

УДК 551.349

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-4-533-539>

Обзорная статья

Основные особенности взаимодействия подземных вод и мерзлых горных пород

В. В. Шепелёв[✉], М. Н. Железняк

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
[✉]sheply@mpi.ysn.ru

Аннотация

На основе обобщения и анализа имеющихся сведений и результатов собственных исследований авторов рассмотрены особенности взаимодействия подземных вод и мерзлых горных пород. Подчеркивается, что важнейшая роль в существовании этой связи принадлежит фазовым переходам подземных вод в твердое состояние и обратно, т. е. процессам промерзания водоносных и протаивания льдистых горных пород. Выделены и охарактеризованы основные особенности взаимодействия гравитационных подземных вод и мерзлых горных пород в условиях криолитозоны.

Ключевые слова: подземные воды, мерзлые горные породы, фазовые переходы воды, промерзание водоносных горных пород, протаивание льдистых горных пород, криолитозона

Финансирование. Работа выполнена за счет конкурсного бюджетного финансирования по проекту СО РАН «Подземные воды криолитозоны: закономерности формирования и режима, особенности взаимодействия с поверхностными водами и мерзлыми породами, перспективы использования» (№ АААА-Ф20-120111690088).

Для цитирования: Шепелёв В.В., Железняк М.Н. Основные особенности взаимодействия подземных вод и мерзлых горных пород. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(4):533–539. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-4-533-539>

Review article

Main characteristics of the groundwater and permafrost interaction

V. V. Shepelev[✉], M. N. Zhelezniak

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, Russian Federation
[✉]sheply@mpi.ysn.ru

Abstract

An analysis of the groundwater and permafrost interaction is presented in this study. The analysis is based on an extensive review of scientific literature and our own investigations. The article specifically examines the significant impact of phase changes between liquid and solid states in groundwater, including the freezing of aquifers and the thawing of ice-rich permafrost. The discussion highlights the essential characteristics of groundwater interactions with frozen ground in permafrost regions.

Keywords: groundwater, permafrost, water phase changes, aquifer freezing, ice-rich permafrost thawing, cryolithozone

Funding. This study was conducted within the budget funding under the SB RAS project “Groundwaters of the permafrost zone: patterns of formation and regime, features of interaction with surface waters and frozen rocks, prospects for their use (number АААА-Ф20-120111690088).

For citation: Shepelev V.V., Zhelezniak M.N. Main characteristics of the groundwater and permafrost interaction. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(4):533–539. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-4-533-539>

Введение

Известно, что в криолитозоне при сезонном и многолетнем промерзании и протаивании горных пород происходят не только фазовые переходы

воды из жидкого состояния в твердое и обратно, но и из газообразного в твердое состояние (процесс десублимации), из твердого в газообразное (процесс сублимации), из жидкого в газообразное

(процесс испарения) и из газообразного в жидкое состояние (процесс конденсации). Следовательно, криолитозону правомерно рассматривать как геосферу, в пределах которой весьма активны межфазовые переходы воды, обуславливающие всю сложность взаимодействия подземных вод и горных пород при знакопеременных изменениях температуры последних в течение года или определенного многолетнего периода.

Однако в гидрогеологии и геокриологии вопрос о взаимодействии подземных вод и мерзлых горных пород рассматривается несколько иначе, что связано с общепринятой в отечественной и зарубежной литературе трактовкой понятия «подземные воды». Согласно существующим представлениям, к подземным водам относятся только свободные «жидкие» воды, находящиеся и передвигающиеся в порах и трещинах горных пород [1]. Таким образом, вода, содержащаяся в горных породах в газообразном и твердом состояниях, а также физически и химически связанная в них вода не могут быть названы подземной водой. Так, при фазовом переходе подземных гравитационных вод в твердое состояние их уже не относят к категории подземных вод, а рассматривают как составную часть горной породы – подземный лед, что подчеркивается и ее специфическим названием: «мерзлая горная порода».

