

ПОВЕРХНОСТНЫЕ И ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ СУШИ

УДК 556.3; 551.345

DOI: 10.15372/KZ20230104

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПОЙМЫ ЛЕНЫ
У ГОРОДА ЯКУТСКА

Н.А. Павлова, В.В. Огонеров, М.В. Данзанова, Л.С. Лебедева

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; napavlova@mpi.ysn.ru, vasvas392@yandex.ru*

Рассмотрены особенности гидрогеологического строения и режима подземных вод в пойменной части р. Лены в районе г. Якутска на основе детального анализа опубликованных и фондовых материалов, включая результаты полевых работ авторского коллектива 2013–2021 гг. Для характеристики мерзлотно-гидрогеологических условий территории изучены разрезы более 70 скважин. Режимные наблюдения за уровнем подземных вод проведены на пойменно-намывной территории. Исследование химического состава поверхностных и подземных вод основано на обработке более 250 анализов. Установлено, что на высокой пойме в формировании ресурсов надмерзлотных грунтовых вод, помимо инфильтрации речных вод, участвует транзитный подрусловой поток, гидравлически связанный с пойменными таликами. Отмечена сезонная и пространственная изменчивость химического состава воды в р. Лене и в изучаемых таликах. Минимальная минерализация (0.1–0.3 мг/л) и хлоридно-гидрокарбонатный магниевый-кальциевый состав характерны для поверхностных вод и подземных вод четвертичного водоносного горизонта в правобережной части р. Лены. Здесь существуют условия для их питания пресными над- и межмерзлотными водами бестяхской надпойменной террасы реки и подрусловых таликов под малыми реками. У г. Якутска минерализация воды в Лене и четвертичном водоносном горизонте увеличивается до 0.5–1.3 г/л за счет хлорид- и сульфат-ионов, которые обладают хорошей миграционной способностью и поступают с поверхностным и надмерзлотным стоком с надпойменной террасы, где расположен город.

Ключевые слова: река Лена, пойменные талики, надмерзлотные грунтовые воды, гидродинамический режим, химический состав.

HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS IN THE LENA RIVER FLOODPLAIN NEAR YAKUTSK

N.A. Pavlova, V.V. Ogonerov, M.V. Danzanova, L.S. Lebedeva

*Melnikov Permafrost Institute, SB RAS,
Merzlotnaya str. 36, Yakutsk, 677010, Russia; napavlova@mpi.ysn.ru*

This paper reports on the hydrogeological conditions and groundwater regime in the Lena River floodplain near Yakutsk. The published and archive materials, including field data collected by the authors in 2013–2021, were analyzed. Data from more than 70 boreholes were examined to characterize permafrost and hydrogeological conditions in the area. Data on groundwater level monitoring in the reclaimed area of the floodplain were also used. Over 250 sample analyses were interpreted to characterize the chemical composition of surface and ground waters. The results suggest that suprapermafrost waters in the high floodplain are recharged both by infiltration of river water and by a transit water flow under the river channel hydraulically connected to floodplain taliks. The seasonal and spatial variability of the chemical composition of waters was revealed in the Lena River and in the studied taliks. The surface and ground waters of the Quaternary aquifer on the east bank of the Lena River are characterized by the lowest total dissolved solids (TDS) concentration (0.1–0.3 mg/L) and by the magnesium-calcium chloride-bicarbonate composition. These waters are recharged by fresh water of the supra- and interpermafrost taliks of the Bestyakh terrace and by the riverbed taliks under small rivers. In the vicinity of Yakutsk, TDS concentrations in the Lena River and in the Quaternary aquifer increase to 0.5–1.3 g/L due to high mobility of chloride and sulfate ions migrating with the surface and suprapermafrost runoff from the low terrace, where the city is located.

Keywords: Lena River, floodplain taliks, suprapermafrost water, hydrodynamic regime, chemical composition.

ВВЕДЕНИЕ

В области сплошного распространения многолетнемерзлых пород важное гидрогеологическое значение имеют пойменные и подрусловые талики в долинах рек. По надмерзлотным таликам

осуществляется основной транзит подземных вод зоны свободного водообмена [Романовский, 1983; Михайлов, 2013]. Сквозные подрусловые талики являются своеобразным буфером, обеспечиваю-

щим водообмен между поверхностными и подмерзлотными водами [Фотиев, 2009; Шепелев, 2021; Chang, Qianlai, 2017]. В последние годы актуальность приобретает изучение пойменных таликов в среднем течении р. Лены. Это связано, во-первых, с возрастающей потребностью населения Центральной Якутии в воде, покрыть которую за счет эксплуатации подмерзлотных водоносных комплексов весьма сложно из-за ограниченности их естественных ресурсов и значительной мощности (165–470 м) многолетнемерзлых пород. Во-вторых, на экосистему реки усиливается техногенная нагрузка за счет инженерного освоения территории. Так, в районе г. Якутска в 1980–2013 гг. на пойме Лены был возведен намывной массив и построены два жилых городских квартала. В начале 2000-х гг. проложен подводный газопровод по дну реки, в настоящее время планируется строительство мостового перехода через нее. Для обеспечения безопасной эксплуатации подобных объектов, а также планирования дальнейшего освоения пойменных территорий важное значение имеет оценка площадного распространения подземных вод в долине р. Лены. Целью работы было изучение мерзлотно-гидрогеологических условий пойменно-руслового комплекса р. Лены на участке с. Табага–г. Якутск, где сосредоточены указанные выше инженерные сооружения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходным материалом послужили накопленные за многолетний период данные мерзлотно-гидрогеологических и гидрогеохимических исследований водоносных горизонтов и комплексов, развитых под руслом, протоками и на пойме р. Лены. Для характеристики геолого-гидрогеологических и геокриологических условий территории изучены разрезы более 70 скважин. Гидродинамический режим подземных вод таликов рассмотрен на основе анализа фоновых материалов, а также результатов режимных наблюдений, выполненных авторским коллективом на пойменно-намывной территории в 2013–2021 гг. Исследование химического состава поверхностных и подземных вод основано на обработке более 250 анализов водных проб, из них 78 отобраны из р. Лены и ее проток; 60 – из скважин, вскрывших надмерзлотные грунтовые воды подрусловых и пойменных таликов р. Лены, 94 – из 9 скважин, оборудованных для режимных наблюдений на пойменно-намывной территории г. Якутска; 20 – из скважин, вскрывших сквозной подрусловый талик в районе с. Табага и пос. Покровск; по три пробы из подрусловых таликов рек Тамма и Шестаковка. Кроме того, привлечены результаты химических анализов меж- и подмерзлотных вод, развитых на смежной площади.

