

УДК 556.53

DOI: 10.34753/HS.2019.1.4.477

**О ВЛИЯНИИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА
НА ПОДЗЕМНУЮ
СОСТАВЛЯЮЩУЮ РЕЧНОГО
СТОКА** **ON THE INFLUENCE OF ICE
COVER ON THE UNDERGROUND
COMPONENT OF RIVER FLOW**

М.Л. Марков, Е.В. Гуревич

Mikhail L. Markov, Elena V. Gurevich

*Государственный гидрологический инсти-
тут, г. Санкт–Петербург, Россия*

*State hydrological Institute,
St. Petersburg, Russia*

2014mml@gmail.com

2014mml@gmail.com

Аннотация. Речная сеть является основной дренажной подземных вод территорий. Она создается в течение длительного периода и определяется геологическими, климатическими и орографическими условиями. Дренирующая способность гидрографической сети зависит не только от ее густоты, но и от скорости стекания по ней вод. Последняя определяется площадью живого сечения, уклоном, шероховатостью русла. В статье показано, что речной лед северных рек, как сезонное гидравлическое сопротивление, также может оказывать существенное влияние на дренирующую способность гидрографической сети. На примере стока рек в теплые и холодные зимы показано, что ледяной покров регулирует участие подземных вод разных уровней дренирования в формировании речного стока. С потеплением климата регулирующая роль ледяного покрова снижается. Возрастает скорость сработки подземных вод верхних участков речных бассейнов, сопровождаемая увеличением водности в

Abstract. The river network is the main drainage of underground waters of the territories. It is created over a long period and is determined by geological, climatic and orographic conditions. The draining capacity of a hydrographic network depends not only on its density, but also on the speed of water flowing down it. The latter is determined by the area of the living section, slope, roughness of the riverbed. The article shows that the river ice of the Northern rivers, as a seasonal hydraulic resistance, can also have a significant impact on the drainage capacity of the hydrographic network. On the example of river flow in warm and cold winters, it is shown that the ice cover regulates the participation of groundwater at different levels of drainage in the formation of river flow. As the climate warms, the regulatory role of the ice cover decreases. The rate of underground water treatment in the upper sections of river basins increases, accompanied by an

нижних звеньях гидрографической сети. За последние 30-40 лет вклад подземных вод в притоки речной сети в долине рек лесной зоны в межень снизился на 20% по сравнению с предшествующим «квазистационарным» климатическим периодом. Происходит «подсушка» верховьев речных бассейнов, несмотря на рост годовых осадков. В перспективе, при сохранении современных тенденций изменения климата, возможно дальнейшее снижение подземного питания рек, так как дренажная роль гидрографической сети возрастет. Уменьшение запасов подземных вод в речных бассейнах приведет к снижению их регулирующей роли в речном стоке и может возрасти частота наступления экстремально низкой водности. Это необходимо учитывать при разработке адаптивных мероприятий водного хозяйства к изменению климата.

Ключевые слова: ледяной покров; речной сток; подземное питание рек; звенья гидрографической сети; изменение климата; подтопление территорий.

Введение

Дренажная способность гидрографической сети подземных вод зависит не только от эрозионного врезания русел, но и от ее густоты и скорости стекания воды. Расход воды определяется следующими параметрами русла и поймы: площадь живого сечения, уклон, шероховатость. Гидравлические характеристики водных потоков в руслах могут изменяться как в связи с естественными процессами (изменение водности, зарастание, ледовые явления, русловые деформации), так и из-за хозяйственной деятельности (углубление дна, песчано-гравийные карьеры, гидротехническое строительство и так далее). Многочисленные

increase in water content in the lower parts of the hydrographic network. Over the past 30-40 years, the contribution of groundwater in the watershed of the river basins to the supply of rivers in the forest zone in mezhenn decreased by 20% compared to the previous "quasi-stationary" climate period. There is a "drying" of the upper reaches of river basins, despite the growth of annual precipitation. In the future, if the current trends of climate change continue, it is possible to further reduce the underground supply of rivers, as the drainage role of the hydrographic network will increase. The reduction of groundwater reserves in river basins will reduce their regulatory role in river flow and may increase the frequency of occurrence of extremely low water content. This should be taken into account when developing adaptive water management measures to climate change.

Keywords: ice cover; river runoff; underground river feeding; hydrographic network links; climate change; flooding of territories.