Подобный подход к толкованию понятия о подземных водах и к исследованию вопроса об их взаимодействии с мерзлыми горными породами не только не учитывает принципа единства природных вод, но и в какой-то степени противоречит существующим в почвоведении, грунтоведении и инженерной геологии классификациям видов воды в горных породах, а также определению подземной гидросферы как целостного и единого объекта исследования [2–9].

Тем не менее, принятый в геокриологии и гидрогеологии подход к изучению особенностей взаимодействия подземных вод и мерзлых горных пород на данном этапе исследования можно считать правомерным, что подтверждается, прежде всего, весьма существенными результатами, полученными к настоящему времени. Установлено, что формирование и эволюция криолитозоны существенным образом отражаются на условиях питания, движения и разгрузки подземных вод, на их химическом составе, режиме, температуре и ресурсах, а также на общей гидродинамической обстановке отдельных водонос-

ных горизонтов и комплексов. Огромное влияние многолетнемерзлых пород на гидрогеологические условия проявилось и в том, что они дифференцировали подземные воды на над-, меж- и подмерзлотные, значительно осложнив тем самым гидрогеологический разрез и характер водообмена в подземных водоносных структурах. С другой стороны, и гидрогеологические условия оказали большое влияние на степень многолетнего промерзания недр, во многом определив значения основных параметров криолитозоны: ее мощность, прерывистость, температуру [10–15].

Имеющиеся результаты изучения особенностей взаимодействия гравитационных подземных вод и мерзлых горных пород можно представить в виде следующих обобщенных положений.

1. *Промерзание подземных вод существенно изменяет водопроницаемость горных пород, поскольку образующийся после промерзания водоносных слоев, горизонтов и комплексов подземный лед цементирует поры и трещины. Это приводит к тому, что водоносные до промерзания горные породы переходят после этого в качественно новое с гидрогеологической точки зрения состояние, становясь водоупорными.*

Образование подобных криогенных водоупоров вызывает расчленение гидрогеологического разреза, способствует уменьшению водоемкости гидрогеологических структур, осложняет условия их питания, ухудшает связь подземных вод с поверхностными водами и т. д., т. е. существенно трансформирует и осложняет гидрогеологическую обстановку в том или ином регионе, районе или участке развития многолетнемерзлых пород.

2. *При промерзании водоносных пород и последующем их протаивании изменяется объем воды в горных породах, что существенно влияет на гидрогеологическую обстановку и способствует развитию специфических криогенных физико-геологических процессов и явлений.*

Промерзание подземных вод вызывает увеличение их объема. Следовательно при льдообразовании происходит отжатие гравитационных подземных вод из зоны промерзания в непромерзшую часть водосодержащих пород. За счет этого эффекта, который можно назвать кристаллизационно-компрессионным или поршневым, происходит либо формирование криогенного напора в безнапорных водоносных слоях и горизонтах, либо увеличение существующего до промерзания гидростатического напора в них, что не только изменяет условия питания, транзита и

