прекратившимся криогенным регулированием формирования стока, региональная оценка ЕРПВ по традиционному расчленению гидрографа может быть некорректна из-за вовлечения в подземное питание рек емкостных запасов подземных вод.

Следует отметить, что при выполненной оценке криогенного регулирования подземного питания рек по данным гидрологических наблюдений до 1980 г. не учитывается мощный фактор-происходящее в последние десятилетия увеличение слоя сезонного оттаивания многолетних мерзлых грунтов [Biskaborn et al., 2019; Shiklomanov et al., 2019]. Это также приводит к улучшению дренирования территорий, в том числе за счет улучшения гидравлической связи между поверхностными и подземными водными объектами. Вероятно, этот фактор не менее значим, а в некоторых районах распространения многолетней мерзлоты может являться определяющим в формировании водного режима территорий в современных климатических условиях. По этой причине, можно утверждать, что выполненная оценка криогенного регулирования речного стока скорее занижена для современных климатических условий, чем завышена для северных и восточных районов России.

Выводы

В формировании зимнего водного режима рек России заметную роль играют процессы

фазовых переходов вода-лед-вода на водосборах, в бассейнах и в руслах. Их совокупное влияние оценено в 492 км³/год и выражается в двух процессах: во-первых, в перераспределении части подземного питания рек с холодного периода на теплый; во-вторых, в многолетнем регулировании емкостных запасов подземных вод. Полученную оценку можно считать ориентировочной, так как она выполнена по косвенным проявлениям рассматриваемых процессов в режиме стока рек и не учитывает влияние на формирование водного режима происходящего увеличения слоя сезонного оттаивания многолетних мерзлых пород. Более обоснованная оценка может быть получена только с использованием гидрогеологической режимной информации, которой в настоящее время крайне мало, особенно в северных и восточных районах страны.

Сложившееся ранее соотношение приходной и расходной части водного баланса подземных водоносных горизонтов в современных нестационарных климатических условиях нарушается за счет снижения регулирующей роли криогенных процессов. Это приводит к увеличению зоны активного водообмена поверхностных и подземных вод, что необходимо учитывать в методах оценки меженного стока рек, естественных и прогнозных ресурсов подземных вод.

Из-за большой значимости криогенных процессов для гидрологического режима рек России целесообразно усилить экспериментальные исследования взаимодействия поверхностных и подземных вод для выявления закономерностей адаптации водного режима территорий к изменениям климата. Без результатов таких исследований невозможно обоснованно разрабатывать адаптационные мероприятия водохозяйственного комплекса страны к происходящим необратимым природным изменениям теплооборота в речных бассейнах, повышать надежность и оправдываемость долгосрочных прогнозов.

Литература

Алексеев В.Р., Фурман М.Ш. Наледи и сток. Новосибирск: Сибирское отделение «Наука», 1976. 118 с.

Атлас снежно-ледовых ресурсов мира в 2-х т. Том 2: в 2-х кн. Книга 1, книга 2. / Гл. ред. В.М. Котляков. М.: ГУГК, 1998. 264 с., 270 с.

Боревский 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.

Вомперский С.Э., Сирин А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Майков Д.А. Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2005. № 5. С. 39-50.

Зотов, Л.В., Фролова Н.Л., Шам С.К. Гравитационные аномалии в 673 бассейнах крупных рек России // Природа. 2016. №5. С. 3-8.

Иванова Н.Н., Ларионов Г.А. Динамика протяженности малых рек: факторы и количественные оценки // Причины и механизмы пересыхания малых рек / Под ред. А.П. Дедкова, Г.П. Бутакова. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1996. С. 37-42.

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.

Кравченко В.В. Особенности взаимодействия поверхностных и подземных вод в малых бассейнах криолитозоны // Ландшафтно-гидрологический анализ территории. Новосибирск: Сибирское отделение «Наука», 1992. С. 88-106.

Лавров С.А., Марков М.Л. Оценка влияния атмосферного давления на уровень и сток грунтовых вод // Инженерные изыскания. 2018. Том 12. № 11-12. С. 44-51. DOI: [10.25296/1997-8650-2018-12-11-12-44-51](https://doi.org/10.25296/1997-8650-2018-12-11-12-44-51)

Марков М.Л., Василенко Н.Г., Гуревич Е.В. Наледи зоны БАМ. Экспедиционные исследования. СПб.: Нестор-история, 2016. 320 с.

References

Alekseev V.R., Furman M.Sh. *Naledi i stok [Ice and runoff]*. Novosibirsk, Nauka, 1976, 118 p. (In Russian).

