

ГИДРОХИМИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД
НАДМЕРЗЛОТНО-МЕЖМЕРЗЛОТНОГО СТОКА НА УЧАСТКАХ
ИХ РАЗГРУЗКИ (ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЯКУТИЯ)¹

© 2020 г. Н. А. Павлова^{a, *}, В. В. Шепелев^a, А. А. Галанин^a, В. С. Ефремов^a

^aИнститут мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,
Якутск, 677010 Россия

*e-mail: pavlova@mpi.ysn.ru

Поступила в редакцию 04.02.2019 г.

После доработки 05.08.2019 г.

Принята к публикации 24.12.2019 г.

Представлены результаты многолетних исследований химического состава группы наледобразующих источников подземных вод Булуус. В урочище, образованном этим родником, дренируется надмерзлотно-межмерзлотный водоносный горизонт, широко распространенный в песчаных отложениях бестяхской террасы р. Лены в Центральной Якутии. На основе анализа наблюдений в 1964–2017 гг. отмечена устойчивость химического состава воды источника Булуус в многолетнем разрезе. Существенные сезонные изменения состава воды характерны для малобитных родников, функционирующих после освобождения их выходов от наледи. В них же регистрируются повышенные содержания в воде лития и фтора. Рассматриваются возможные причины разного состава родниковых вод, важное значение в этом придается локальной активности процессов промерзания и протавивания пород в пределах наледной долины. Обосновывается необходимость отбора проб подземных вод из всех выходов на участках их групповой разгрузки для оценки влияния природных и техногенных факторов на мерзлотно-гидрогеохимическую обстановку.

Ключевые слова: источники подземных вод, химический состав, надмерзлотные и межмерзлотные воды, криогенный метаморфизм, наледь.

DOI: 10.31857/S0321059620040124

ВВЕДЕНИЕ

В области сплошного развития многолетне-мерзлых пород естественные выходы подземных вод – один из индикаторов гидрогеологических и геокриологических условий. Постоянно действующие родники зимой формируют наледи. Форма, мощность и площадь наледей зависят от объема таликов и водопрпускной способности пород, по которым происходит фильтрация воды, глубины залегания водоносных горизонтов, а также температуры воздуха и продолжительности зимнего периода, влияющих на мощность слоя сезонного промерзания и криогенные напоры подземных вод [24, 32]. Изменение режима функционирования родников и миграция выходов подземных вод свидетельствуют о трансформации природной среды. При увеличении мощности мерзлых толщ количество источников уменьшается, а их дебит возрастает, т.е. происходит мерзлотное каптирование выходов подземных

вод [9, 12, 28]. Одна из особенностей источников в области развития многолетней мерзлоты – смешение в очагах разгрузки подземных вод различного типа [28, 33].

При выяснении генезиса родников актуально изучение криогенного преобразования состава подземных вод под действием многолетнего и сезонного промерзания водовмещающих пород. Направленность криогенного метаморфизма подземных вод зависит от их исходного состава и литологии пород, условий промерзания водоносных горизонтов (с оттоком воды или в замкнутой системе), преобладающих фазовых переходов (образование льда или его таяние), продолжительности фильтрации воды перед разгрузкой между мерзлых толщ [3, 4, 13, 29, 30]. В этой связи очевидна необходимость изучения и учета условий выхода подземных вод на поверхность при гидрохимической характеристике водоносных горизонтов.

В Центральной Якутии объекты настоящих исследований – родники, сформированные водами надмерзлотно-межмерзлотного типа и при-

¹ Работа выполнена частично при поддержке РФФИ (проекты 17-05-00926 и 17-05-00954).

уроченные к подножию средневысотной IV (бестяхской) правобережной надпойменной террасы р. Лены. Поверхность этой террасы относительно ровная с абсолютными отметками 140–160 м, осложнена неширокими вытянутыми песчаными грядами, закрепленными лесной сосновой растительностью. Гряды возвышаются на 2–3, реже 8–10 м, над эрозионными долинообразными депрессиями, ориентированными в сторону русла р. Лены. В депрессиях распространены мелководные (3.5–4.0 м) озера [2]. Уступ террасы четко выражен и возвышается над низкой надпойменной террасой р. Лены на 25–30 м, что создает хорошие условия для дренажа поверхностных и надмерзлотных вод.

Верхняя часть разреза до глубины 20–86 м сложена толщей четвертичных песков со следами эоловой обработки [16]. Подстилают их в южной части бестяхской террасы карбонатные породы кембрия, а в центральной и северной – юрские терригенные отложения [15]. Мощность многолетнемерзлых пород достигает 200–400 м. В гидрогеологическом строении территории выделяют два этажа [6]. На нижнем этаже в регионе распространены подмерзлотные водоносные горизонты, содержащие слабосолоноватые (минерализация 1.2–3.2 г/дм³) воды хлоридно-гидрокарбонатного или хлоридного натриевого состава, с повышенным содержанием фтора (до 7), лития (до 2.4) и сероводорода (до 25 мг/дм³). С учетом больших гидростатических напоров подмерзлотных вод не исключается их разгрузка на участках сквозных субаквальных таликов под руслом р. Лены и крупными озерами.

К верхнему этажу в пределах бестяхской террасы относят надмерзлотно-межмерзлотный водоносный комплекс со значительными ресурсами пресных подземных вод. Особенность этого комплекса – его спорадическое распространение и изолированность подземных водных потоков [8, 12]. Наибольшее свое развитие он получил в южной части террасы. По предварительным данным, водоносный комплекс – реликт голоценового оптимума [12, 33]. В настоящее время его инфильтрационное питание происходит через таликовые окна, которые развиты под озерами и мелкими реками (субаквальные талики) и на выположенных участках с редким сосновым лесом (субаэральные талики) [2, 8]. На участках транзита и разгрузки надмерзлотные воды переходят в категорию межмерзлотных. Верхним водоупором комплекса здесь служит промороженная часть песчаных четвертичных образований мощностью 10–50 м. Для перекрывающей мерзлой толщи свойственна высокая температура пород (–0.2°C) [5, 12, 25]. Межмерзлотные воды циркулируют как в песчано-галечниковых отложениях, так и в

самой верхней трещиноватой части кембрийских карбонатных пород.