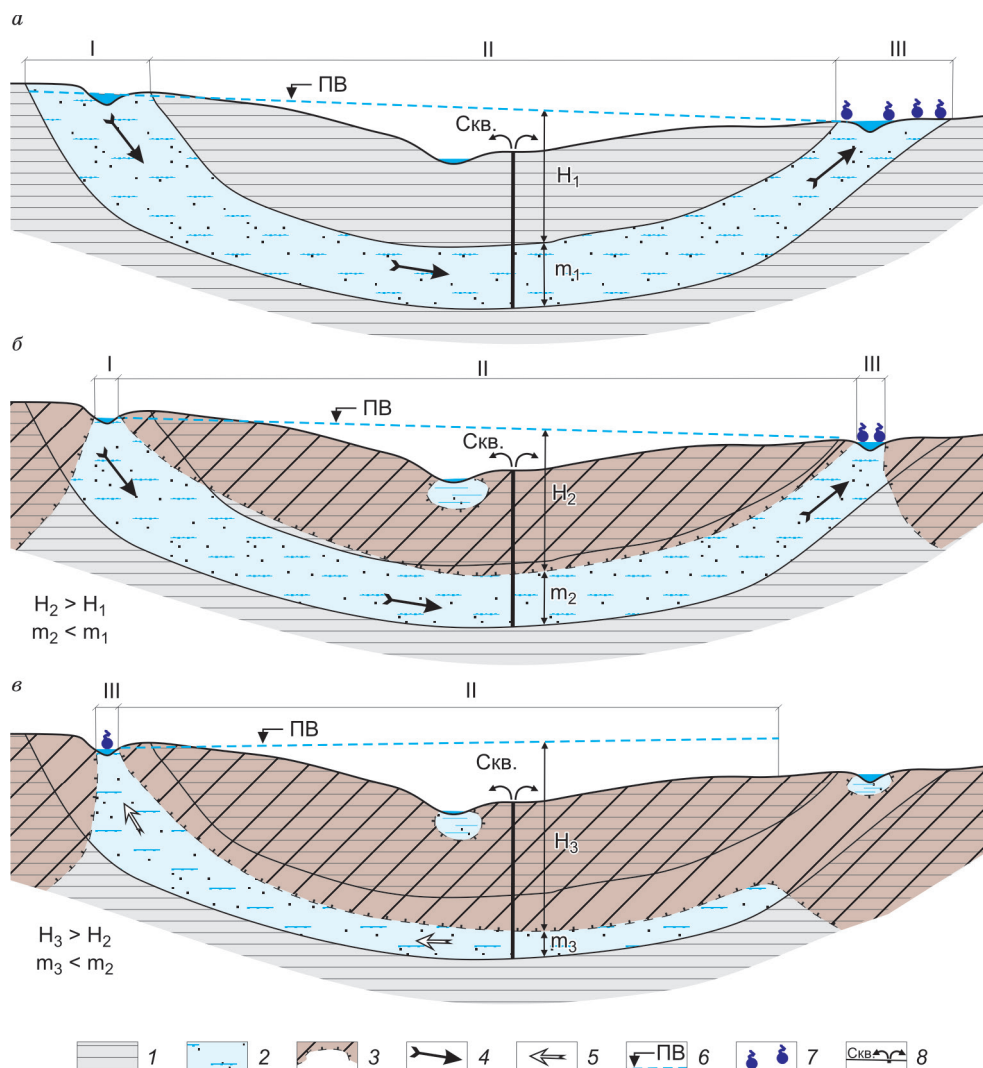


Схема подземной водообменной системы артезианского типа до промерзания (а) и ее изменения на двух последующих этапах промерзания горных пород (б, в).

1 – литологические водоупоры; 2 – водоносные породы; 3 – многолетнемерзлые породы и граница их распространения; 4 – направление движения подземных вод под воздействием гидравлического градиента; 5 – направление движения подземных вод, обладающих аградационным типом криогидродинамического режима; 6 – уровень подземных вод; 7 – родники; 8 – фонтанирующая буровая скважина.

H – величина гидростатического напора, м; m – мощность водоносного горизонта, м; I – область питания подземных вод; II – область создания гидростатического напора; III – область разгрузки подземных вод

Scheme of the groundwater exchange system of artesian type before freezing (a) and its changes at two subsequent stages of ground freezing (б, в).

1 – lithological aquitards; 2 – aquifers; 3 – permafrost and its boundaries; 4 – direction of groundwater flow due to hydraulic gradient; 5 – flow direction of groundwater of aggradation cryohydrodynamic regime; 6 – groundwater level; 7 – springs; 8 – flowing well.

H – hydrostatic head, m; m – aquifer thickness, m; I – groundwater recharge area; II – area of hydrostatic pressure; III – groundwater discharge area

разгрузки подземных вод, но и направленность их движения (см. рисунок). При промерзании неглубокозалегающих от дневной поверхности водоносных слоев, линз и чаш протаивания за счет указанного кристаллизационно-компрессионного эффекта происходит образование таких криоген-

ных форм и явлений, как сезонные и многолетние бугры пучения, инъекционное льдообразование, трещинообразование и др.