Atlas snezhno-ledovykh resursov mira v 2 t. Tom 2: v 2 kn. Kniga 1, kniga 2 [World Atlas of Snow and Ice Resources in 2 volumes. Volume 2: in 2 books. Book 1, book 2]. Kotlyakov V.M. (ed.). Moscow, Publ. of General Directorate of Geodesy and Cartography, 1998. 264 p., 270 p. (In Russian).

Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzi J., Matthes H., Vieira G., Streletskiy D.A., Schoeneich P., Romanovsky V.E., Lewkowicz A.G., Abramov A., Allard M., Boike J., Cable W.L., Christiansen H.H., Delaloye R., Diekmann B., Drozdov D., Etmüller B., Grosse G., Guglielmin M., Ingeman-Nielsen Th., Isaksen K., Ishikawa M., Johansson M., Johannsson H., Joo A., Kaverin D., Kholodov A., Konstantinov P., Kröger T., Lambiel Ch., Lanckman J.-P., Luo D., Malkova G., Meiklejohn I., Moskalenko N., Oliva M., Phillips M., Ramos M., Sannel A.B.K., Sergeev D., Seybold C., Skryabin P., Vasiliev A., Wu Q., Yoshikawa K., Zheleznyak M., Lantuit H. Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications*, 2019, vol. 10, art. 264. DOI: [10.1038/s41467-018-08240-4](https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4)

Borevskiy B.V., Markov M.L. Yavlyaetsya li mezhenyiy raskhod rek meroi pitaniya podzemnykh vod ili obshchego podzemnogo stoka? [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 Russian; abstract in English)

Ivanova N.N., Larionov G.A. Dinamika protyazhennosti malykh rek: faktory i kolichestvennyye otsenki [Dynamics of the length of small rivers: factors and quantitative estimates]. In Dedkov A.P., Butakova G.P. (eds.) *Prichiny i mekhanizmy peresykhaniya malykh rek [Causes and mechanisms of drying up of small rivers]*, Kazan', Publ. of Kazan university, 1996, pp. 37-42. (In Russian).

Kravchenko V.V. Rol' naledei v formirovaniy zimnego rechnogo stoka i ledyanogo pokrova rek zapadnoi chasti zony BAMa [The role of ice in the

- Марков М.Л. О хаосе и порядке в криогенных явлениях и процессах, формирующих речной сток // Сборник докладов Международной научно-практической конференции памяти выдающегося русского ученого Ю.Б. Виноградова «Третьи Виноградовские Чтения. Грани гидрологии» (г. Санкт-Петербург, 28-31 марта 2018 г.). СПб.: Научно-технологические, 2018. С. 92-97.
- Марков М.Л., Гуревич Е.В. О влиянии ледяного покрова на подземную составляющую речного стока // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. Вып. 4. С. 477-489. DOI: [10.34753/HS.2019.1.4.477](https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.4.477)
- Обязов В.А., Смахтин В.К. Ледовый режим рек Забайкалья в условиях изменяющегося климата // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 3. С. 227-234. DOI: [10.7868/S0321059614030134](https://doi.org/10.7868/S0321059614030134)
- Обязов В.А., Смахтин В.К. Влияние изменений климата на речной сток в зимний период в Забайкалье // Метеорология и гидрология. 2013. №7. С. 95-102.
- Разумов В.В., Разумова Н.В., Молчанов Э.Н. Подтопление земель в Сибирском регионе России // Геориск. 2015. № 4. С. 22-36.
- Романов В.В., Ферронский В.И., Вакуловский С.М., Катрич И.Ю., Рослый Е.И. Содержание трития в природных водах СССР в 1979-1980 гг. // Водные ресурсы. 1983. № 3. С. 109-115.
- Современные ресурсы подземных и поверхностных вод Европейской части России: формирование, распределение, использование / Отв. ред. Р.Г. Джамалов, Н.Л. Фролова. М.: ГЕОС, 2015. 319 с.
- Соколов Б.Л. Наледи и речной сток. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 190 с.
- Соколов Б.Л. Новые результаты экспериментальных исследований литогенной составляющей речного стока // Водные ресурсы. 1996. Т. 23. №3. С. 278-287.
- Шварцев С.Л. Общая гидрогеология. М.: Недра, 1996. 423 с.
- formation of winter river runoff and ice cover of rivers in the western part of the BAM zone]. *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo institute [Proceedings of the State Hydrological Institute]*, 1986, iss. 312, pp. 34-84. (In Russian).
- Kravchenko V.V. Osobennosti vzaimodeistviya poverkhnostnykh i podzemnykh vod v mal'kikh basseinakh kriolitozony [Peculiarities of interaction of surface and ground waters in small basins of the permafrost zone]. *Landshaftno-gidrologicheskii analiz territorii [Landscape-hydrological analysis of the territory]*, Novosibirsk, Nauka, 1992, pp. 88-106. (In Russian).
- Lavrov S.A. Markov M.L. Otsenka vliyaniya atmosfernogo davleniya na uroven' i stok gruntovykh vod [Assessment of the effect of atmospheric pressure on the level and ground waters flow]. *Inzhenernye izyskaniya [Engineering Survey]*, 2018, vol. 12, no. 11-12, pp. 44-51. (In Russian; abstract in English). DOI: [10.25296/1997-8650-2018-12-11-12-44-51](https://doi.org/10.25296/1997-8650-2018-12-11-12-44-51)
- Markov M.L., Vasilenko N.G., Gurevich E.V. *Naledi zony BAM. Ekspeditsionnye issledovaniya [Icing fields of the BAM zone: expeditionary investigations]*. St. Petersburg, Publ. Nestor-History, 2016. 320 p. (In Russian; abstract in English).
- Markov M.L. O khaose i poryadke v kriogennykh yavleniyakh i protsessakh, formiruyushchikh rechnoi stok [About chaos and order in cryogenic phenomena and processes forming the river runoff]. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii pamyati vydayushchegosya russkogo uchenogo Yu.B. Vinogradova «Tret'i Vinogradovskie Chteniya. Grani gidrologii» (g. Sankt-Peterburg, 28-31 marta 2018) [Proceedings of the international scientific conference in memory of outstanding Russian hydrologist Yury Vinogradov «Third Vinogradov Conference. Facets of hydrology» (Saint Petersburg, March, 28-30, 2018)]*, St. Petersburg, Publ. Naukoemkie tekhnologii, 2018, pp. 92-97. (In Russian; abstract in English).
- Markov M.L., Gurevich E.V. On the influence of ice cover on the underground component of river flow. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2019, vol. 1, iss. 4, pp. 477-489 (In Russian; abstract in English). DOI: [10.34753/HS.2019.1.4.477](https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.4.477)