Основная разгрузка подземных вод происходит в основании циркообразных или ложкообразных в плане понижений (распадков), врезанных в бестяхскую надпойменную террасу р. Лены. Естественные ресурсы водоносного комплекса, оцененные по родниковой составляющей, превышают 43000 м³/сут. Высокая зарегулированность внутригодового и многолетнего режима родникового стока позволяет рассматривать источники межмерзлотных вод в качестве альтернативы питьевого водоснабжения крупных населенных пунктов в Центральной Якутии, включая г. Якутск.

ИЗУЧЕННОСТЬ ОБЪЕКТА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Первые описания источников пресных подземных вод на правобережье р. Лены относятся к 1925–1927 гг., когда Якутская экспедиция Академии наук СССР проводила геологические рекогносцировочные обследования в Лено-Амгинском междуречье [20]. В 1939 г. были получены первые сведения о химическом составе родниковых вод [12]. К настоящему времени наиболее изучены субаэральные групповые источники межмерзлотных вод Улахан-Тарын и Булуус, исследование которых были начаты сотрудниками Института мерзлотоведения СО РАН в 1960-х гг. и продолжаются до сих пор (рис. 1). За это время установлены различия условий питания таликовых вод в южной части территории, к которой приурочены источник Булуус и родники в бассейне р. Менды, по сравнению с северной, где сосредоточены источники Улахан-Тарын, Джоллох, Мустах-Тарын и др. [1–3, 8, 18]. Оценено участие подземных вод межмерзлотного горизонта в формировании поверхностного стока. Установлено, что в долине руч. Улахан-Тарын поверхностный сток в осеннюю межень на 10–20%, а в полноводные годы до 50% формируется за счет атмосферных осадков и надмерзлотных вод сезонноталого слоя [7, 34]. В ручье, образованном источником Булуус, доля подземного межмерзлотного стока составляет 93–97% [22].

Воды родников имеют современный инфильтрационный генезис. По результатам изотопных исследований трития и антропогенных газов, возраст изливающейся на поверхность воды изменяется от года до нескольких десятков лет [35]. Об интенсивном водообмене в верхней зоне трещиноватости карбонатных отложений свидетельствуют результаты опытно-миграционных опробований скважин на водосборной площади источника Булуус, где выявлены мощные зоны надмерзлотных таликов. Здесь, по данным А.В. Бойцова [7], действительная скорость филь-

трации надмерзлотных вод, залегающих на глубине 4–6 м, достигает 5–8 м/сут.

При наступлении отрицательной температуры воздуха источники подземных вод формируют наледи. Мощность последних, их конфигурация, размеры и время существования определяются специфическими условиями разгрузки воды на поверхность и дебитами родников, а также метеорологическими условиями в конкретные годы [19, 22, 23, 25]. По мере роста наледей и промерзания бортов распадков условия водообмена ухудшаются и мелкие выходы подземных вод смешиваются или перемерзают. Миграции мест разгрузки способствуют также вынос подземным водным потоком песчаного материала и его переотложение в пределах наледных долин. Стаивание наледей обычно происходит в начале июля–августе.

Температура в родниках постоянна и составляет 0.1–0.2°C. Химический состав их вод подвержен сезонной изменчивости и в наибольшей степени близок к составу вод дренируемого межмерзлотного водоносного горизонта лишь в короткий период поздней осени [2]. В нижних слоях водоносного комплекса содержание в воде макро- и микроэлементов в годовом цикле практически не меняется [21]. На водосборной площади источника Улахан-Тарын изучено пространственное изменение химического состава межмерзлотных вод, доказывающее рост доли в их питании надмерзлотных вод от области формирования напора к области разгрузки [4, 21].

Основная цель настоящих исследований – обобщение, анализ и оценка временной и площадной изменчивости химического состава подземных вод, дренированных в урочище руч. Булуус. Здесь водами группы родников в зимний период формируется наледь площадью до 0.5 км² и средней мощностью 2.0 м. Для изучения многолетней и внутригодовой динамики химического состава этого источника обобщены и проанализированы материалы гидрохимических исследований сотрудников Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН за длительный период. В фондовых материалах института имеются сведения о химическом составе родника в 1939 г. В 1964–1965 и 1971–1975 гг. изучался макрокомпонентный состав воды в разные сезоны года. В 1980–90-х гг. проводились периодические гидрохимические исследования источника. В 2002–2018 гг. ежегодно пробы воды отбирались в конце сентября–начале октября (до наледообразования) из постоянно действующего высокодебитного источника, с 2003 г. его опробование также проводилось в марте–апреле (в период максимальной мощности наледи). В 2006–2018 гг. эпизодически в летние месяцы также проводилось гидрохимическое обследование и низкодебитных



Рис. 1. Картограмма территории расположения источников подземных вод. 1 – источник подземных вод; 2 – участок детальных исследований.

родников. В зимний период мелкие выходы подземных вод перекрываются наледью.

Температура и pH воды измерялись на месте. Содержания главных ионов и лития определялись методами титриметрии и капиллярного электрофореза, фторидов – потенциометрическим методом в Институте мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. Изучение содержания лития и фтора в родниках связано с оценкой возможности разгрузки здесь подмерзлотных вод Якутского артезианского бассейна. В 2008–2017 гг. для изучения микрокомпонентного состава родников отдельные пробы воды анализировались методами масс-спектрального (ICP-MS) и атомно-эмиссионного (ICP-AES) анализа с индуктивно связанной плазмой в Аналитическом сертификационном испытательном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН (г. Черноголовка).

Для характеристики химического состава надмерзлотных и межмерзлотных вод водосборной площади источника обобщены фондовые и опубликованные материалы за 1965–1984 гг. и данные гидрохимических исследований за 2002–2017 гг.