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Рассматриваемая территория расположена в среднем течении Лены, где река из области Приленского плато переходит на Центрально-Якутскую низменность. Соответственно изменяется характер долины: от узкой (4–5 км) с крутым отвесным правым берегом у Табагинского мыса к обширной (8–15 км) террасированной аккумулятивной равнине ниже по течению реки. Средний годовой сток р. Лены у г. Якутска 7070 м³/с, максимальный составляет 36 200 м³/с [Чалов и др., 2016]. Река относится к восточно-сибирскому типу. Уровень ее воды в зимнюю межень (март–апрель) находится на отметках 81.7–83.5 м. Во время весеннего половодья его подъем достигает 7–11 м, вызывая затопление широкой поймы, а отметки уровня воды в реке 5%-й обеспеченности составляют 94.7 м. Лед на р. Лене образуется в октябре. В соответствии с изменениями гидрологической обстановки изменяется и температура речной воды: зимой и во время весеннего половодья она равна 0–1 °С, в июне – около 10–12 °С, а в июле 15–17 °С [Gautier et al., 2018].

Русло р. Лены ниже Табагинского мыса многокучное. Длина многочисленных островов составляет от 0.5 до 10 км (рис. 1). Размыв берегов и островов на одних участках и аккумуляция наносов на других приводят к отклонению стрежня и перераспределению стока реки по ее протокам, способствуя их миграции, расчленению, периодическому обмелению и углублению [Тананаев, 2016]. Например, еще в начале прошлого века в русле Городской протоки был проложен судовой ход [Чистяков, 1952; Чалов и др., 2016]. В 1940-е – начале 1950-х гг. динамическая ось речного потока переместилась к правому берегу. В дальнейшем под действием естественных русловых процессов и строительства ограждающей дамбы Городская протока обмелела и постепенно превратилась в пойменную второстепенную.

Пойма р. Лены двусторонняя. Исключение составляет участок у пос. Нижний Бестях, где водный поток примыкает к бестяхской надпойменной террасе. Рельеф поймы слабовсхолмленный, с многочисленными узковытянутыми проточно-старичными понижениями и гривами.

Результатом русловых деформаций является невыдержанность мощности аллювиальных четвертичных образований под речным днищем. Непосредственно под руслом и протоками Лены мощность аллювия изменяется от 1 до 18 м [Стогний, 2003; Христофоров, Омеляненко, 2013]. Он представлен мелко- и среднезернистыми кварцполевошпатовыми песками, в основании разреза – с гравием и галькой кварца, кремния, известняков. Пойменные гривы сложены в нижней части разреза песками русловой фации, в верхней – супес-



Рис. 1. Схема территории исследований.

1 – населенные пункты; 2 – водотоки и водоемы.

чано-суглинистыми отложениями мощностью 0,5–5,0 м [Роман и др., 2008]. Суммарная мощность аллювиальных образований на пойме в районе г. Якутска составляет 7–15 м. Четвертичные отложения постилают среднеюрские алевролиты и кварц-полевошпатовые, слюдяные песчаники с частыми прослоями глин.

Малые притоки р. Лены (левобережные – реки Шестаковка, Мархинка, Хорогор и правобережные – реки Тамма и Мыла) периодически пересыхают в летнее время, а зимой перемерзают полностью, за исключением наиболее углубленных участков русла [Анисимова, Павлова, 2014].

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОЙМЕННЫХ ТАЛИКОВ

Исследование таликов в долине р. Лены в районе г. Якутска началось в 1930–1960-х гг. в связи с поисками подземных вод для обеспечения технического и питьевого водоснабжения населения города [Мельников, 1963; Ефимов, 1964]. В результате этих работ было выявлено, что под Городской и Адамовской протоками р. Лены имеется надмерзлотный талик мощностью 24–30 м, а его контуры ограничены меженной водной поверхностью реки [Гидрогеология СССР, 1970]. Подземные воды с температурой 0,5–2 °С содержатся в четвертичных аллювиальных отложениях и верхней части выветрелых среднеюрских образований.

Под пересыхающими и перемерзающими протоками р. Лены, а также под старичными озерами, заливаемыми в половодье, мощность надмерзлотных водоносных таликов не превышает 10–12 м (рис. 2) [Балобаев и др., 2003; Роман и др., 2008; Pavlova et al., 2020]. Глубже развит криогенный водоупор. Согласно классификации Н.Н. Романовского [1983], большинство пойменных таликов относятся к грунтово-фильтрационному классу, но имеются и талики с застойными водами [Анисимова и др., 2005].

Нередко пространственное положение надмерзлотных таликов не отвечает современным руслам речных протоков. Причинами этого несоответствия являются смещение поверхностных водных потоков в процессе многократных русловых деформаций, термоабразивное разрушение берегов и формирование мерзлых пород на обсыхающих прирусловых отмелях [Романовский, 1983; Тананавев, 2005; Шенелев, 2011]. Как известно, главным источником тепла на поймах являются речные воды, а тепло- и массообмен между водотоками и горными породами осуществляется в основном конвективным путем [Фотиев, 1968, 2009; Романовский, 1983; Михайлов, 2013]. В долине р. Лены в периодически затапливаемой пойме конвективный теплоперенос ограничивается толщей аллювия, которая обладает хорошими фильтрационными свойствами. У подстилающих юрских отложений водообильность слабая, поскольку в их разрезе преобладают водоупорные разности. Соответственно, при смещении источника тепла (поверхностного потока) в несквозных пойменных таликах создаются условия для промерзания пород как сверху, так и снизу, а тальмы остаются лишь хорошо проницаемые отложения, по которым происходит транзитный надмерзлотный или межмерзлотный сток. Направление этого стока (в глубь берега или к меженному руслу реки), в зависимости от соотношения уровня воды в водоносном горизонте и водотоке, в течение года может изменяться, но в целом соответствует уклону реки.