Протаивание частично промерзших ранее водоносных горных пород, напротив, сопровождается уменьшением объема воды в них, что приводит

к снижению или снятию криогенного напора. Этим эффектом, называемым иногда кристаллизационно-вакуумным, можно объяснить, в частности, аномально низкое положение пьезометрического уровня подмерзлотных вод в некоторых артезианских структурах криолитозоны [16, 17]. Возникновение криогенных пьезометрических депрессий в подмерзлотных водоносных горизонтах, как правило, интенсифицирует вертикальную фильтрацию подземных вод, осуществляемую за счет разности напоров. В результате подтока высоконапорных подземных вод из более глубокозалегающих водоносных горизонтов гидрогеодинамическая обстановка, нарушенная фазовыми переходами воды из твердого в жидкое состояние, должна сравнительно быстро стабилизироваться. Однако в тех случаях, когда подмерзлотные водоносные горизонты отделены от глубже залегающих высоконапорных подземных вод литологическими водоупорами, стабилизация возникших криогенных пьезометрических аномалий будет происходить очень медленно, поскольку выравнивание гидростатических напоров осуществляется в данных случаях в основном за счет слабоинтенсивной горизонтальной, а не вертикальной фильтрации. Именно в таких районах и наблюдаются в настоящее время аномально низкие пьезометрические уровни подмерзлотных вод.

3. Изменение агрегатного состояния подземных вод при их промерзании и протаивании сопровождается соответственно выделением и затратой тепла. Это предопределяет тесную зависимость интенсивности процессов промерзания и протаивания горных пород от гидрогеологических условий.

При промерзании пресных подземных вод происходит выделение скрытой теплоты льдообразования (около $0,334 \cdot 10^6$ Дж/кг⁻¹). Отсюда следует, что чем выше коллекторские свойства горных пород и больше их водонасыщенность, тем менее интенсивно будет происходить их промерзание. Данное обстоятельство обуславливает существенную зависимость геокриологических условий от гидрогеологического фактора. Так, при наступлении холодного многолетнего периода литологические водоупоры и слабоводонасыщенные породы будут проморожены на большую глубину, чем водоносные горные породы, обладающие высокими коллекторскими свойствами. При промерзании же водоносных слоев, горизонтов или комплексов, содержащих солонова-

тые, соленые и рассольные подземные воды, льдообразования при их охлаждении ниже 0 °С может вообще не происходить, ввиду низкой температуры начала замерзания подземных водных растворов. Следовательно, в подобных случаях как бы исключается из баланса существенный приходный источник тепла, что приводит к увеличению глубины охлаждения горных пород и формированию отрицательнотемпературных подземных вод (криопэгов).

Протаивание мерзлых пород сопровождается, напротив, затратой того же количества тепла. Таким образом, интенсивность сезонного и многолетнего протаивания промерзших водоносных слоев, горизонтов или комплексов также зависит от коллекторских свойств горных пород и прежде всего от их льдонасыщенности.

4. Процессы промерзания и протаивания водоносных горных пород оказывают существенное воздействие на гидрохимическую обстановку, способствуя формированию специфического химического состава подземных вод и вызывая изменение их вертикальной гидрохимической зональности.