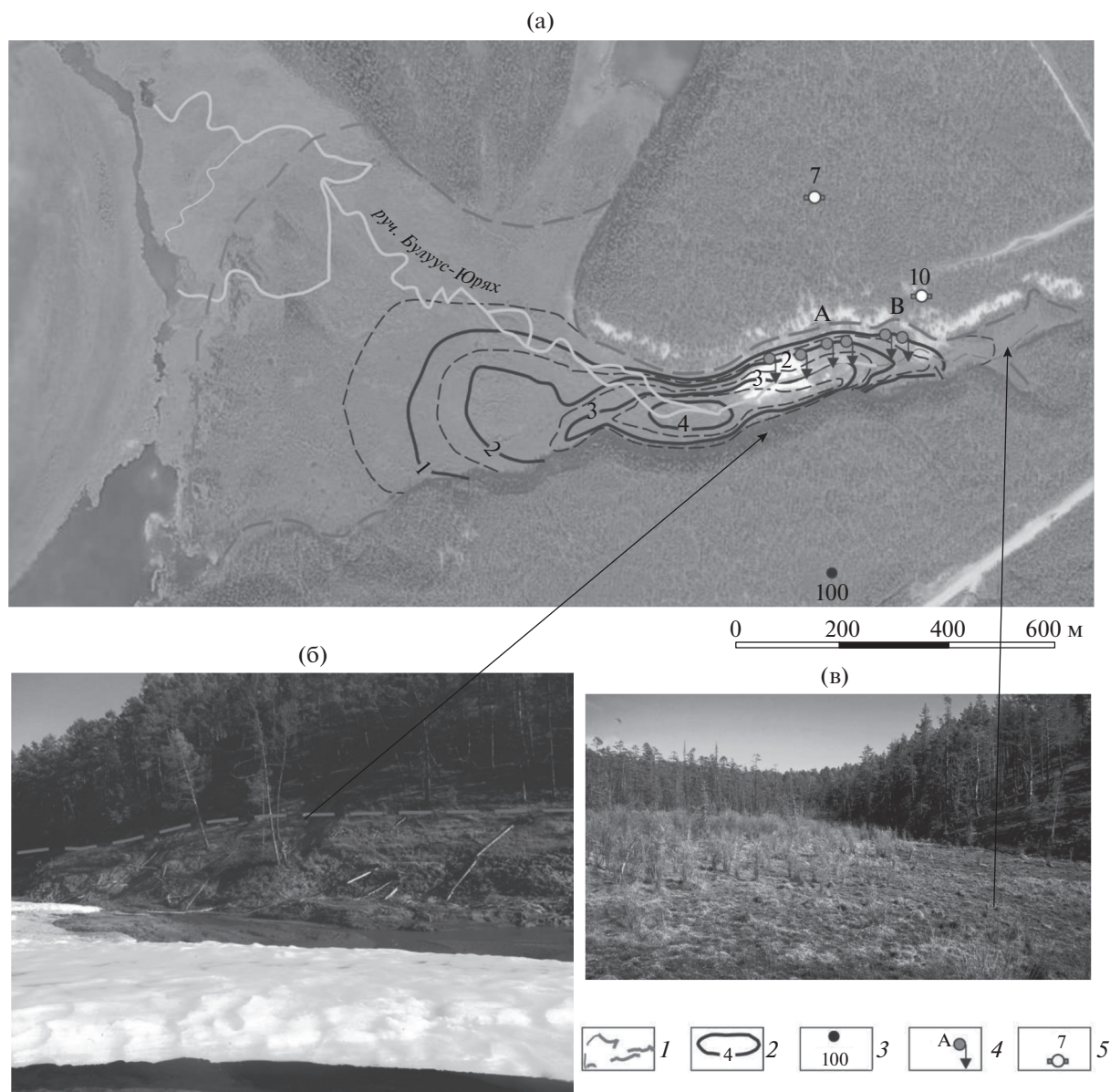


Рис. 2. Схема наледной долины в урочище Булуус: а – общий план; б – средняя часть распадка, склон северной экспозиции; в – верховье распадка; 1 – контур наледной поляны; 2 – изолинии мощности наледи, м [28]; 3 – скважина, пройденная в многолетнемерзлых породах, цифра внизу – глубина скважины; 4 – группа источников подземных вод; 5 – гидрогеологическая скважина, вскрывшая межмерзлотные воды.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Родник Булуус расположен в 100 км к ЮЗ от Якутска. Распадок, в котором разгружаются подземные воды, врезан в отложения бестяхской террасы на глубину 20–25 м. Его ширина 120–140 м, а протяженность ~1 км. Крутые склоны распадка покрыты редким сосновым лесом. В головной части распадка его днище по краям занято угнетенным лиственнично-еловым лесом, а в центре неглубокие (до 0.5–0.7 м) западины окружены малорослым кустарником (рис. 2). Зимой здесь формируются бугры пучения, а летом при вытаивании

льда образуется руч. Булуус-Юрях с расходом до 0.4–0.6 тыс. м³/сут. Химический состав воды в верхнем течении ручья гидрокарбонатный кальциево-натриевый, минерализация (здесь и далее минерализация приводится по сумме минеральных веществ) – 170–270 мг/дм³. Температура воды в ручье летом – в среднем 7–8°C, максимальная достигает 16°C.