В пойме р. Лены помимо естественных таликов имеются и природно-техногенные. Они широко распространены под намывными грунтами г. Якутска. При создании намывного основания под гражданское строительство в 1970–1990 гг. старичные озера и талики под ними оказались погребенными под 10–15-метровым слоем аллювиальных песков. На пойменных гривах, сложенных мерзлыми песками и супесями, за счет высо-

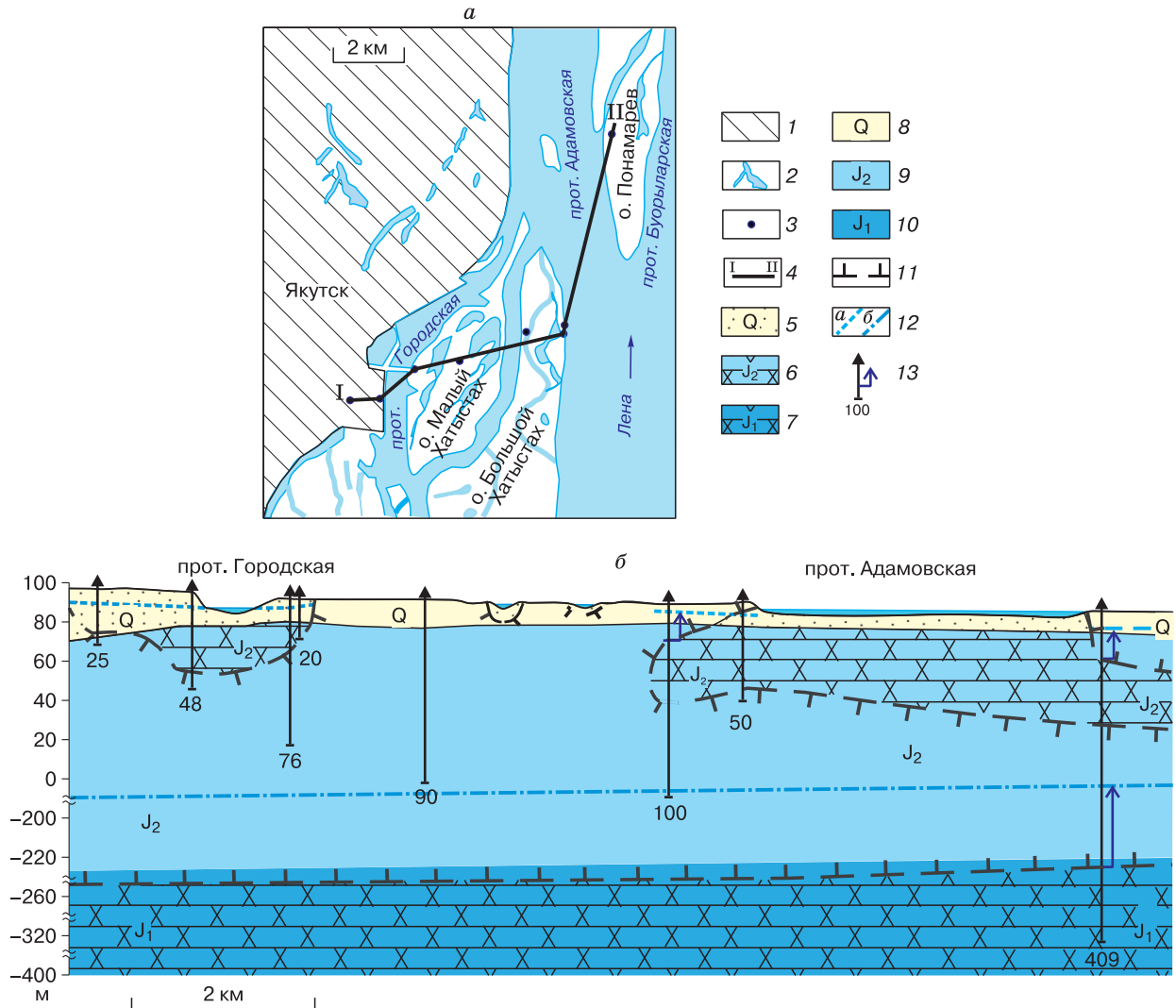


Рис. 2. Схема расположения скважин (а) и гидрогеологический разрез поймы р. Лены у г. Якутска (б).

а: 1 – территория г. Якутска; 2 – водотоки и водоемы; 3 – разведочная гидрогеологическая скважина; 4 – линия гидрогеологического разреза. б: 5 – локально-водоносный горизонт четвертичных отложений (пески, гравийно-галечные отложения); 6 – локально-водоносный горизонт среднеюрских отложений (песчаники, алевролиты, глины); 7 – субкриогенный (подмерзлотный) водоносный комплекс нижнеюрских отложений (песчаники, алевролиты, алевроиты), 8–10 – криогенные водоупоры: 8 – четвертичный, 9 – среднеюрский, 10 – нижнеюрский; 11 – граница многолетнемерзлых пород; 12 – положение уровня подземных вод (а – надмерзлотных грунтовых вод, б – подмерзлотных вод); 13 – разведочная гидрогеологическая скважина (внизу – глубина, стрелка сбоку – напор подземных вод).

кой температуры пульпы произошло углубление кровли криогенного водоупора, и под 6–8-метровой толщей техногенного грунта сформировались искусственные водонасыщенные талики мощностью 3–5 м. Надмерзлотные водонасыщенные талики под намынным массивом сохраняются до настоящего времени. Так, при инженерно-геологических изысканиях на территории 203-го квартала города в 2013–2019 гг. надмерзлотные грунтовые воды вскрыты скважинами повсеместно с глубины 6.4–13 м [Роман и др., 2008; Shesternev et al., 2014; Pavlova et al., 2020]. Мощность обводненной тол-

щи различна: от 0.5–6.0 м на участках пойменных грив до 12 м и более на площадях ранее существовавших старичных озер [Pavlova et al., 2020]. Подшовой водоносного горизонта служат многолетнемерзлые грунты естественного основания. Температура водовмещающих отложений, как и в природных таликах, изменяется от 0.1 до 1.5 °С.

Отсутствие криогенного водоупора в пойме и под руслом р. Лены напротив г. Якутска буровыми и геофизическими работами до настоящего времени не доказано и не опровергнуто. Сквозной талик под р. Леной, связывающий подмерзлотные и по-

верхностные воды, установлен геофизическими работами и бурением южнее рассматриваемой территории у г. Покровска и в районе Табагинского мыса на о. Песчаном [Балобаев и др., 2003; Шепелев, Макогонова, 2010]. У г. Покровска на островах и в русле реки скважинами глубиной 70–200 м пройдены песчано-галечниковые отложения мощностью до 27 м и подстилающие их трещиноватые кембрийские известняки. На этом участке напорно-фильтрационный талик частично дренирует подмерзлотные водоносные комплексы кембрия [Белецкий, 1975]. Ниже по течению р. Лены трещиноватые карбонатные породы погружаются под юрские терригенные песчаники и алевролиты. На о. Песчаном, по данным бурения скважины глубиной 360 м, мощность нижнеюрского водоносного горизонта, вскрытого под 21-метровой толщей аллювия, составляет 238 м, а глубже залегают водоносные комплексы среднего и нижнего кембрия [Балобаев и др., 2003]. На участке от г. Покровска до с. Табага небольшая потеря речного стока косвенно указывает на наличие здесь водопоглощающего талика [Шепелев и др., 2002].