опубликованные в гидрологии работы, в основном, касаются оценки влияния зарастания речных русел и ледовых явлений на расчеты стока с использованием кривой связи расходов воды с уровнями, изменения гидродинамики потоков при заторных и зажорных явлениях, русловых деформациях (искусственных и природных), наледного регулирования стока рек криолитозоны, например [Наставление ..., 1958; Алексеев 1987; Бузин, 2004] и др. Вместе с тем, до сих пор не выполнена оценка влияния ледяного покрова рек на формирование их водного режима и дренирующую способность речной сети. Ответ на этот вопрос является актуальным для большей части территории России, где зима длится 4-6 месяцев и более, а толщина льда на реках достигает 1-2 м [Донченко, 1987].

Цель настоящей статьи состоит в оценке влияния ледяного покрова на подземное питание рек. Исследования выполнены на основе данных гидрологических наблюдений на постах Росгидромета, расположенных в бассейнах рек Северная Двина, Плюсса, Алдан.

Методы и результаты исследования

В основе данной работы лежит представление о том, что зимний сток северных рек формируется исключительно за счет имеющихся предзимних запасов подземных вод в речном бассейне. С наступлением зимы, по мере установления низких отрицательных температур воздуха и интенсивного промерзания речного бассейна, при отсутствии жидких осадков происходит сокращение бассейновых запасов воды. Интенсивность и продолжительность спада зимних расходов воды зависят от температуры воздуха и развития процессов ледообразования, аккумулирующего часть зимнего речного стока как на водосборе, в зоне аэрации, так и в речных руслах [Кравченко, 1986; Марков, 2003; Гуревич, 2009].

Наращение толщины льда вызывает стеснение живого сечения русла реки [Наставление ..., 1958; Чижов, 1990], вследствие чего уменьшается ее пропускная способность и изменяется взаимосвязь поверхностных и подземных вод, существовавшая при открытом русле. В период больших потерь воды на ледообразование в начале зимы интенсивность снижения речного стока возрастает, а в бассейнах с малыми запасами подземных вод практически прекращается.

Известно, что большая часть годового стока рек в речных бассейнах, расположенных от лесной зоны до зоны тундр, формируется очень малыми реками длиной менее 10 км (70-80% протяженности гидрографической сети). При толщине льда 0,3-0,5 м эти малые реки могут перемерзнуть или их живое сечение существенно уменьшается. В северных районах России при отсутствии питания подземными водами малые реки перемерзают, а средние реки

могут пересохнуть. Если уменьшение притока подземных вод к реке и, соответственно, снижение речного стока зимой происходит с меньшей интенсивностью, чем снижение пропускной способности участка реки с интенсивным ледообразованием, то на малых реках (где лед жестко скреплен с берегами) может возникнуть напорный режим потока подо льдом. Реализация напора может выразиться либо в разрушении льда, выхода воды на его поверхность и формировании наледей, либо в снижении притока подземных вод в реку. На широких реках напор компенсируется за счет свободного поднятия ледяного покрова [Чижов, 1990].

Так как ледяной покров может оказывать заметное влияние на пропускную способность только малых рек, то исследование изменения стока при ледоставе выполнено отдельно для разных звеньев гидрографической сети. Расчет ординат гидрографов стока, сформированного в разных звеньях гидрографической сети, выполнен по методике, изложенной в работе [Марков, 2003]. Пример полученных результатов расчета показан на рисунке 1. По многолетним данным установлено, что в более холодные зимы при значительной толщине льда снижается суммарный расход воды в малых реках речных бассейнов. Так в бассейне р. Вага (бассейн р. Северной Двины) при изменении максимальной зимней толщины льда с 70 до 45 см суммарный вклад малых рек в сток больших увеличивается в 4-5 раз (при примерно равном предшествующем летне-осеннем увлажнении).

Для бассейна р. Алдан отклонение средней зимней температуры воздуха от средней многолетней на 2-3 градуса (при примерно равном предшествующем летне-осеннем увлажнении) приводит к отклонению среднего зимнего стока рек на 20-30% от среднего многолетнего (рисунок 2). На р. Северной Двине чем ниже температура воздуха зимой и больше толщина льда, тем быстрее происходит снижение стока в реке (рисунок 3). В менее суровые зимы наблюдается уменьшение толщины речного льда и сохранение в реке более высоких расходов воды к концу зимы. Увеличение толщины льда в бассейне р. Северной Двины всего на 10 см приводит к снижению стока по сравнению с теплыми зимами почти в 2 раза в конце зимы в малых ручьях.