Ниже по распадку в основании его северного борта, на контакте аллювиальных четвертичных песков и кембрийских известняков происходит разгрузка подземных вод. Наиболее высокоде-

Таблица 1. Осредненный химический состав подземных вод в урочище Булуус (n – количество определений; V – коэффициент вариации, %)

pH	Размерность	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Минерализация
Источники группы А, март, $n = 19$									
7.7	мг/дм ³	33.1	9.9	10.6	0.8	169.3	6.2	3.0	149
	%	28	14	8	0	47	2	1	
	V	7	12	28	14	3	52	48	5
Источники группы А, сентябрь, $n = 23$									
7.8	мг/дм ³	33.5	10.4	7.9	0.8	166.2	3.8	2.3	145
	%	29	15	6	0	47	1	1	
	V	6	12	18	18	4	46	47	4
Источники группы В, сентябрь, $n = 10$									
7.7	мг/дм ³	27.2	8.9	21.4	0.8	167.2	4.8	3.9	151
	%	23	12	16	0	46	2	2	
	V	9	13	31	24	9	61	50	12
руч. Булуус-Юрях, сентябрь, $n = 11$									
7.5	мг/дм ³	17.5	6.3	66.7	0.8	222.7	1.9	17.7	224
	%	10	6	34	0	43	0	6	
	V	8	11	23	17	13	36	29	14
скв. 10, интервал 20–50 м, $n = 14$									
7.7	мг/дм ³	13.5	7.4	111.5	1.6	338.5	8.6	19.7	338
	%	5	5	39	0	45	1	4	
	V	12	22	13	13	12	103	34	18

битные – постоянно действующие родники, сосредоточенные в средней части распадка. Количество и местоположение более мелких нисходящих источников меняются в течение года, о чем свидетельствуют промоины на краях наледной поляны после стаивания льда. Общая длина зоны дренажа подземных вод составляет 350–400 м. Суммарный средний дебит источников за многолетний период наблюдений ~ 10 тыс. м³/сут.

Несмотря на относительно небольшую протяженность зоны разгрузки, химический состав отдельных родников различается по соотношению катионов. По гидрохимическим показателям источники подземных вод в урочище Булуус можно условно разделить в две группы. К первой группе (А) относятся высокодебитные родники в средней части распадка. Они обеспечивают ~80% родникового стока. Средняя величина минерализации родников составляет 140–150 мг/дм³. Она формируется за счет гидрокарбонат-иона и ионов магния и кальция (табл. 1). Содержание лития в воде составляет 0.006–0.009, фтора 0.4–0.6 мг/дм³.

Родники второй группы (В) находятся выше по распадку. Для них характерна более высокая минерализация воды (до 240 мг/дм³), изменчи-

вый катионный состав (от натриево-магниевое-кальциевого до магниевое-натриевого) и повышенное содержание лития (0.010–0.096 мг/дм³) и фтора (0.4–0.8 мг/дм³). Подземные воды, разгружающейся здесь, как правило, более щелочные, а их окислительно-восстановительный потенциал ниже, чем в группе А.

Причины разного химического состава вод источников в этом относительно небольшом распадке окончательно не установлены. На уровне гипотез высказано предположение, что рассредоточенные родники в верхней части распадка образованы водами четвертичного водоносного горизонта, а в средней части распадка выходы подземных вод относятся к среднекембрийскому водоносному горизонту [28]. Для обоснования этого предположения охарактеризуем химический состав подземных вод зоны свободного водообмена в предполагаемой области питания источника Булуус. В 1980-х гг. в 8 км от этого источника в четвертичных песчаных отложениях бестяхской и примыкающей к ней тунголюнской террас р. Лены выявлен обширный субаэральный надмерзлотный водоносный талик, подошва которого залегает на глубине от 10 до