При промерзании водоносных горных пород происходит перераспределение солевого состава между образующимся льдом, жидкой фазой подземных вод и водовмещающими породами (криогенная метаморфизация химического состава). Степень и характер криогенного изменения химического состава подземных вод зависит от скорости промерзания, мощности водоносных горных пород и интенсивности водообмена, а также от исходного химического состава и минерализации воды в промерзающих горных породах [18–22]. В целом промерзание подземных вод приводит к вымораживанию наиболее подвижных и хорошо растворимых солей и микрокомпонентов из зоны льдообразования в непромерзшую часть водоносных горизонтов и комплексов. В результате этого понижается минерализация твердой фазы подземных вод, где остаются преимущественно труднорастворимые соли, а также соединения, перешедшие в форму кристаллогидратов. Значительное повышение минерализации жидкой фазы подземных вод при льдообразовании может способствовать формированию криопэгов, что существенно изменяет характер и степень промерзания водонасыщенных пород и нарушает исходную гидрохимическую зональность в них.

При протаивании промерзших ранее водонасыщенных слоев, горизонтов и комплексов про-

исходит неполный переход солей из льда в жидкую фазу. Это может вызывать в определенных условиях криогенное опреснение подземных вод и формирование зоны или пояса ультрапресных вод.

5. Многократное промерзание и протаивание водоносных слоев, горизонтов и комплексов изменяют физические свойства водосодержащих горных пород, повышая значения их трещиноватости и эффективной пористости, что приводит к формированию сильнообводненных зон на контакте талых и мерзлых пород.

Физические изменения состава горных пород под влиянием периодической кристаллизации насыщающей их воды (криометаморфизм по А. И. Баранову [23], или криогенная деструкция по Ю. В. Шумилу [24]), особенно интенсивно протекают в верхних частях разреза криолитозоны, где происходят сезонные переходы жидкой фазы подземных вод в твердую и обратно. Это способствует значительному повышению фильтрационных свойств горных пород и широкому распространению различных видов надмерзлотных вод.

В средних и нижних частях разреза криолитозоны также отмечается развитие криогенной деструкции горных пород, что приводит к возникновению зон вторичной их трещиноватости (криогенной дезинтеграции). Изменения мощности многолетнемерзлых горных пород и размеров сквозных таликов в этом случае связаны с различными многолетними колебаниями их температуры, а также с особенностями конвективного переноса тепла подземными водами в таликах инфильтрационного типа. Формирование на контакте талых и мерзлых толщ сильнообводненных зон криогенной дезинтеграции горных пород существенно отражается на гидрогеологической обстановке, способствуя усилению водообмена в водоносных структурах и улучшению условий взаимосвязи подземных вод с поверхностными.

6. Подземные гравитационные воды, обладая высокой удельной теплоемкостью, положительной температурой и подвижностью, обуславливают формирование конвективного теплового потока, который в определенных гидрогеологических условиях может оказывать заметное влияние на геокриологическую обстановку и температурное поле горных пород.

Изучению данного вопроса уделяли внимание многие отечественные исследователи [25–27].

Следует отметить, что имеющиеся теоретические разработки по данной проблеме касаются в основном только ламинарного режима фильтрации подземных вод. При этом в зависимости от термического состояния горных пород предлагается различать два основных типа конвективно-теплообмена:

а) теплообмен при фильтрации подземных вод в талых зонах, оконтуренных или подстилаемых водонепроницаемыми мерзлыми горными породами;

б) теплообмен при фильтрации соленых подземных вод и рассолов, имеющих отрицательную температуру.

К настоящему времени наиболее полно исследован первый из выделенных типов конвективного теплообмена. Выявлен, в частности, эффект поперечной дисперсии конвективного теплового потока. Дисперсия происходит в основном в результате несовпадения вектора скорости фильтрации с направлением кондуктивного теплового потока в пористых и трещиноватых горных породах.

Перечисленные общие закономерности, характеризующие основные особенности взаимодействия подземных вод и мерзлых горных пород, свидетельствуют о тесной генетической взаимосвязи между гидрогеологическими и геокриологическими условиями. Дальнейшее изучение данного вопроса должно идти по пути исследования не только влияния фазовых переходов вода ↔ лед на мерзлотно-гидрогеологические условия, но и роли других фазовых переходов воды, происходящих при сезонном и многолетнем промерзании и протаивании горных пород.