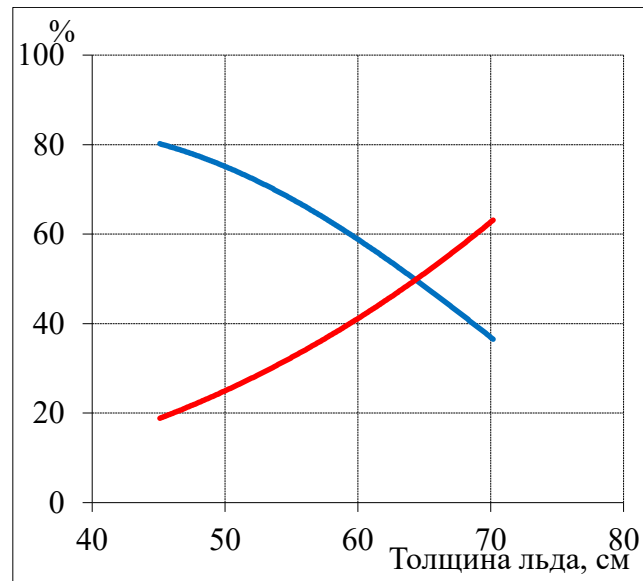


Рисунок 1. Вклад разных звеньев гидрографической сети в формировании зимнего стока реки Ваги ($F=37000 \text{ км}^2$) в зависимости от средней толщины льда:

— реки длиной менее 25 км; — участки рек более 25 км от истока

Figure 1. The contribution of different parts of the hydrographic network in the formation of the winter flow of the Vaga river ($F=37000 \text{ км}^2$) depending on the average thickness of the ice:

— river with a length of less than 25 km;

— sections of rivers more than 25 km from the source

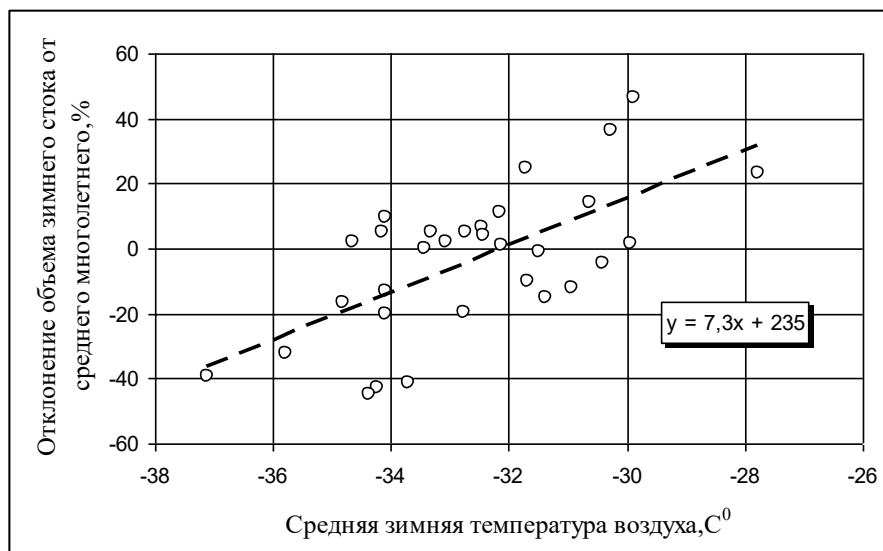


Рисунок 2. Связь отклонения объема зимнего стока рек от среднего многолетнего со средней зимней температурой воздуха (бассейн реки Алдан)

Figure 2. The relationship of the deflection amount of the winter flow of rivers from the middle years with an average winter air temperature (the basin of the Aldan river)