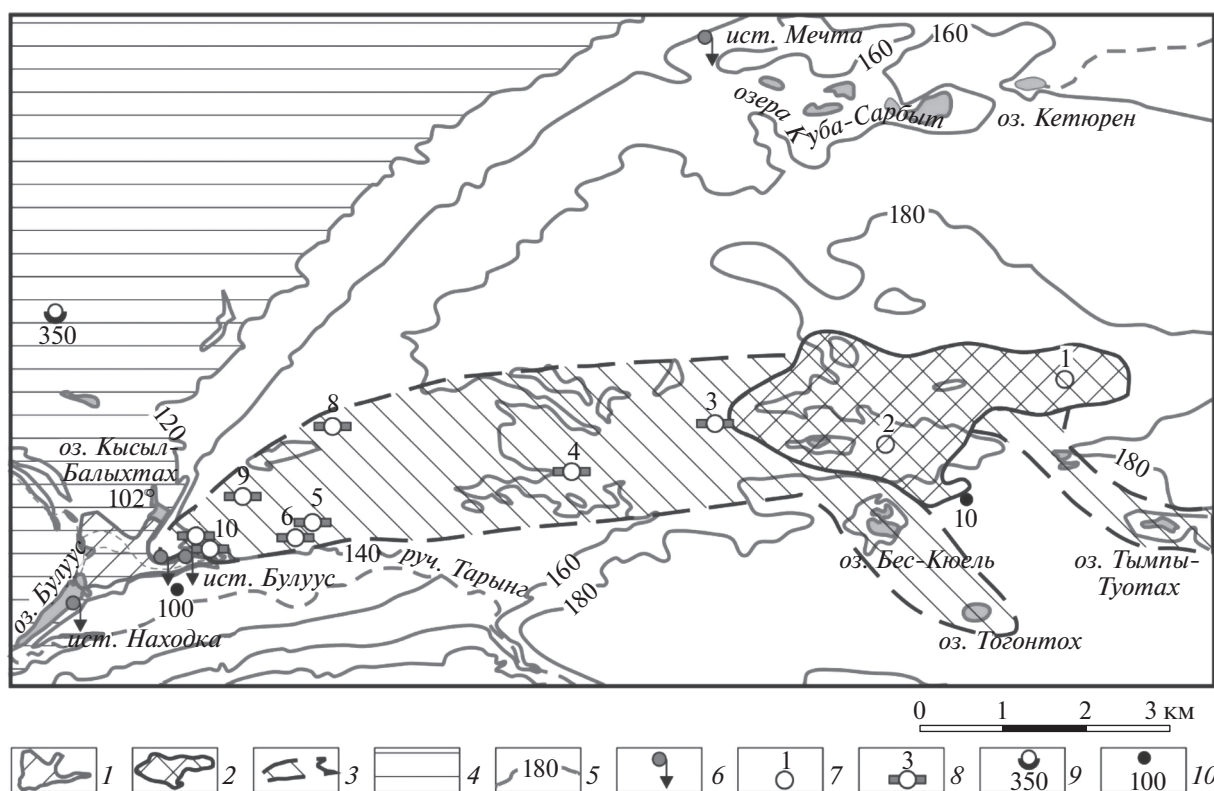


Рис. 3. Картограмма водосборной территории источника Булуус. 1 – наледная поляна источника Булуус; 2–3 – суб-аэральная таликовая зона; 2 – надмерзлотный талик, достоверно установленный; 3 – межмерзлотный талик и предполагаемые его границы; 4 – низкая надпойменная терраса р. Лены; 5 – изогипсы; 6 – источник подземных вод; 7–10 – скважины, цифра сверху – ее номер; 7 – вскрывшие надмерзлотные грунтовые воды; 8 – вскрывшие межмерзлотные воды; 9 – вскрывшие подмерзлотные воды, цифра внизу – мощность многолетнемерзлых пород; 10 – пройденные в многолетнемерзлых породах, цифра внизу – глубина скважины.

22 м и более [8, 18, 26, 31, 34]. Буровыми работами (30 скважин глубиной от 10 до 30 м) установлено, что протяженность таликовой зоны ~4 км, а ее ширина от 0.5 до 1.5 км (рис. 3). По направлению от области питания к области разгрузки надмерзлотный талик преобразуется в межмерзлотный, а мощность перекрывающей его многолетнемерзлой кровли увеличивается от 5–7 до 16–20 м.

Минерализация надмерзлотных грунтовых вод – 50–180 мг/дм³, их химический состав – гидрокарбонатный магниевый-кальциевый или кальциево-магниевый (рис. 4). Отмечается незначительная сезонная изменчивость содержания макроэлементов, связанная с особенностью атмосферного питания надмерзлотных грунтовых вод. В многолетнем цикле химический состав стабилен. В надмерзлотных водах прослеживается зависимость содержания фтора от литологического состава пород зоны аэрации. На участках, где надмерзлотный водоносный горизонт перекрывают пески, содержание этого элемента в водных пробах ≤0.1 мг/дм³, а при наличии в зоне аэрации супесчано-суглинистых отложений оно достигает 0.6 мг/дм³.

При переходе надмерзлотных грунтовых вод в категорию межмерзлотных минерализация их растет до 140–230 мг/дм³ за счет концентрирования ионов магния и натрия, в результате катионный состав становится смешанным. Содержание фтора – 0.2–0.3 мг/дм³. Литий в подземных водах четвертичного водоносного горизонта обнаруживался лишь масс-спектральным и атомно-эмиссионными методами (0.5–2.0 мкг/дм³).

Состав межмерзлотных вод среднекембрийских отложений, подстилающих четвертичный водоносный горизонт в области транзита водного потока, изучался по скважинам, пробуренным в 0.2–1.5 км от бровки распада Булуус (рис. 3). Обводненные известняки и доломиты среднего кембрия залегают здесь на глубине от 16 до 44 м. Подошва водоносного горизонта вскрыта скважиной 7 на глубине 50 м. Остальные скважины глубиной 100 м не вышли из талых пород. В верхней части разреза среднекембрийских отложений минерализация подземных вод 150–180 мг/дм³, химический состав гидрокарбонатный, смешанный по катионам (с преобладанием кальция – 45–48%), содержание фтора 0.3 мг/л (рис. 4).