- Шепелев В.В., Павлова Н.А. Основные составляющие подземного питания рек Якутии // Наука и образование. 2014. №2 (74). С. 117-120.
- Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J., Matthes H., Vieira G., Streletskiy D.A., Schoeneich P., Romanovsky V.E., Lewkowicz A.G., Abramov A., Allard M., Boike J., Cable W.L., Christiansen H.H., Delaloye R., Diekmann B., Drozdov D., Etzelmüller B., Grosse G., Guglielmin M., Ingeman-Nielsen Th., Isaksen K., Ishikawa M., Johansson M., Johannsson H., Joo A., Kaverin D., Kholodov A., Konstantinov P., Kröger T., Lambiel Ch., Lanckman J.-P., Luo D., Malkova G., Meiklejohn I., Moskalenko N., Oliva M., Phillips M., Ramos M., Sannel A.B.K., Sergeev D., Seybold C., Skryabin P., Vasiliev A., Wu Q., Yoshikawa K., Zheleznyak M., Lantuit H. Permafrost is warming at a global scale // Nature Communications. 2019. Vol. 10. Art. 264. DOI: [10.1038/s41467-018-08240-4](https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4)
- Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Lettenmaier D.P., Polischuk Yu.M., Savichev O.G., Smith L.C., Chernokulsky A.V. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections. In: Groisman P.Ya., Gutman G. Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences. Springer Dordrecht Heidelberg New York London, 2013, pp. 111-154. DOI: [10.1007/978-94-007-4569-8_4](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4569-8_4)
- Zotov L.V., Shum C.K., Frolova N.L. Gravity Changes over Russian River Basins from GRACE // Planetary Exploration and Science: Recent Results and Advances / Eds. Jin S., Haghighipour N., Ip W.-H. Springer, Berlin, Heidelberg: Springer Geophysics, 2015. P. 45-59. DOI: [10.1007/978-3-662-45052-9_3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-45052-9_3)
- Zhuravin S.A., Markov M.L. Development of studies in small research basins in Russia and the most recent tasks // Proceedings of the Workshop «Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins» (Goslar-Hahnenklee, Germany, 30 March–2 April 2009) / Eds. by A. Herrmann, S. Schumann. IAHS Publ. 336. 2010. P. 219-224.
- Obyazov V.A., Smakhtin V.K. Ice regime of Transbaikalian rivers under changing climate. *Water Resources*, 2014, vol. 41, no. 3, pp. 225-231. DOI: [10.1134/S0097807814030130](https://doi.org/10.1134/S0097807814030130) (Russ. ed.: Obyazov V.A., Smakhtin V.K. Ledovyi rezhim rek Zabaikal'ya v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata. *Vodnye resursy*, 2014, vol. 41, no. 3, pp. 227-234. DOI: [10.7868/S0321059614030134](https://doi.org/10.7868/S0321059614030134)).
- Obyazov V.A., Smakhtin V.K. Climate change effects on winter river runoff in Transbaikalia. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2013, vol. 38, no. 7, pp. 503-508. DOI: [10.3103/S1068373913070091](https://doi.org/10.3103/S1068373913070091) (Russ. ed.: Obyazov V.A., Smakhtin V.K. Vliyanie izmenenii klimata na rechnoi stok v zimnii period v Zabaikal'e. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2013, no. 7, pp. 95-102)
- Razumov V.V., Razumova N.V., Molchanov E.N. Podtoplenie zemel' v Sibirskom regione Rossii [Flooding of lands in the Siberian region of Russia]. *Georisk [Georisk]*, 2015, no. 4, pp. 22-36. (In Russian; abstract in English).
- Romanov V.V., Ferronskii V.I., Vakulovskii S.M., Katrich I.Yu., Roslyi E.I. Soderzhanie tritiya v prirodnykh vodakh SSSR v 1979-1980 gody [Tritium content in natural waters of the USSR in 1979-1980]. *Vodnye resursy [Water Resources (Russian)]*, 1983, no. 3, pp. 109-115. (In Russian).
- Shepelev V.V., Pavlova N.A. Osnovnye sostavlyayushchie podzemnogo pitaniya rek Yakutii [Main constituents of ground waters delivery to the rivers of Yakutia]. *Nauka i obrazovanie [Science and Education]*, 2014, no. 2, pp. 117-120 (In Russian; abstract in English).
- Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Lettenmaier D.P., Polischuk Yu.M., Savichev O.G., Smith L.C., Chernokulsky A.V. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections. In: Groisman P.Ya., Gutman G. Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences. Springer Dordrecht Heidelberg New York London, 2013, pp. 111-154. DOI: [10.1007/978-94-007-4569-8_4](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4569-8_4)
- Shvartsev S.L. *Obshchaya gidrogeologiya [General hydrogeology]*. Moscow, Publ. Nedra, 1996. 423 p. (In Russian).