В плане сквозной талик в районе Табагинского мыса ограничен руслом р. Лены. При бурении скважины на левобережной пойме реки у пос. Табага с поверхности земли до глубины 165 м вскрыты многолетнемерзлые породы [Шепелев и др., 2002]. На правом берегу возможно распространение сквозного талика и на пойму. До XIX в. здесь располагалась ось основного рукава р. Лены, который с течением времени обмелел и образовал Хаптагайскую пойменную протоку [Чалов и др., 2016]. Учитывая условия образования подруслых таликов и их эволюцию при смещении поверхностных водных потоков, на правом берегу вблизи современного уреза реки можно ожидать сокращения мощности многолетнемерзлых пород до первых десятков метров. Следует отметить, что указанные сквозные талики расположены в зонах пересечения русла реки тектоническими разломами или зонами дробления пород.

Севернее Табагинского мыса, в пределах рассматриваемой территории, на островах разведочными скважинами вскрыты межмерзлотные талики. Например, между Адамовской и Буорыларской протоками на о. Пономарева под многолетнемерзлыми породами талые водоносные отложения залегают с глубины 25 м. Мощность талика 35 м, а подошва подстилающего его криогенного водоупора зафиксирована на глубине 320 м [Стогний, 2003]. Вода, вскрытая в среднеюрском песчанике, гидрокарбонатная натриевая при повышенном содержании хлоридов, с минерализацией около 1 г/л. Такой состав может быть результатом затрудненного водообмена в талике. На о. Хатыстах между Городской протокой и основ-

ным руслом р. Лены в центральной части острова скважина глубиной 90 м по всему разрезу вскрыла многолетнемерзлые породы (см. рис. 2).

Под малыми притоками Лены мощность подруслых таликов изменяется от 1.5 до 60 м. Так, в приустьевой части р. Тамма обводненные породы в конце зимы залегают с глубины 0.3–3.0 м [Анисимова, Павлова, 2014]. Мощность талика не превышает 20 м. Сохранению его под промерзающей рекой при сравнительно небольшой ширине русла (10–20 м) способствуют хорошие фильтрационные свойства песчано-галечниковых отложений и сравнительно высокая отрицательная температура (–0.2...–0.7 °С) окружающих многолетнемерзлых пород. Мощность подруслых таликов увеличивается на участках залегания песчано-галечных отложений на трещиноватых карбонатных породах кембрия. Например, южнее рассматриваемой площади в нижнем течении р. Менда мощность водоносного талика достигает 60 м. Разгрузка подруслых вод малых правобережных притоков происходит в талик р. Лены.

Под левобережными малыми притоками р. Лены в зимний период талики сохраняются лишь на отдельных более углубленных участках русел, мощность их редко превышает 1.5 м [Анисимова, 1996].

Уровненный режим подземных вод таликов

Непрерывные наблюдения за гидродинамическим режимом подземных вод, распространенных под руслом р. Лены, практически не проводились в связи со сложностью оборудования скважин в акватории реки и сохранности их при ледоходе. Тем не менее при поисково-разведочных работах в Городской и Адамовской протоках р. Лены установлено, что понижение уровня воды в надмерзлотных таликах в зимний период соответствует падению уровня поверхностных вод в это же время [Гидрогеология СССР, 1970]. После опытных откачек из скважин время восстановления уровня подземных вод составляет всего 15–60 мин.

По площади влияние р. Лены на гидродинамический режим подземных вод не ограничивается подруслым потоком. Это подтверждают данные многолетних наблюдений на намывной территории г. Якутска [Роман и др., 2008; Pavlova et al., 2020]. Свободная поверхность надмерзлотных грунтовых вод в таликах под намывным массивом испытывает сезонные колебания (рис. 3). Ее самые низкие отметки наблюдаются в марте–начале мая и соответствуют периоду зимней межени в р. Лене. Уровень речных вод в это время залегают на 3–4 м ниже, чем у надмерзлотных таликовых вод на намывной территории. В мае с началом половодья на р. Лене происходит насыщение грунтов водой за счет фильтрации речных вод по контуру намывного массива. Расчетная зона влияния подпора рас-

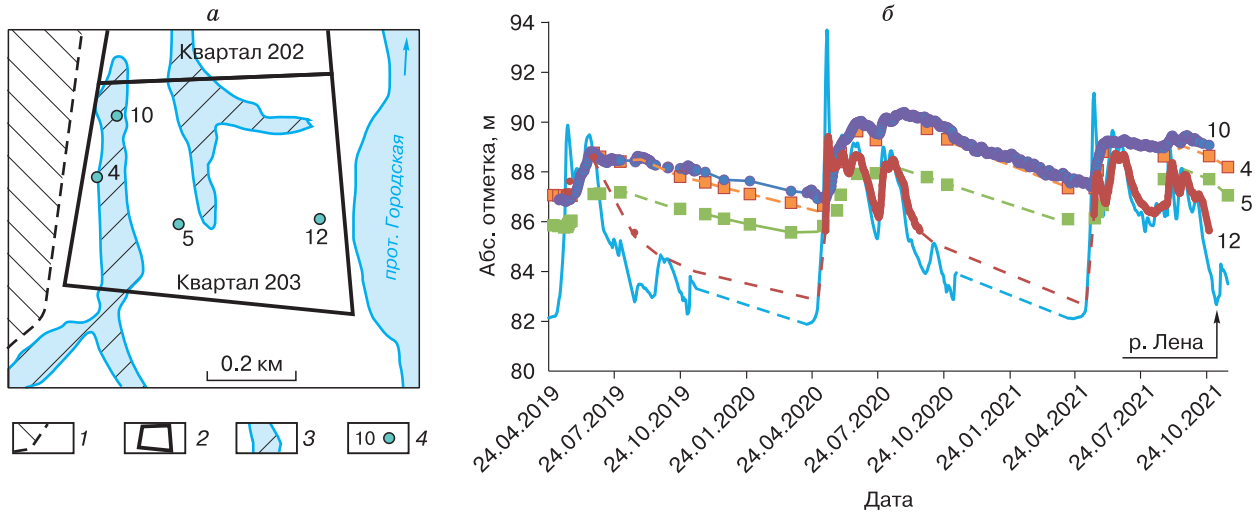


Рис. 3. Схема расположения наблюдательных гидрогеологических скважин (а) и график изменения уровня надмерзлотных грунтовых вод на пойменно-намывной территории г. Якутска и р. Лене (гидропост г. Якутск) в 2019–2021 гг. (б).