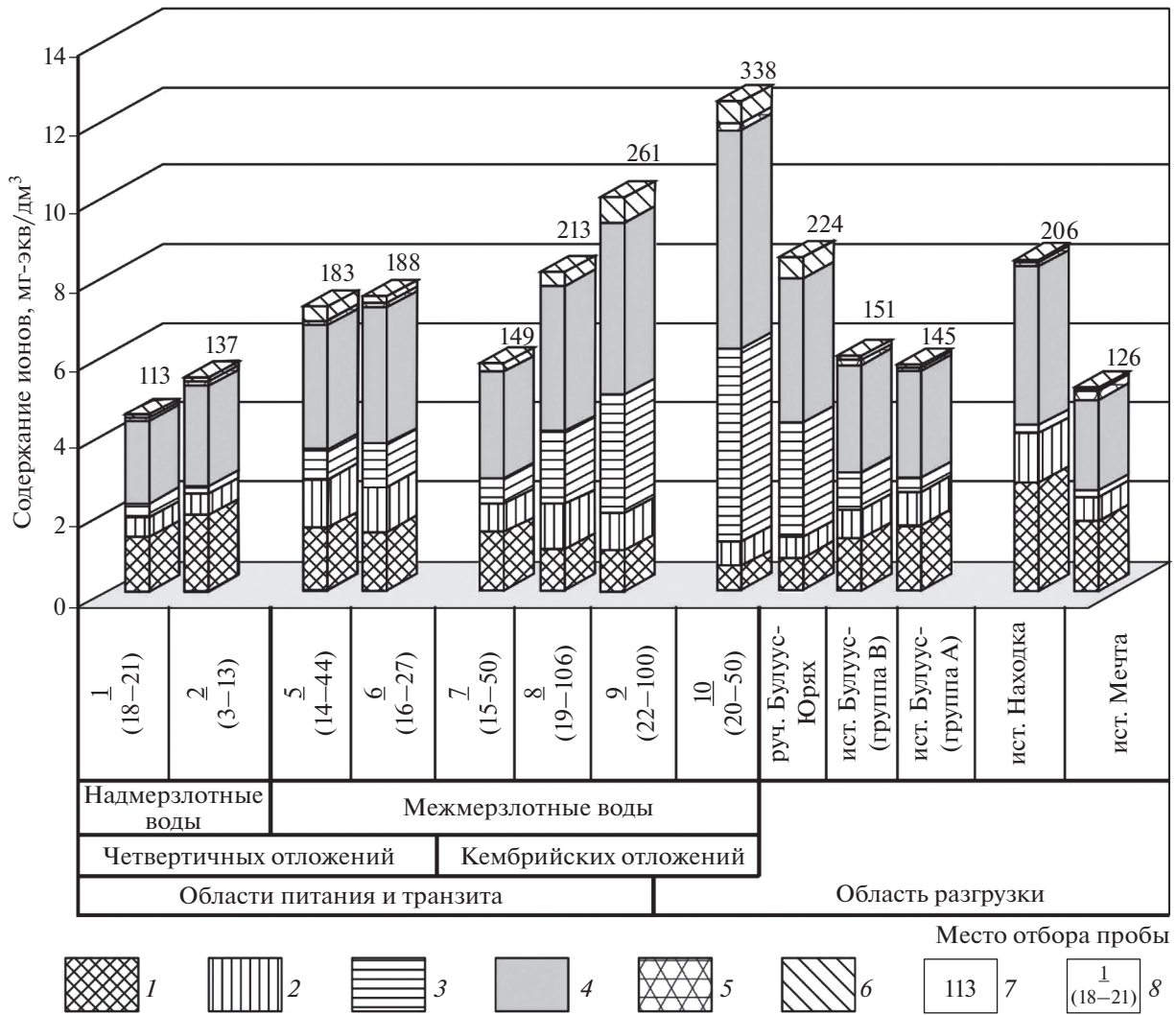


Рис. 4. Химический состав подземных вод на водосборной территории источника Булуус в осенний период. Содержание ионов: 1 – Ca^{2+} , 2 – Mg^{2+} , 3 – Na^+ , 4 – HCO_3^- , 5 – SO_4^{2-} , 6 – Cl^- ; 7 – минерализация, мг/дм³; 8 – скважина и ее номер, в скобках – интервал опробования водоносного горизонта, м.

С глубиной минерализация воды увеличивается от 150–180 до 260 мг/дм³, в катионном составе преобладающим становится натрий, концентрация фтора возрастает до 0.8 мг/дм³.

Вышеизложенные результаты гидрохимических исследований указывают на сходство состава высокодебитных родников группы А с подземными водами четвертичного и верхней части среднекембрийского водоносных горизонтов, вместе с тем не раскрывают причины отличия химического состава рассредоточенных родников в верховье распадка.

В 1996 г. вблизи родников группы В у бровки бестяхской террасы р. Лены пробурена гидрогеологическая скважина 10. Ею под многолетнемерзлыми песками вскрыты межмерзлотные воды в

интервале глубин 20–50 м в отложениях среднего кембрия. По данным наблюдений 1998–2010 гг., минерализация воды из скважины менялась от 300 до 463 мг/дм³, 75–80% ее солевого состава приходилось на гидрокарбонаты натрия. Содержание фтора составляло 1.3–1.6, лития – 0.07–0.08 мг/дм³. Для объяснения повышенного содержания этих микроэлементов в воде из скважины высказывалось мнение о подтоке подмерзлотных вод, обогащенных фтором и литием, по сквозному субаэральному талику [17].

Помимо смешения вод разных водоносных комплексов, в очагах разгрузки возможен и другой фактор, способствующий накоплению перечисленных элементов в подземных водах в верховье распадка. Этот фактор связан с особенностями водообмена и криогенного преобразования

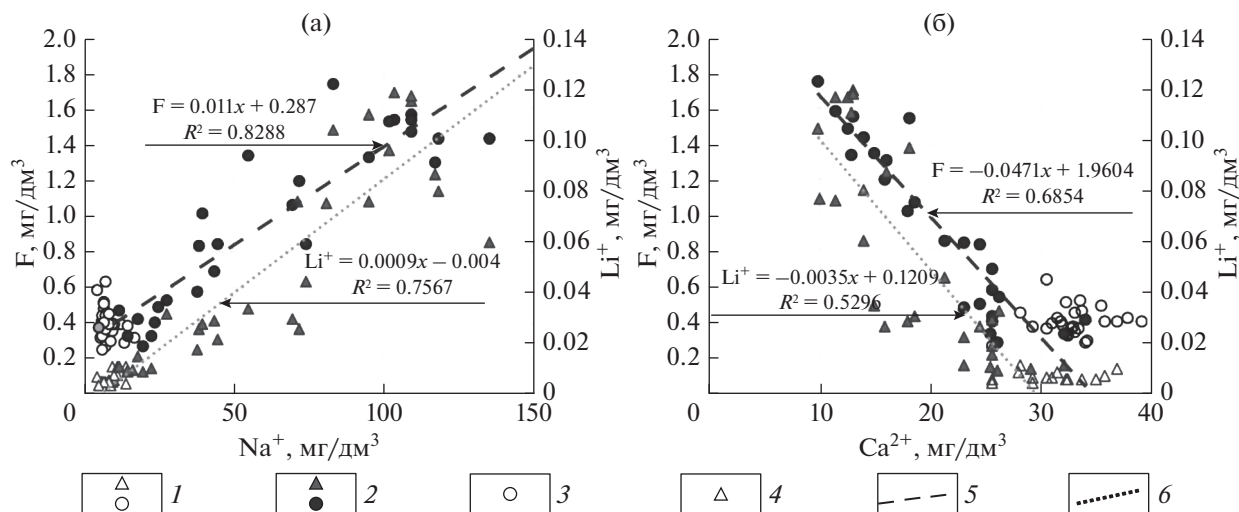


Рис. 5. Зависимость содержания Li и F от содержания Na (а) и Ca (б) в подземных водах в урочище Булуус: 1 – источники группы А, 2 – источники группы В, 3 – F⁻, 4 – Li⁺, 5 – линия тренда для F⁻ (группа В), 6 – линия тренда для Li⁺ (группа В).

состава подземных вод. Ранее при изучении роли криогенеза в формировании химического состава и минерализации воды в надмерзлотных таликах было показано, что в замкнутых условиях интенсивное промерзание пород таликовой зоны сопровождается повышением минерализации подземных вод и изменением в ней соотношений ионов на границе с мерзлыми породами [3].