Список литературы / References

1. Пиннекер Е.В., Писарский Б.И., Шварцев С.Л. и др. *Основы гидрогеологии. Общая гидрогеология*. Новосибирск: Наука; 1980. 231 с.
Pinneker E.V., Pisarskiy B.I., Shvartsev S.L., et al. *Fundamentals of hydrogeology. General hydrogeology*. Novosibirsk: Nauka; 1980. 231 p. (In Russ.)
2. Вернадский В.И. *Избранные сочинения*. Т. 4, кн. 2. М.: Изд-во АН СССР; 1960. 651 с.
Vernadskiy V.I. *Selected Works*. Vol. IV, Book 2. Moscow: USSR Academy of Sciences Press; 1960. 651 p. (In Russ.)
3. Саваренский Ф.П. О принципах гидрогеологического районирования. *Советская геология*; 1947; (19):19–23.
Savarenskiy F.P. On principles of hydrogeological regionalization. *Sovetskaya geologiya [Soviet Geology]*. 1947;(19):19–23. (In Russ.)

4. Овчинников А.М. *Общая гидрогеология*. М.: Гостеолиздат; 1955. 383 с.
- Ovchinnikov A.M. *General hydrogeology*. Moscow: Gosgeolizdat; 1955. 383 p. (In Russ.)
5. Пиннекер Е. В. Некоторые замечания о терминологии. В кн.: *II Международная конференция по мерзлотоведению: доклады и сообщения*. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР; 1973. Вып. 8:270–271.
- Pinneker Ye.V. Some notes on terminology. In: *The 2nd International Permafrost Conference: Papers and Reports*. Yakutsk: Permafrost Institute SB AS USSR, vol. 8; 1975, pp. 270–271. (In Russ.)
6. Шепелёв В.В. *К понятию о криолитосфере Земли*. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН; 1997. 80 с.
- Shepelev V.V. *On the concept of Earth's cryosphere*. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS; 1997. 80 p. (In Russ.)
7. Шепелёв В.В. Фазовые переходы воды – основа природных водообменных циклов. В кн.: *Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов на рубеже третьего тысячелетия, г. Томск, 03–07 сентября 2000 г.* Томск: Изд-во НТЛ; 2000:495–498.
- Shepelev V.V. Phase changes of water – a basis for natural water cycles. In: *Fundamental problems of water and water resources at the turn of the 3rd millennium*. Tomsk: NTL; 2000:495–498. (In Russ.)
8. Алексеев В.Р. Вода и лед в криосфере Земли. В кн.: Корытный Л.М. (ред.) *Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов: Материалы научной конференции, г. Иркутск, 20–24 сентября 2005 г.* Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН; 2005. С. 4–7.
- Alekseev V.R. Water and ice in the Earth's cryosphere. In: Korytniy L.M. (ed.) *Fundamental problems of the study and use of water and water resources: Proceedings of the scientific conference, Irkutsk, September 20–24, 2005*. Irkutsk: Institute of Geography SB RAS; 2005, pp. 4–7. (In Russ.)
9. Алексеева Л.П., Алексеев С.В. Взаимодействие подземных вод и многолетнемерзлых пород в условиях техногенеза. В кн.: *Материалы XVI Всероссийского совещания по подземным водам Востока России*. Новосибирск; 2000:77–79.
- Alekseeva L.P., Alekseev S.V. Interaction of groundwater and permafrost under technogenesis. In: *Proceedings of the 16th Russian meeting on groundwater in Eastern Russia*. Novosibirsk; 2000:77–79. (In Russ.)
10. Шварцев С.Л. Новые горизонты гидрогеологии. В кн.: *Подземные воды Востока России: Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России, г. Тюмень, 22–25 июня, 2009*. Тюмень: Тюменский дом печати; 2009:3–7.
- Shvartsev S.L. New horizons in hydrogeology. In: *Groundwaters in Eastern Russia: Proceedings of the Russian meeting on groundwaters in Eastern Russia, Tyumen, June 22–25, 2009*. Tyumen: Tyumen Publishing House; 2009:3–7. (In Russ.)