1 – первая надпойменная терраса р. Лены; 2 – контур намывной территории; 3 – старичные озера, погребенные при намыве; 4 – гидрогеологические наблюдательные скважины. Символ и цифра на графике соответствуют гидрогеологической скважине и ее номеру на схеме.

пространяется на 150–170 м от водотока [Роман и др., 2008]. Фактически повышение отметок поверхности подземных вод в период максимального речного стока происходит и в скважинах, удаленных от уреза реки на расстояние 400–600 м [Pavlova et al., 2020]. При этом самые высокие уровни надмерзлотных грунтовых вод отмечаются на участках, где ранее существовали озера. Подъем уровня воды в скважинах на таком расстоянии может быть объяснен только передачей давления от реки по подрусловым таликам, соединяющимся с таликами погребенных старичных озер. Годовые экстремумы уровня режима подземных вод запаздывают относительно речных вод на 35–63 сут. Скорость распространения гидродинамического импульса от реки по водоносному горизонту, рас-

считанная по данным режимных наблюдений, составляет около $4.6 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{сут}$. Аналогичный гидродинамический режим подземных вод можно ожидать в надмерзлотных таликах на островах и отсыпанных участках в пойме реки.

На участке сквозного подруслового талика в районе Табагинского мыса изучался режим подземных вод нижнесреднекембрийского водоносного комплекса в 1980-х гг. сотрудниками ПГО “Якутскгеология”. В результате этих исследований было установлено, что изменение пьезометрического уровня подземных вод происходит синхронно с колебанием уровня р. Лены. Влияние реки на гидродинамический режим подмерзлотных вод прослеживается в скважине, пробуренной на высокой пойме (рис. 4). На низких надпоймен-

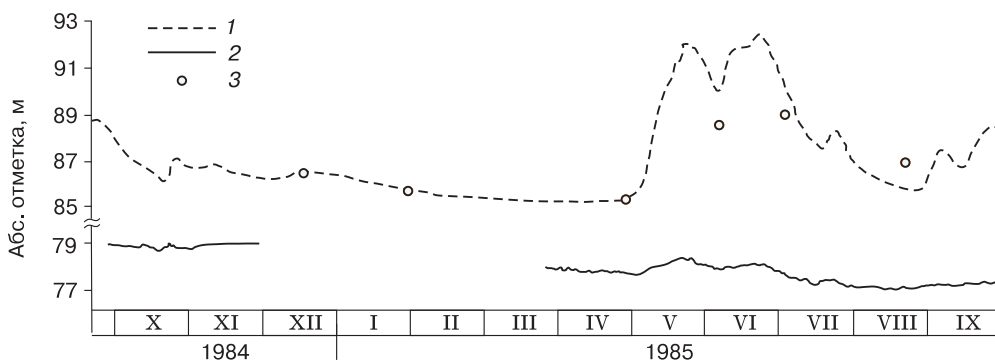


Рис. 4. График изменения уровня воды в р. Лене (1) и в скважинах, оборудованных на нижнесреднекембрийский водоносный комплекс на высокой пойме р. Лены (2) и на о. Песчаный (3).

Построено по фондовым материалам ГУП “Сахагеоинформ” и Института мерзлотоведения СО РАН.

ных террасах уровень подмерзлотных вод сезонных изменений не испытывает и тесно связан с водоотбором из эксплуатационных скважин [Шепелев и др., 2002].

Под промерзающими малыми реками и водоемами надмерзлотные грунтовые воды обладают, как правило, напорно-безнапорным режимом [Анисимова, Павлова, 2014]. С июля по март (пока существуют условия для их фильтрации по пласту, а граница промерзающего слоя не достигает водоносных пород) подземные воды имеют свободную поверхность. С началом промерзания водоносных пород в талике появляется криогенный напор, достигающий максимальной величины в мае–июне.

Качество поверхностных вод и подземных вод надмерзлотных таликов

Химический состав воды в р. Лене зависит от условий ее питания. В весенне-летний период, когда сток реки формируется в основном за счет таяния снега и жидких атмосферных осадков, минерализация поверхностных вод равна 70–100 мг/л при хлоридно-гидрокарбонатном натриево-кальциевом или магниевом-кальциевом составе. К концу лета содержание растворенных веществ увеличивается до 170–180 мг/л. Соотношение анионов в воде не меняется. Ее катионный состав у г. Якутска становится преимущественно натриево-кальциевым, у правого берега – магниевом-кальциевым (табл. 1). Вероятной причиной такой изменчивости является впадение с правобережья в Лену малых рек с водой гидрокарбонатного кальциево-магниевого состава. Зимой при переходе на подземное питание минерализация воды в р. Лене на фарватере около 300–500 мг/л, а в протоках у г. Якутска достигает 800 мг/л. Химический состав воды преобразуется в хлоридно-гидрокарбонатный кальциево-натриевый.

В надмерзлотном подрусловом талике р. Лены в верхней части четвертичного водоносного

горизонта количество растворенных веществ в воде составляет 0.4–0.8 г/л [Анисимова и др., 2005]. В годовом цикле долевое соотношение основных анионов и катионов изменяется в соответствии с составом питающей речной воды.

Формирование качества подземных вод среднеюрского водоносного горизонта происходит в условиях относительно замедленного водообмена. Вследствие этого увеличивается их минерализация до 0.8–1.1 г/л, повышается щелочность (рН = 7.7–8.4) и наблюдается превышение натрия (до 87–98 %) над другими катионами (рис. 5).

В подрусловом сквозном талике р. Лены в районе Табагинского мыса минерализация воды также возрастает по разрезу от 0.6 г/л в кровле нижнеюрского водоносного комплекса до 1.3 г/л в нижнекембрийском водоносном комплексе [Балобаев и др., 2003]. С глубиной анионный состав воды изменяется в отложениях юры от гидрокарбонатного до хлоридно-гидрокарбонатного, в кембрийском водоносном комплексе он становится гидрокарбонатно-хлоридным (табл. 2). Среди катионов, независимо от литологии и возраста пород, в подземных водах сквозного талика преобладают ионы натрия, доля их с глубиной увеличивается от 81 до 98 %-экв. Относительно низкая минерализация воды в подрусловых отложениях по сравнению с подмерзлотными водоносными комплексами является следствием поглощения поверхностных вод по сквозному талику.