В верховье урочища Булуус осыпание и выполаживание склонов с последующим залесением дна долины ручья способствовали новообразованию многолетнемерзлых пород. О процессе постепенного промерзания краевой части талика свидетельствует миграция мест выходов подземных вод из головной части распадка в его среднюю часть. Помимо осыпания склонов, ухудшению водообмена в верховье урочища способствует и режим формирования наледи. Детальные наблюдения за ростом и таянием наледи в урочище Булуус выполнены сотрудниками Института мерзлотоведения СО РАН в 1960-х гг. [28]. В последнее десятилетие проводились лишь разовые замеры мощности наледи в декабре и в марте. Полученные данные согласуются с результатами исследований предшественников [28]. Наледообразование в распадке начинается в его верховье за счет промерзания рассредоточенных малодобитных источников. На остальной площади до второй декады декабря наледь не формируется. Это связано с морфологическими особенностями долины ручья. По сравнительно глубоко врезанному руслу ручья вода из высокодебитных источников стекает в старичное озеро, расположенное на низкой надпойменной террасе р. Лены. В январе–феврале после промерзания основного русла ручья начинается усиленный рост наледи. Причем, темп наращивания ее мощности и объема в

средней и нижней частях распадка значительно превосходит скорость наледообразования в его верховье. В результате максимальная мощность наледи к концу зимы достигает 4–6 м в районе родников группы А, а в головной части распадка ≤0.5 м. Как установлено М.К. Гавриловой [10], в Центральной Якутии наледь оказывает отопляющее действие на подстилающие грунты. Соответственно, ее тепловой эффект минимален в верховье распадка Булуус, где отмечается наименьшая мощность наледи и разгрузка подземных вод прекращается в первой половине зимы.

Подпор формирующейся наледью и промерзание пород в районе рассредоточенных малодобитных источников группы В способствуют разьединению водоносного горизонта на отдельные талые “карманы”, состав воды в которых преобразуется за счет криогенной метаморфизации. В создавшихся условиях вблизи границы промерзания при кристаллизации пресной воды повышается вероятность выпадения из раствора в осадок карбонатов кальция, которые остаются в мерзлой породе или переносятся фильтрующейся водой. Скопление кристаллов кальцита – частое сезонное явление, наблюдаемое на поверхности и в теле наледей, формирующихся за счет маломинерализованных вод [3, 14, 29, 37]. Осаждение кальцита сопровождается выделением углекислоты, которая участвует в гидролитическом расщеплении кварц-полевошпатовых песков, слагающих кровлю водоносного горизонта, и активизирует переход в раствор наряду с ионами натрия и отдельных микрокомпонентов, в том числе лития. О совместном накоплении натрия и лития в воде указывает их прямая корреляционная связь (рис. 5). Относительно низкая карбонатная жесткость воды в краевой части талика способствует

Таблица 2. Вариации содержания отдельных микроэлементов в природных водах южной части бестяхской террасы, мкг/дм³ (*n* – количество определений, прочерк – нет данных)

Элемент	Урочище руч. Булуус					Родник Находка (<i>n</i> = 19)	Родник Мечта (<i>n</i> = 13)
	родники группы <i>A</i> (<i>n</i> = 41)	родники группы <i>B</i> (<i>n</i> = 18)	руч. Булуус-Юрях (<i>n</i> = 8)	скв. 10 (<i>n</i> = 11)	скв. 7 (<i>n</i> = 1)		
Li	5–11	4–26	26–36	67–119	–	2–3	1–2
F	260–520	330–580	790–1350	1300–1600	280	74–198	30–142
B	27–83	76–210	432 (<i>n</i> = 1)	480–580	–	8–20	11–16
Br	16–31	40–130	203 (<i>n</i> = 1)	120–150	–	23–34	10–11
Ba	45–68	90–180	26–102	240–290	–	56–74	56–65
Sr	400–652	417–484	194–458	589–794	–	378–459	392–469
pH	7.4–8.1	7.6–8.6	7.3–7.8	7.6–8.1	7.5	7.5–8.0	7.8–8.5

концентрированию в ней фторидов. Содержания бора, бария и брома также несколько повышено в пробах воды в верховье распадка (табл. 2). Остальные микроэлементы, как правило, не определяются, или их количество очень незначительно.

Высокодебитные родники (группа *A*) в меньшей степени подвержены криогенному метаморфизму, но и в их составе в конце зимы отмечается повышение содержания ионов натрия. О происходящих здесь процессах, связанных с влиянием низкой температуры на состав воды, можно судить по изотопным данным, полученным А.А. Галаниным и др. [11]. Не исключено, что отмеченная в работе [11] вариабельность содержания стабильных изотопов в роднике Булуус (группа *A*) в годовом цикле (с марта 2017 г. по июнь 2018 г. отобрано 70 проб с периодичностью один раз в 1–2 недели) обусловлена фазовыми переходами воды. Как известно, при медленном замерзании воды концентрация изотопа кислород-18 в ней понижается, а во льду повышается [27, 37]. По этой причине с октября по март состав воды в родниках становится более облегченным, а летом – относительно тяжелым за счет оттаивания льда, образовавшегося в холодный период года у фронта промерзания. По сравнению с другими источниками межмерзлотных вод Центральной Якутии, для родника Булуус группы *A* характерны минимальные сезонные вариации кислорода-18 (<1.5‰) и дейтерия (<11‰), что говорит о высокой зарегулированности подземного стока на этом участке.

Однотипный с родником Булуус (группа *A*) химический состав имеют источники Находка и Мечта (рис. 3, 4). В них концентрация микроэлементов заметно ниже, чем в родниковых водах урочища Булуус, что указывает на интенсивный

водообмен в талике, на благоприятные условия для разгрузки подземной воды на поверхность и малую криогенную метаморфизацию ее химического состава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В районах криолитозоны химический состав воды источников может отличаться от состава вод дренируемого водоносного горизонта, что вызывает трудности при определении генезиса родников по их единичному гидрохимическому опробованию. В очагах разгрузки пресных подземных вод формирование гидрохимической фации происходит не только в условиях периодического смешения вод различных типов, но и за счет влияния криогенных процессов. Эффект локальных гидрохимических изменений, особо выраженный вблизи контакта талых водоносных и мерзлых пород, проявляется в повышении содержания в воде гидрокарбонатов натрия, отдельных микроэлементов и в изменении ее изотопного состава.