Sovremennye resursy podzemnykh i poverkhnostnykh vod Evropeiskoi chasti Rossii: formirovanie, raspredelenie, ispol'zovanie [Modern resources of ground and surface waters of the European part of Russia: formation, distribution, using]. Dzhamalov R.G., Frolova N.L. (eds.). Moscow, Publ. GEOS, 2015. 319 p. (In Russian).

Sokolov B.L. *Naledi i rechnoi stok [Ices and river runoff]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1975. 190 p. (In Russian).

Sokolov B.L. Novye rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy litogennoi sostavlyayushchei rechnogo stoka [New results of experimental studies of the lithogenic component of river runoff]. *Vodnye resursy [Water Resources (Russian)]*, 1996, vol. 23, no. 3, pp. 278-287. (In Russian).

Vompersky S.E., Sirin A.A., Tsyganova O.P., Valyaeva N.A., Maikov D.A. Bolota i zabolochennyye zemli Rossii: popytka analiza prostranstvennogo raspredeleniya i raznoobraziya [Peatlands and paludified lands of Russia: attempt of analyses of spatial distribution and diversity]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya. [Izvestiya RAN (Akad. Nauk SSSR). Seriya Geograficheskaya]*, 2005, no. 5, pp. 39-50. (In Russian).

Zotov L.V., Frolova N.L., Shum S.K. Gravitatsionnye anomalii v 673 basseinakh krupnykh rek Rossii [Gravity anomalies in the basins of major russian rivers]. *Priroda [Nature (Russia)]*, 2016, no. 5, pp. 3-8. (In Russian).

Zotov L.V., Shum C.K., Frolova N.L. Gravity Changes over Russian River Basins from GRACE. In: Jin S., Haghhighipour N., Ip W.-H. (eds.), *Planetary Exploration and Science: Recent Results and Advances*. Springer Geophysics. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015, pp. 45-59. DOI: [10.1007/978-3-662-45052-9_3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-45052-9_3)

Zhuravin S.A., Markov M.L. Development of studies in small research basins in Russia and the most recent tasks. In A. Herrmann, S. Schumann (eds.) *Proceedings of the Workshop «Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins»* (Goslar-Hahnenklee, Germany, 30 March–2 April 2009). IAHS Publ. 336, 2010, pp. 219-224.