В таликах под мелкими протоками, старичными озерами и малыми притоками р. Лены химический состав надмерзлотных вод зависит от степени проточности водотоков и водоемов. При хорошем водообмене он близок к составу подрусловых вод Лены. Так, на правобережной пойме реки минерализация воды в надмерзлотных таликах в конце зимы составляет 0.2–0.4 г/л, химический состав преимущественно гидрокарбонатный магниевом-кальциевый. Под малыми реками (Тамма,

Таблица 1. Химический состав воды в протоках р. Лены

Протока	рН	Сумма минеральных веществ, мг/л	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
Табагинская	7.5	164	$\frac{24}{45}$	$\frac{7}{22}$	$\frac{20}{33}$	$\frac{1}{0}$	$\frac{107}{59}$	$\frac{18}{13}$	$\frac{29}{28}$
Городская	7.0	138	$\frac{20}{45}$	$\frac{5}{19}$	$\frac{18}{36}$	$\frac{1}{0}$	$\frac{94}{62}$	$\frac{8}{7}$	$\frac{28}{31}$
Рассолода	7.4	147	$\frac{30}{55}$	$\frac{12}{35}$	$\frac{6}{9}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{159}{96}$	$\frac{<1}{0}$	$\frac{5}{4}$
Хаптагайская	7.7	161	$\frac{28}{50}$	$\frac{10}{31}$	$\frac{12}{19}$	$\frac{1}{0}$	$\frac{159}{83}$	$\frac{9}{6}$	$\frac{12}{11}$

Примечание. Форма выражения анализа: мг/л (числитель), мг-экв.-% (знаменатель).

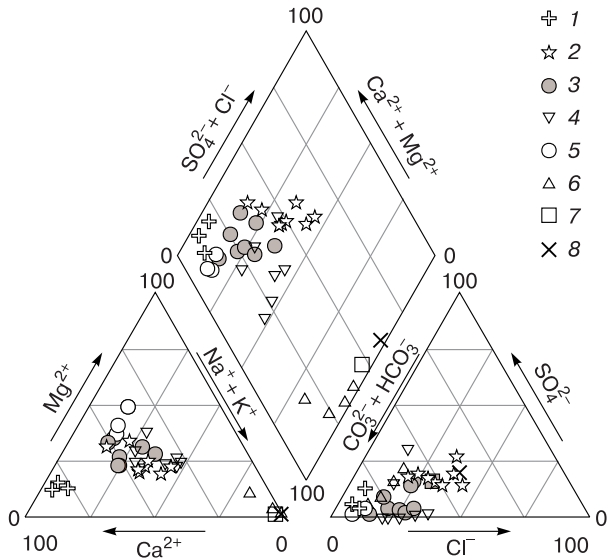


Рис. 5. Пайпер-диаграмма макрокомпонентного состава природных вод.

1 – атмосферные осадки (дождь); 2 – р. Лена; 3–5 – надмерзлотные грунтовые воды четвертичного водоносного горизонта: 3 – под протоками р. Лены, 4 – на пойменно-намывной территории г. Якутска (левобережье Лены); 5 – под руслом и на пойме р. Тамма (правобережье Лены); 6 – надмерзлотные грунтовые воды среднеюрского водоносного горизонта; 7, 8 – межмерзлотные воды сквозного подруслового талика р. Лены: 7 – нижнеюрского водоносного горизонта (интервал опробования 106–261 м); 8 – кембрийского водоносного горизонта (интервал опробования 261–320 м).

Менда) в подрусловых таликах зимой вода имеет аналогичный состав.

В таликах на левобережной пойме р. Лены минерализация воды равна 0.5–0.8 г/л. Повышенные содержания в ней хлорид-иона (25–37 % от суммы анионов) и преобладание ионов натрия (41–45 % от суммы катионов) являются следствием ухудшения условий водообмена здесь и влияния процессов криогенной метаморфизации на формирование состава воды. Вблизи г. Якутска в пойменных таликах нередко отмечается увеличение концентрации сульфат-анионов и соединений азота, свидетельствующее о техногенном загрязнении надмерзлотных грунтовых вод.

ВЫВОДЫ

В районе г. Якутска многолетняя миграция русла р. Лены и ее проток, а также процессы криогенеза привели к локальному распространению подземных водных потоков в пойменных отложениях, зачастую пространственно не совпадающих с зеркалом воды в ответвлениях реки. Несмотря на наличие многолетнемерзлых пород и ограниченное распространение надмерзлотных таликов на пойме реки, содержащиеся в них подземные воды гидравлически связаны с поверхностными и подрусловыми водами р. Лены. Эта связь ярко проявляется во время половодья, когда в условиях подпора происходит восполнение запасов надмерзлотных вод пойменных таликов не столько за

Таблица 2. Химический состав подземных вод в районе Табагинского мыса

Место-положение	Индекс водоносного горизонта и интервал опробования, м	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	(Na+K) ⁺	F ⁻	pH	M, мг/л
<i>Подрусловой сквозной талик</i>										
о. Песчаный	J ₁ 24–105	358 84	31 12	13 4	11 7	8.7 10	143 83	1.4 –	8.4	599
	J ₁ 106–261	344 53	134 31	93 16	6 2	2 1	270 97	н/д –	8.5	725
	Є ₁ + Є ₂ 261–320	465 43	249 37	184 22	8 1	6 1	417 98	1.8 –	8.6	1346
	<i>Подмерзлотные воды левобережья р. Лены</i>									
с. Табага	J ₁ 172–267	613 50	392 48	24 2	8 2	2 1	519 97	5.0 –	7.3	1573
	Є ₁ + Є ₂ 273–450	507 21	478 35	810 44	175 22	63 13	661 65	2.2 –	7.9	2701
	<i>Подмерзлотные воды левобережья р. Лены</i>									
с. Хаптагай	Є ₂ 320–500	604 27	269 21	909 52	34 5	35 8	428 87	2.5 –	7.3	2280

Примечание. Форма выражения анализа: мг/дм³ (числитель), %-экв. (знаменатель). Н/д – нет данных, М – минерализация.

счет нисходящего просачивания речных вод в водоносный горизонт, сколько за счет подземного потока, фильтрующегося по сети соединяющихся таликов.