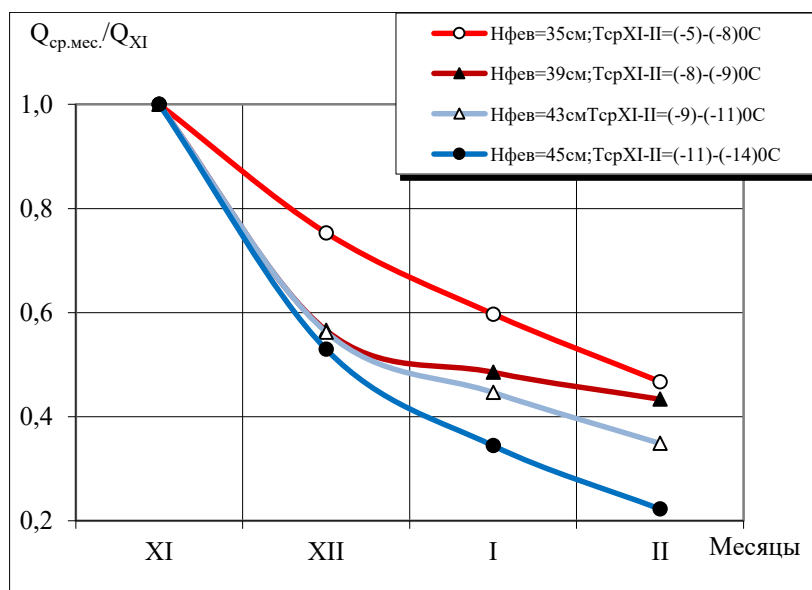


Рисунок 3. Гидрографы стока малых рек бассейна реки Северной Двины в зимы с разной толщиной льда в феврале ($H_{\text{фев}}$) и средней месячной температурой воздуха ($T_{\text{ср XI-II}}$) за ноябрь-февраль

Figure 3. Hydrographs of the flow of small rivers of the Northern Dvina river basin in winter with different ice thickness in February (H_{Feb}) and average monthly air temperature ($T_{\text{average XI-II}}$) for November-February

Еще один пример влияния «суровости» зимы на сток показан на примере сработки водных ресурсов озера (рисунок 4). Истечение воды из озера не зависит от ледовых условий в истоке вытекающей реки, так как там, как правило, лед не образуется. Но приток воды зимой в озеро существенно зависит от пропускной способности втекающих в него малых рек и ручьев. На приведенном рисунке хорошо видно, что в теплые зимы сработка воды в озере существенно ниже, чем в холодные при одинаковом предзимнем наполнении озера.

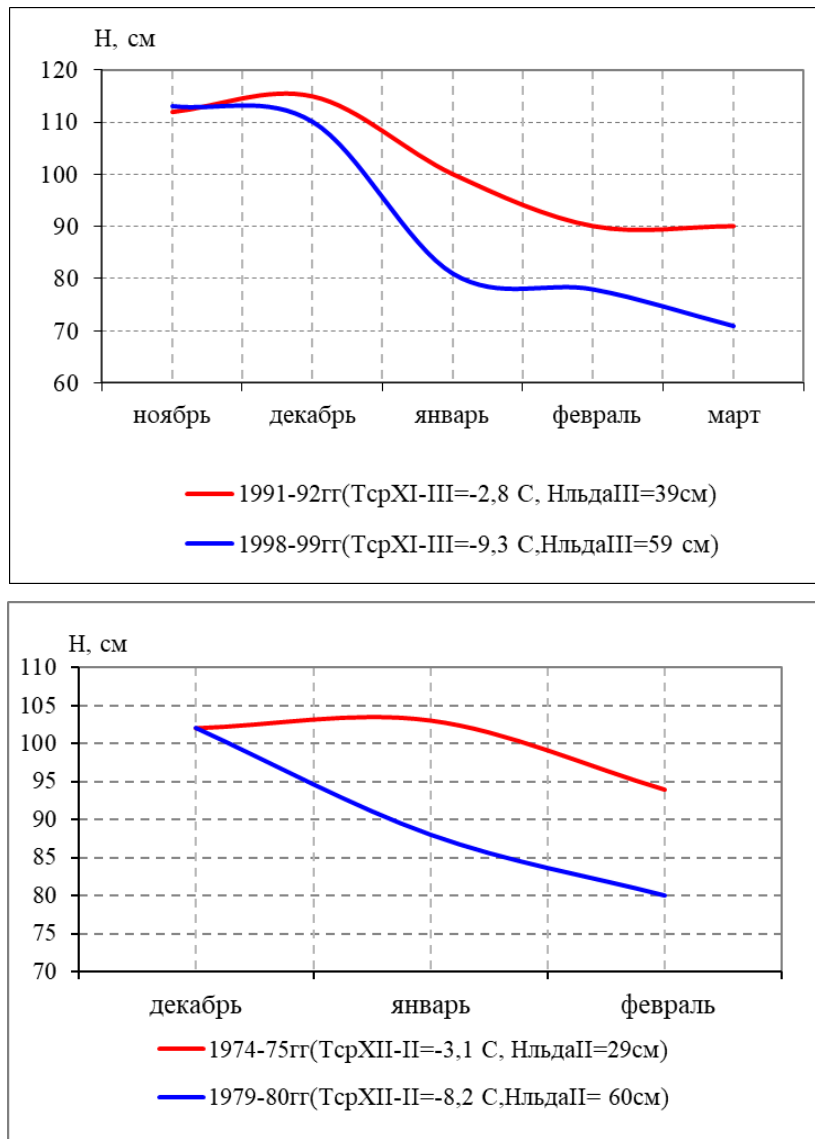


Рисунок 4. Снижение уровня воды (H) в оз. Шугозеро в зимние месяцы при различных средних температурах воздуха за зимние месяцы ($T_{\text{сред. XI-III}}$) и толщине льда ($H_{\text{льдаII}}$)