11. Фотиев С.М. Проблема взаимодействия подземных вод и мерзлых толщ в различных типах гидрогеологических структур на территории СССР. В кн.: *Материалы VIII Всесоюзного межведомственного совещания по геокриологии (мерзлотоведению)*. Якутск: Якуткнигоиздат; 1966:38–47.
- Fotiev S.M. Problem of groundwater-permafrost interaction in different types of hydrogeological structures in the USSR. In: *Proceedings of the 8th All-Union Interdepartmental Meeting on Geocryology (Permafrost Science)*. Yakutsk; 1966:38–47. (In Russ.)
12. Романовский Н.Н., Чижов А.Б. Вопросы взаимосвязи и взаимодействия подземных вод и мерзлых горных пород. *Вестник Московского университета. Серия 4, Геология*. 1967;(4):22–36.
- Romanovskiy N.N., Chizhov A.B. Issues of groundwater-permafrost relationship and interaction. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 1967;(4):22–36. (In Russ.)
13. Brown R. J. E. *Permafrost in Canada*. Toronto: University Toronto Press; 1970. 234 p.
14. Carey K.L. *Icings developed from surface water and ground water. (U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory Cold regions science and engineering monograph)*; Hanover, New Hampshire; 1973. 67 p.
15. Пиннекер Е.В., Писарский Б.И. Особенности взаимодействия подземных вод и многолетнемерзлых пород. В кн.: Дзюба А.А. (ред.) *Региональная гидрогеология и инженерная геология Восточной Сибири*. Новосибирск: Наука; 1978:21–27.
- Pinneker Ye.V., Pisarskiy B.I. Characteristics of the groundwater interaction with permafrost. In: Dzuba A.A. (ed.) *Regional hydrogeology and engineering geology of Eastern Siberia*. Novosibirsk: Nauka; 1978: 21–27. (In Russ.)
16. Суходольский С.Е. *Парагенезис подземных вод и многолетнемерзлых пород*. М.: Наука; 1982. 152 с.
- Sukhodolskiy S.Ye. *Paragenesis of groundwater and permafrost*. Moscow: Nauka; 1982. 152 p. (In Russ.)
17. Толстихин Н.И., Максимов В.М. Якутский артезианский бассейн. *Записки Ленинградского горного института*. 1955;31(2):136–149.
- Tolstikhin N.I., Maksimov V.M. Yakutsk artesian basin. *Zapiski Gornogo Instituta=Journal of Mining Institute*. 1955;31(2):136–149. (In Russ.)
18. Балобаев В.Т., Иванова Л.Д., Никитина Н.М. и др. Гидродинамические процессы формирования подмерзлотных вод. В кн.: *Подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования*. Анисимова Н.П. (ред.). Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2003: 51–67.
- Balobaev V.T. Hydrodynamic processes of groundwater formation. *Groundwaters in Central Yakutia and prospects for their use*. Anisimova N.P. (ed.). Novosibirsk: SB RAS; 2003:51–67. (In Russ.)
19. Кононова П.С. Криогенная метаморфизация подземных вод Восточно-Сибирской артезианской области. *Советская геология*. 1974;(3):106–115.

Kononova R.S. Cryogenic metamorphization of groundwater in the East-Siberian artesian region. *Sovetskaya geologiya [Soviet Geology]*. 1974;(3):106–115. (In Russ.)

20. Анисимова Н.П. *Криогидрогеохимические особенности мерзлой зоны*. Новосибирск: Наука; 1981. 153 с.

Anisimova N.P. *Cryohydrogeochemical features of the frozen zone*. Novosibirsk: Nauka; 1981. 153 p. (In Russ.)

21. Алексеев С.В. *Криогенез подземных вод и горных пород (на примере Далдыно-Алакитского района Западной Якутии)*. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2000. 117 с.