Химический состав р. Лены и ее подруслового талика неоднороден в плане и разрезе и зависит от наличия притоков и условий взаимосвязи поверхностных и подземных вод. Минимальная минерализация характерна для подруслых вод четвертичного водоносного горизонта, тяготеющего к правобережью р. Лены. Здесь существуют условия для его питания надмерзлотными водами бестяжской террасы и подруслых таликов, развитых под малыми притоками Лены. Увеличение минерализации воды по разрезу подруслового талика обусловлено сменой литологического состава водовмещающих пород и ухудшением с глубиной их фильтрационных свойств.

У г. Якутска в протоках р. Лены, надмерзлотных таликах под ними и малыми реками отмечается увеличение концентрации в воде сульфат-, хлорид-ионов, ионов натрия, иногда – соединений азота. Вероятными причинами этого являются криогенная метаморфизация воды и водовмещающих пород в условиях слабого водообмена, а также поступление загрязненных стоков с надпойменной террасы, где расположен город.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ и Якутского научного фонда (грант № 22-17-20040).

Литература

- Анисимова Н.П.** Режимные исследования надмерзлотных таликов в окрестностях Якутска // Криолитозона и подземные воды Сибири. Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 1996, ч. 2, с. 3–16.
- Анисимова Н.П.** Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии / Н.П. Анисимова, Н.А. Павлова. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2014, 189 с.
- Анисимова Н.П., Павлова Н.А., Стамбовская Я.В.** Химический состав таликовых вод в среднем течении р. Лены // Наука и образование, 2005, № 4, с. 118–124.
- Балобаев В.Т.** Подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования / В.Т. Балобаев, Л.Д. Иванова, Н.М. Никитина и др. Новосибирск, Изд-во СО РАН, фил. “Гео”, 2003, 137 с.
- Белецкий В.Л.** Особенности водообмена в первых от поверхности водоносных горизонтах Центральной Якутии // Вопросы гидрогеологии криолитозоны. Якутск, Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1975, с. 11–35.
- Гидрогеология СССР.** Т. XX. Якутская АССР. М., Недра, 1970, 384 с.
- Ефимов А.И.** Мерзлотно-гидрогеологические особенности прибрежного и руслового участков р. Лены в районе г. Якутска // Геокриологические особенности Западной Якутии, Якутии и Чукотки. М., Наука, 1964, с. 97–110.
- Мельников П.И.** Итоги геокриологических, гидрогеологических и инженерно-геологических исследований в Центральной и Южной Якутии. М., Ин-т мерзлотоведения им. В.А. Обручева, 1963, 84 с.
- Михайлов В.М.** Пойменные талики Северо-Востока России. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2013, 244 с.
- Роман Л.Т., Цернант А.А., Полещук В.Л. и др.** Строительство на намывных грунтах в криолитозоне. М., Изд. дом “Экономика, строительство, транспорт”, 2008, 323 с.
- Романовский Н.Н.** Подземные воды криолитозоны. М., Изд-во Моск. ун-та, 1983, 231 с.
- Стогний В.В.** Импульсная индуктивная электроразведка таликов криолитозоны Центральной Якутии. Якутск, Академия, 2003, 124 с.
- Тананаев Н.И.** Гидрометеорологические условия формирования мерзлых грунтов в русле средней Лены // Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 2005, № 6, с. 60–64.
- Фотиев С.М.** Классификация таликов гидрогенного класса // Материалы науч.-техн. конф. М., ПНИИИС, 1968, с. 168–171.
- Фотиев С.М.** Криогенный метаморфизм пород и подземных вод (условия и результаты). Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2009, 279 с.
- Христофоров И.И., Омеляненко А.В.** Результаты георадиолокации дна и донных отложений речных переходов линейных инженерных сооружений // Наука и образование, 2013, № 1, с. 38–43.
- Чалов Р.С., Завадский А.С., Рулева С.Н. и др.** Морфология, деформации, временные изменения русла р. Лены и их влияние на хозяйственную инфраструктуру в районе г. Якутска // Геоморфология. М., Наука, 2016, вып. 3, с. 22–35.
- Чистяков Г.Е.** Русловые процессы на р. Лене // Исследования вечной мерзлоты в Якутской республике. М., Изд-во АН СССР, 1952, вып. 3, с. 213–225.
- Шепелев В.В.** Мониторинг подземных вод криолитозоны / В.В. Шепелев, А.В. Бойцов, Н.Г. Оберман и др. Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002, 172 с.
- Шепелев В.В.** Надмерзлотные воды криолитозоны. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2011, 169 с.
- Шепелев В.В.** Анализ влияния криолитозоны на водообменные процессы // Науки о Земле и недропользование, 2021, т. 44, № 2 (75), с. 184–190.
- Шепелев Н.Г., Макогонова О.В.** Моделирование гидрогеологических условий подмерзлотного водоносного комплекса для территории г. Якутска // Наука и образование, 2010, № 2 (58), с. 21–26.
- Chang L., Qianlai Z.** Quantifying the role of permafrost distribution in groundwater and surface water interactions using a three-dimensional hydrological model // Arctic, Antarctic, and Alpine Res., 2017, iss. 1, vol. 49, p. 81–100.
- Gautier E., Dépret T., Virmoux C. et al.** Going with the flow: Hydrologic response of middle Lena River (Siberia) to the climate variability and change // J. Hydrol., 2018, vol. 557, p. 475–488.
- Pavlova N., Ogonerov V., Danzanova M. et al.** Hydrogeology of reclaimed floodplain in a permafrost area, Yakutsk, Russia // Geosciences, 2020, No. 10 (5), p. 192.
- Shesternev D.M., Zhang R.V., Kuzmin G.P. et al.** Industrial and residential construction on hydraulic fill in permafrost regions; problems and prospects // J. Engng Heilongjiang Univ., 2014, No. 5 (3), p. 100–109.
- Tananaev N.** Hydrological and sedimentary controls over fluvial thermal erosion, the Lena river, Central Yakutia // Geomorphology, 2016, vol. 253, p. 524–533.