Figure 4. Decrease in water level (H) in the lake. Shugozero in the winter months at different average air temperatures for the winter months ($T_{\text{average XI-III}}$) and ice thickness (H_{iceII})

Увеличение в теплые зимы пропускной способности малых рек, их дренирующей способности постепенно привело к сработке запасов подземных вод в верхних звеньях гидрографической сети. Это иллюстрирует график на рисунке 5. В минимальном стоке нижнего створа р. Плюсы (д. Брод) сток, фиксируемый в верхнем створе (с. Плюсса), снизился почти на 20% в современных условиях, по сравнению с предшествующим «квазистационарным» климатическим периодом. То есть, происходит «подсушка» приводораздельной зоны. Следует отметить, что это происходит при тенденции роста годовых осадков в современных условиях [Шикломанов, Георгиевский, 2002].

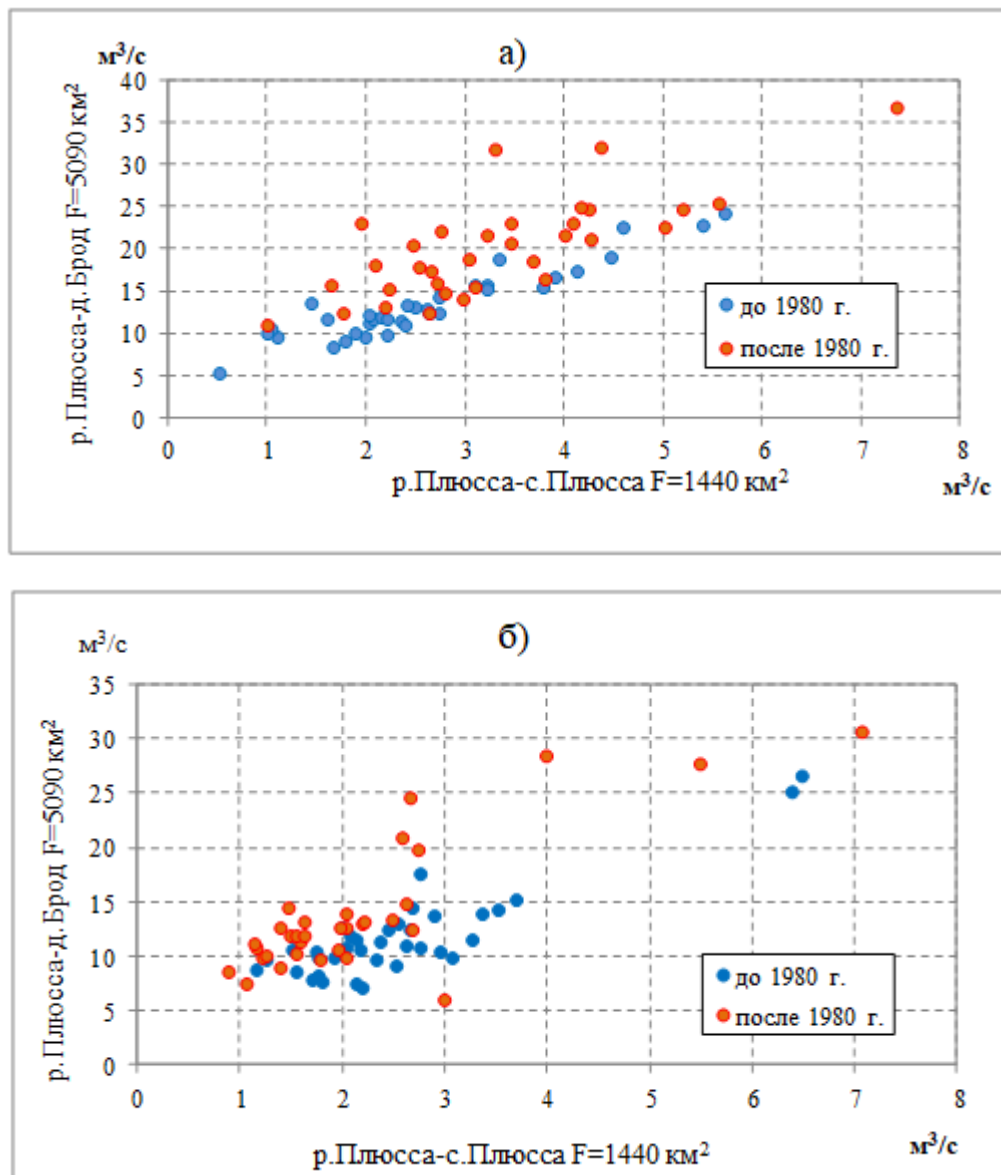


Рисунок 5. Соотношение минимального 30-ти суточного зимнего (а) и летнего (б) стока между двумя гидрометрическими створами на р. Плюссе.