Alekseev S.V. *The cryogenesis of groundwaters and rocks (an example of the Daldyn-Alakit region of Western Yakutia)*. Novosibirsk: SB RAS Publishing House; 2000. 117 p. (In Russ.)

22. Фотиев С.М. *Криогенный метаморфизм пород и подземных вод (условия и результаты)*. Новосибирск: Гео; 2009. 277 с.

Fotiev S.M. *Cryogenic metamorphism of rocks and ground waters (conditions and results)*. Novosibirsk: Academic Publishing House «Geo»; 2009. 279 p. (In Russ.)

23. Анисимова Н.П., Павлова Н.А. *Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии*. Новосибирск: Гео; 2014. 189 с.

Anisimova N.P., Pavlova N.A. *Hydrogeochemical Investigations of permafrost in Central Yakutia*. Novosibirsk: Geo; 2014. 189 p. (In Russ.)

24. Баранов И.Я. Криометаморфизм горных пород и его значение для палеогеографии четвертичного пе-

риода. В кн.: Качурин С.П. (ред.) *Вопросы криологии при изучении четвертичных отложений*. М.: Изд-во АН СССР; 1962:6–36.

Baranov I.Ya. Rock cryometamorphism and its implications for Quaternary paleogeography. In: Kachurin S.P. (ed.) *Issues of cryology in Quaternary sediment research*. Moscow: USSR Academy of Sciences; 1962:6–36. (In Russ.)

25. Шумилов Ю.В. *Континентальный литогенез и россыпеобразование в криолитозоне*. Новосибирск: Наука; 1986. 171 с.

Shumilov Yu.V. *Continental lithogenesis and placer formation in permafrost regions*. Novosibirsk: Nauka; 1986. 171 p. (In Russ.)

26. Гольдтман В.Г., Чистопольский С.Д. Особенности процесса массо- и теплопереноса при фильтрации жидкости в пористой среде. В кн.: *Материалы VIII Всесоюзного междуведомственного совещания по геокриологии (мерзлотоведению)*. Якутск; 1966, Вып. 4:144–150.

Goldtman V.G., Chistopolskiy S.D. Characteristic features of mass and heat transfer upon fluid flow in porous medium. In: *Proceedings of the 8th All-Union Interdepartmental Meeting on Geocryology (Permafrost Science)*. Yakutsk; 1966, vol. 4:144–150. (In Russ.)

27. Фельдман Г.М. *Передвижение влаги в талых и промерзающих грунтах*. Новосибирск: Наука; 1988. 256 с.

Feldman G.M. *Moisture migration in thawed and freezing soils*. Novosibirsk: Nauka; 1988. 256 p. (In Russ.)

Об авторах

ШЕПЕЛЁВ Виктор Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, академик Академии наук РС(Я), главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-3434-6969>, ResearcherID: P-8179-2018, Scopus Author ID: 7003566339, РИНЦ AuthorID: 58611, e-mail: sheply@mpi.ysn.ru

ЖЕЛЕЗНЯК Михаил Николаевич, член-корреспондент РАН, академик Академии наук РС(Я), доктор геолого-минералогических наук, директор, <https://orcid.org/0000-0003-4124-6579>, ResearcherID: J-2544-2018, Scopus Author ID: 22959266400, РИНЦ AuthorID: 70158, e-mail: fe@mpi.ysn.ru

About the authors

SHEPELEV, Viktor Vasilyevich, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3434-6969>, ResearcherID: P-8179-2018, Scopus Author ID: 7003566339, RISC AuthorID: 58611, e-mail: sheply@mpi.ysn.ru

ZHELEZNYAK, Mikhail Nikolayevich, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Director, <https://orcid.org/0000-0003-4124-6579>, Scopus Author ID: 22959266400, RISC AuthorID: 70158, e-mail: fe@mpi.ysn.ru

Поступила в редакцию / Submitted 27.10.2023

Поступила после рецензирования / Revised 10.11.2023

Принята к публикации / Accepted 14.11.2023