References

- Anisimova N.P. Regime studies of permafrost taliks in the vicinity of Yakutsk. In: Kriolitizona i podzemnye vody Sibiri [Cryolithozone and groundwaters of Siberia]. Yakutsk, Izd-vo IMZ SO RAN, 1996, vol. 2, p. 3–16 (in Russian).
- Anisimova N.P., Pavlova N.A. Gidrogeokhimiicheskiye issledovaniya kriolitozony Tsentralnoi Yakutii [Hydrogeochemical studies of the cryolithozone of Central Yakutia]. Novosibirsk, Academic publishing house “Geo”, 2014, 189 p. (in Russian).
- Anisimova N.P., Pavlova N.A., Stambovskaya Ya.V. Chemical composition of talik waters of the Middle Lena River. Nauka i obrazovanie [Science and Education], 2005, No. 4, p. 118–124 (in Russian).
- Balobaev V.T., Ivanova L.D., Nikitina N.M. et al. Podzemnye vody Tsentralnoy Yakutii i perspektivy ikh ispolzovaniya [Groundwaters in Central Yakutia and prospects of their use]. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, fl. “Geo”, 2003, 137 p. (in Russian).
- Beletsky V.L. Features of water exchange in the first aquifers from the surface of the Central Yakutia. In: Voprosy gidrogeologii kriolitozony [Issues of cryolithozone hydrogeology]. Yakutsk, Institut Merzlotovedeniya SO AN SSSR, 1975, p. 11–35 (in Russian).
- Gidrogeologiya SSSR [Hydrogeology USSR]. Vol. XX. Yakut ASSR. Moscow, Nedra, 1970, 384 p. (in Russian).
- Efimov A.I. Permafrost-hydrogeological features of the coastal and riverbed sections of the Lena River near Yakutsk. In: Geokriologicheskie osobennosti Zapadnoi Yakutii, Yakutii i Chukotki [Geocryological features of West Yakutia, Yakutia and Chukotka]. Moscow, Nauka, 1964, p. 97–110 (in Russian).
- Melnikov P.I. Itogi geokriologicheskikh, gidrogeologicheskikh i inzhenerno-geologicheskikh issledovaniy v Tsentralnoy i Yuzhnoy Yakutii [The results of geocryological, hydrogeological and engineering-geological studies in Central and Southern Yakutia]. Moscow, Obruchev Permafrost Institute, 1963, 84 p. (in Russian).
- Mikhailov V.M. Poymennyye taliki Severo-Vostoka Rossii [Floodplain taliks of the North-East of Russia]. Novosibirsk, Academic publishing house “Geo”, 2013, 244 p. (in Russian).
- Roman L.T., Tsernant A.A., Poleshchuk V.L. et al. Stroitelstvo na namyynykh gruntakh v kriolitozone [Construction on alluvial soils in the cryolithozone]. Moscow, Izdatelskiy dom “Ekonomika, stroitelstvo, transport”, 2008, 323 p. (in Russian).
- Romanovsky N.N. Podzemnye vody kriolitozony [Undeground water of cryolithozone]. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1983, 231 p. (in Russian).
- Stogny V.V. Impulsnaya induktivnaya elektrorazvedka talikov kriolitozony Tsentralnoy Yakutii [Pulsed inductive taliks electrical exploration of the Central Yakutia cryolithozone]. Yakutsk, Akademiya, 2003, 124 p. (in Russian).
- Tananaev N.I. Hydrometeorological conditions of frozen soils formation in the middle Lena riverbed. Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5. Geografiya [Moscow University Bulletin. Series 5. Geography], 2005, No. 6, p. 60–64 (in Russian).
- Fotiev S.M. Classification of hydrogenic class taliks. In: Proceedings of the Scientific and Technical Conference. Moscow, PNIIS, 1968, p. 168–171 (in Russian).
- Fotiev S.M. Kriogenniy metamorfizm porod i podzemnykh vod (usloviya i rezultaty) [Cryogenic metamorphism of rocks and groundwater (conditions and results)]. Novosibirsk, Academic publishing house “Geo”, 2009, 279 p. (in Russian).
- Khristoforov I.I., Omel'yanenko A.V. Results of georadiolocation of the bottom and bottom sediments of river crossings of linear engineering structures. Nauka i obrazovanie [Science and Education], 2013, No. 1, p. 38–43 (in Russian).
- Chalov R.S., Zavadsky A.S., Ruleva S.N. et al. Morphology, deformations and temporary modifications of the Lena River channel and its influence on the Yakutsk economic infrastructure. Geomorfologiya [Geomorphology], 2016, vol. 3, p. 22–35 (in Russian).
- Chistyakov G.E. Riverbed processes on the Lena River. In: Issledovanie vechnoj merzloty v Yakutskoy respublike [Permafrost studies in the Yakutia Republic]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1952, vol. 3, p. 213–225 (in Russian).
- Shepelev V.V., Boitsov A.V., Oberman N.G. et al. Monitoring podzemnykh vod kriolitozony [Monitoring of underground waters in the cryolithozone]. Yakutsk, Permafrost Institute SB RAS, 2002, 172 p. (in Russian).
- Shepelev V.V. Nadmerzlotnyye vody kriolitozony [Suprapermafrost water in the cryolithozone]. Novosibirsk, Academic publishing house “Geo”, 2011, 169 p. (in Russian).
- Shepelev V.V. Analysis of the cryolithozone effect on water exchange processes. Nauki o Zemle i nedropolzovanii [Earth Sciences and Subsoil Use], 2021, vol. 44, No. 2 (75), p. 184–190 (in Russian).
- Shepelev N.G., Makogonova O.V. Modeling of hydrogeological conditions of a subpermafrost aquifer for the Yakutsk territory. Nauka i obrazovanie [Science Education], 2010, No. 2 (58), p. 21–26 (in Russian).
- Chang L., Qianlai Z. Quantifying the role of permafrost distribution in groundwater and surface water interactions using a three-dimensional hydrological model. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2017, vol. 49, iss. 1, p. 81–100.
- Gautier E., Dépret T., Virmoux C. et al. Going with the flow: Hydrologic response of middle Lena River (Siberia) to the climate variability and change. J. Hydrology, 2018, No. 557, p. 475–488.
- Pavlova N., Ogonerov V., Danzanova M. et al. Hydrogeology of Reclaimed Floodplain in a Permafrost Area, Yakutsk, Russia. Geosciences, 2020, No. 10 (5), p. 192.
- Shesternev D.M., Zhang R.V., Kuzmin G.P. et al. Industrial and residential construction on hydraulic fill in permafrost regions: problems and prospects. J. Engng Heilongjiang University, 2014, No. 5 (3), p. 100–109.
- Tananaev N. Hydrological and sedimentary controls over fluvial thermal erosion, the Lena River, Central Yakutia. Geomorphology, 2016, vol. 253, p. 524–533.

*Поступила в редакцию 27 апреля 2022 г.,
после доработки – 28 ноября 2022 г.,
принята к публикации 8 декабря 2022 г.*