Figure 5. The ratio of the minimum 30-day winter (a) and summer (b) runoff between the two hydrometric channels on the Plus river.

При поступлении значительного количества воды в теплые зимы из верхних звеньев гидрографической сети уровень воды в нижних становится выше (рисунок б), и уменьшаются уклон подземных вод, дренируемых рекой, и их вклад в формирование зимнего стока в нижних звеньях гидрографической сети.

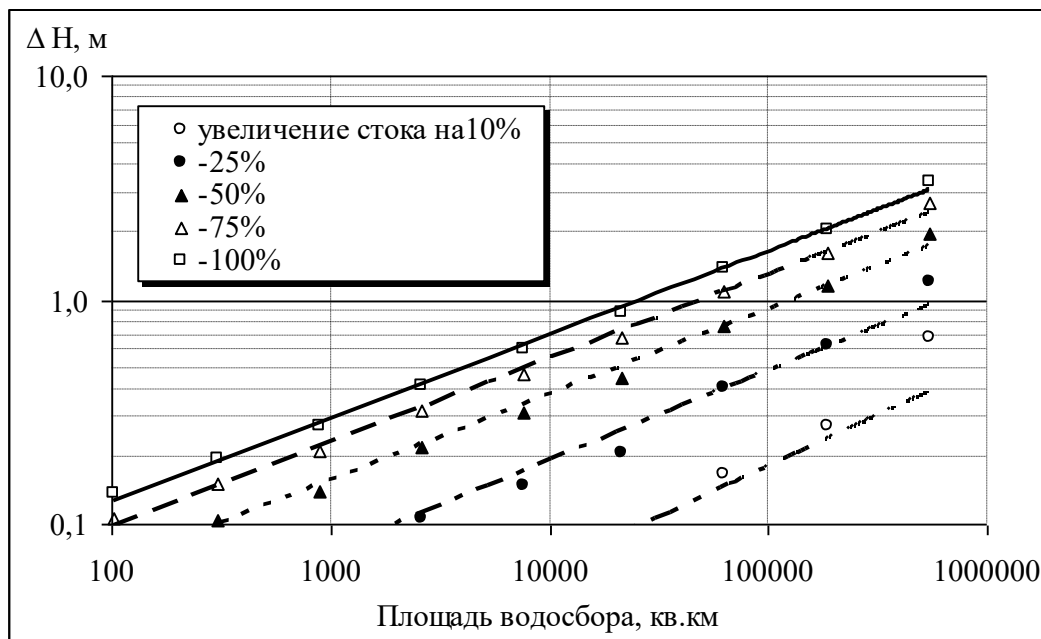


Рисунок 6. Связь увеличения отметок базиса дренирования подземных вод (ΔH) с площадью водосбора равнинных рек при различных приращениях меженного расхода воды (% от среднего многолетнего)

Figure 6. Connection of increase of marks of a basis of drainage of underground waters (ΔH) with the area catchment of lowland rivers at different increments of water flow (% of average perennial)

В результате описанного явления существенное увеличение речного стока компенсируется в теплые зимы в верхних звеньях снижением притока подземных вод в нижних (рисунок 1). В холодные зимы питание рек происходит преимущественно за счет притока подземных вод в нижние звенья гидрографической сети. Таким образом, ледяной покров рек при толщине, соизмеримой с глубиной водотоков, регулирует водообмен гидрографической сети с подземными водоносными горизонтами. Следствием этого регулирования является снижение вариации зимнего стока в нижних звеньях речной сети. Так для малых северных и сибирских рек коэффициент вариации зимнего минимального 30-ти суточного стока превышает 0,5, а для больших рек – колеблется в пределах 0,1-0,2, несмотря на значительную многолетнюю изменчивость метеорологических условий и толщины льда в зимний период.

Сезонное изменение пропускной способности русел рек приводит к изменению условий дренирования подземных вод в разных частях водосборов. Соответственно, это сказывается и на режиме уровня подземных вод. В теплые зимы уровень грунтовых вод,

дренируемых малыми реками, снижается быстрее, а у больших рек, наоборот интенсивность истощения подземных вод уменьшается.

В последние два десятилетия на территории России установились более теплые зимы. Это привело к увеличению зимнего стока рек лесной зоны на 30% и более [Шикломанов, Георгиевский, 2002]. Результаты приведенных выше исследований показывают, что значительную роль в этом сыграло уменьшение толщины льда и увеличение в зимнем стоке рек вклада верхних звеньев гидрографической сети, дренирующих подземные воды, которые ранее меньше срабатывались в холодные зимы. Следствием этого является уменьшение дренирующей способности (из-за повышения базиса дренирования – рисунок 6) в нижних звеньях гидрографической сети. В результате этого в меженные периоды теплых зим снижается разгрузка подземных вод в нижние звенья рек, происходит постепенный рост средних годовых уровней грунтовых вод и подтопление прибрежных территорий [Разумов, Разумова, Молчанов, 2015]. Вместе с тем, так как максимальная толщина ледяного покрова имеет устойчивую тенденцию к уменьшению [Kuusisto, Elo, 2000; Prowse et al., 2007], то, вероятно, следует ожидать, что постепенно в будущем в речных бассейнах будет преобладать снижение запасов подземных вод из-за увеличения их разгрузки при потеплении климата.

Заключение

Увеличение дренирующей способности верхних звеньев гидрографической сети может привести в районах, где ежегодно зимы стали теплее, к более интенсивной сработке подземных вод и постепенному снижению уровня грунтовых вод в приводораздельной зоне речных бассейнов, уменьшению питания малых рек, родников и созданию условия для «почвенной засухи» летом. Это приводит к высыханию лесов (уже наблюдается в больших масштабах в Архангельской и Вологодской областях), к исчезновению малых водотоков, обмелению приводораздельных озер, увеличению пожароопасности болот, истощению подземных источников водоснабжения.

Следует отметить, что на формирование зимнего стока оказывают влияние и другие криогенные явления и процессы, происходящие на водосборах рек (например, миграция незамерзшей влаги в зоне аэрации к фронту промерзания и низкое давление воздуха над грунтовыми водами при снижении воздухопропускной способности мерзлого слоя почвогрунтов). Эти явления играют более заметную роль в районах, где зима неустойчива, лед имеет малую толщину, а промерзание почвогрунтов наблюдается не каждый год.

Анализ зимнего водного и ледового режима рек России привел пока к предварительному выводу, что наибольшее влияние льда на речной сток проявляется в районах, где устойчивая зима длится 3-4 месяца. Поэтому в оценках возможных изменений водного режима северных рек при сохранении современных тенденций изменений климата целесообразно учитывать это явление, чрезвычайно чувствительное к зимнему температурному режиму.

Литература

References

Алексеев В.Р. Наледи. Новосибирск: Наука, 1987. 158 с.

Бузин В.А. Затопы льда и затопные наводнения на реках. СПб.: Гидрометеоздат, 2004. 202 с.

Гуревич Е.В. Влияние температуры воздуха на зимний сток рек (на примере бассейна р. Алдан) // Метеорология и гидрология. 2009. № 9. С. 92-99.

Донченко Р.В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 246 с.

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.

Марков М.Л. Пространственно-временная динамика взаимосвязи

Alekseev V.R. *Naledi [Frazil]*. Novosibirsk, Publ. Nauka, 1987. 158 p. (In Russian).

Buzin V.A. *Zatory l'da i zatopnye navodneniya na rekakh [Ice jams and mash floods on rivers]*. St. Petersburg, Publ. Hidrometeoizdat, 2004. 202 p. (In Russian).

Chizhov A.N. *Formirovanie ledyanogo pokrova i prostanstvennoe raspredelenie ego tolshchiny [Ice pack formation and space distribution of the ice pack depth]*. Leningrad, Publ. Hidrometeoizdat, 1990. 125 p. (In Russian; abstract in English).

Donchenko R.V. *Ledovyi rezhim rek SSSR [Ice regime of the USSR rivers]*. Leningrad, Publ. Hidrometeoizdat, 1987. 246 p. (In Russian; abstract in English).

Gurevich E.V. Influence of air temperature on the river runoff in winter (the Aldan river catchment case study). *Russian Meteorology and Hydrology*, 2009, vol. 34, iss. 9, pp. 628-633. (Russ ed.: Gurevich E.V. Vliyanie temperatury vozdukhа na zimnii stok rek (na primere basseina r. Aldan). *Meteorologija i gidrologija*, 2009, no. 9, pp. 92-99). DOI: [10.3103/S1068373909090088](https://doi.org/10.3103/S1068373909090088)

Kravchenko V.V. Rol' naledei v formirovanii zimnego rечnogo stoka i ledyanogo pokrova rek zapadnoi chasti zony BAMA [The role of icing in the formation of winter river

поверхностных и подземных вод // Сборник работ по гидрологии. 2002. №25. С. 90-104.

Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 6. Гидрологические наблюдения и работы на речных станциях и постах. Часть III. Составление и подготовка к печати гидрологического ежегодника.

Л.: Гидрометеоздат, 1958. 292 с.

Разумов В.В., Разумова Н.В., Молчанов Э.Н. Подтопление земель в Сибирском регионе России // Геориск. 2015. № 4. С. 22-35.

Чижов А.Н. Формирование ледяного покрова и пространственное распределение его толщины. Л.: Гидрометеоздат, 1990. 125 с.

Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю. Влияние антропогенных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы // Изменения климата и их последствия: Материалы специальной сессии Ученого совета Центра международного сотрудничества по проблемам окружающей среды, посвященной 80-летию акад. М.И. Будыко (19-20 мая 1999 г.). / Отв. ред.

runoff and ice cover of rivers in the western part of the BAM zone]. *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta [Transactions of the State Hydrological Institute]*. 1986, vol. 312, pp. 34-84. (In Russian).

Kuusisto E., Elo A.-R. Lake and river ice variables as climate indicators in Northern Europe. *SIL Proceedings, 1922-2010*, 2000, vol. 27, iss. 5, pp. 2761-2764. DOI: [10.1080/03680770.1998.11898168](https://doi.org/10.1080/03680770.1998.11898168)

Markov M.L. Prostranstvenno-vremennaya dinamika vzaimosvyazi poverkhnostnykh i podzemnykh vod [Spatial-temporal dynamics of the relationship of surface and groundwater]. *Sbornik rabot po gidrologii [Collection of works on hydrology]*, 2002, No 25, pp. 90-104. (In Russian).

Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam. Vypusk 6. Gidrologicheskie nablyudeniya i raboty na rechnykh stantsiyakh i postakh. Chast' tret'ya. Sostavlenie i podgotovka k pechati gidrologicheskogo ezhegodnika [Manual to hydrometeorological stations and posts. Issue 6. Hydrological observations and work at river stations and posts. Part three. Compilation and preparation for printing of the hydrological yearbook]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1958. 292 p. (In Russian).

Prowse T.D., Bonsal B.R., Duguay C.R., Lacroix M.P. River-ice break-up/freeze-up: a review of climatic drivers, historical trends and future predictions. *Annals of Glaciology*, 2007, vol. 46, pp. 443-451. DOI: [10.3189/172756407782871431](https://doi.org/10.3189/172756407782871431)

Razumov V.V., Razumova N.V., Molchanov E.N. Podtoplenie zemel' v Sibirskom regione Rossii [Flooding of

- Г.В. Менжулин. СПб.: Наука, 2002. С. 152-164.
- Kuusisto E., Elo A.-R.* Lake and river ice variables as climate indicators in Northern Europe. *SIL Proceedings*, 1922-2010. 2000. Vol. 27. Iss. 5. P. 2761-2764. DOI: [10.1080/03680770.1998.11898168](https://doi.org/10.1080/03680770.1998.11898168)
- Prowse T.D., Bonsal B.R., Duguay C.R., Lacroix M.P.* River-ice break-up/freeze-up: a review of climatic drivers, historical trends and future predictions. *Annals of Glaciology*. 2007. Vol. 46. P. 443-451. DOI: [10.3189/172756407782871431](https://doi.org/10.3189/172756407782871431)
- lands in the Siberian Region of Russia]. *Georisk [Georisk]*, 2015, no. 4, pp. 22-35. (In Russian; abstract in English).
- Shiklomanov I.A., Georgievskii V.Yu.* Vliyanie antropogennykh izmenenii klimata na gidrologicheskii rezhim i vodnye resursy [The impact of anthropogenic climate change on the hydrological regime and water resources]. In *Menzhulin G.V. (ed.) Izmeneniya klimata i ikh posledstviya: Materialy spetsial'noi sessii Uchenogo soveta Tsentra mezhdunarodnogo sotrudnichestva po problemam okruzhayushchei sredy, posvyashchennoi 80-letiyu akad. M.I. Budyko (19-20 maya 1999 g.). [Climate change and their consequences: Materials of a special session of the Scientific Council of the Center for International Cooperation on Environmental Issues, dedicated to the 80th anniversary of Acad. M.I. Budyko (May 19-20, 1999)]*. St. Petersburg, Nauka, 2002, pp. 152-164. (In Russian).