В методическом отношении при изучении родниковой разгрузки и при оценке влияния природных и техногенных факторов на изменение состава источников подземных вод из полученных результатов следует, что необходимо проводить гидрохимическое опробование всех выходов подземных вод. Такие детальные исследования важны для определения генезиса подземных вод, их ресурсов и размеров зон санитарной охраны при каптаже родников.

Авторы выражают благодарность Л.Ю. Бойцовой и О.В. Шепелевой (Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН), выполнявшим аналитические исследования водных проб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анисимова Н.П.* К вопросу о формировании химического состава воды некоторых постояннодействующих источников Центральной Якутии // Тр. Северо-восточного отделения ИМЗ. Якутск: Якутское кн. изд-во, 1960. Вып. 2. С. 50–59.
2. *Анисимова Н.П.* Криогидрогеохимические особенности мерзлой зоны. Новосибирск: Наука, 1981. 153 с.
3. *Анисимова Н.П.* Формирование химического состава подземных вод таликов. На примере Центральной Якутии. М.: Наука, 1971. 196 с.
4. *Анисимова Н.П., Павлова Н.А.* Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии. Новосибирск: Гео, 2014. 189 с.
5. *Арз Ф.Э.* Геотермические условия формирования источников и наледи Улахан-Тарын // Вопросы географии Якутии. Якутск: Якутское кн. изд-во, 1969. Вып. 5. С. 88–94.
6. *Балобаев В.Т., Иванова Л.Д., Никитина Н.М., Шепелев В.В., Ломовцева Н.С., Скутин В.И.* Подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования. Новосибирск: Гео, 2003. 137 с.
7. *Бойцов А.В.* Особенности режима источников пресных вод Центральной Якутии в свете экологии транспортного строительства // Криолитозона и подземные воды Сибири. Якутск: ИМЗ СО РАН, 1996. Ч. 2. С. 46–62.
8. *Бойцов А.В.* Условия формирования и режим подземных вод надмерзлотного и межмерзлотного стока в Центральной Якутии. Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2002. 23 с.
9. *Вельмина Н.А.* Особенности гидрогеологии мерзлой зоны литосферы. М.: Недра, 1970. 328 с.
10. *Гаврилова М.К.* Температура наледи и подналедных бугров в долине Улахан-Тарын // Экспериментальные исследования процессов теплообмена в мерзлых горных породах. М.: Наука, 1972. С. 114–118.
11. *Галанин А.А., Павлова М.Р., Папина Т.С., Шапошников Г.И., Скрябина А.С.* Состав стабильных изотопов водного стока межмерзлотных таликов и подземных источников Центральной Якутии // Материалы VIII ВПНК “Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-востока России”. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2018. Т. 2. С. 213–216.
12. *Ефимов А.И.* Незамерзающий пресный источник Улахан-Тарын в Центральной Якутии // Исследования вечной мерзлоты в Якутской республике. М.: Изд-во АН СССР, 1952. Вып. 3. С. 60–105.
13. *Иванов А.В.* Гидрохимические процессы при наледообразовании. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983. 108 с.
14. *Иванов А.В.* Криогенная метаморфизация химического состава природных льдов, замерзающих и талых вод. Хабаровск–Владивосток: Дальнаука, 1998. 164 с.
15. *Иванов М.С.* Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины. Новосибирск: Наука, 1984. 125 с.
16. *Камалетдинов В.А., Минюк П.С.* Строение и характеристика отложений бестяхской террасы средней Лены // Бюл. комиссии по изучению четвертичного периода. 1991. № 60. С. 68–78.
17. *Колесников А.Б., Федоров А.А., Шепелев В.В.* Особенности нарушенного режима подземных вод в районе источника Булуус (Центральная Якутия) // Материалы третьей конф. геокриологов России. М.: Изд-во МГУ, 2005. Т. 2. С. 90–95.
18. Мониторинг подземных вод криолитозоны / Отв. ред. В.Т. Балобаев, В.В. Шепелев. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2002. 168 с.
19. *Николаев А.Н.* Дендрохронологические исследования наледей в Центральной Якутии // Лед и снег. 2010. № 1 (109). С. 93–102.
20. *Огнев Г.Н.* Геологические наблюдения на Лено-Амгинском водоразделе // Материалы комиссии по изучению Якутской автономной Советской социалистической республики. Л.: АН СССР, 1927. Вып. 22. 60 с.
21. *Павлова Н.А., Колесников А.Б., Ефремов В.С., Шепелев В.В.* Химический состав подземных вод межмерзлотных таликов в Центральной Якутии // Вод. ресурсы. 2016. № 2 (43). С. 216–227.
22. *Пигузова В.М., Шепелев В.В.* Режим наледообразующих источников Центральной Якутии // Геокриологические и гидрогеологические исследования Сибири. Якутск: Якутское кн. изд-во, 1972. С. 177–186.
23. *Поморцев О.А., Трофимцев Ю.И., Ефремов В.С., Поморцева А.А.* Регрессионные модели динамики наледей на основе данных дендроиндикации // Вестн. СВФУ. 2017. № 3 (59). С. 58–70.
24. *Романовский Н.Н.* Подземные воды криолитозоны. М.: Изд-во МГУ, 1983. 231 с.
25. *Семерня А.А., Гагарин Л.А., Бажин К.И.* Мерзлотно-гидрогеологические особенности участка распространения межмерзлотного водоносного комплекса в районе источника Ерюю (Центральная Якутия) // Криосфера Земли. 2018. № 2 (22). С. 29–38.
26. *Скрябин П.Н., Варламов С.П., Скачков Ю.Б.* Мониторинговые исследования температурного режима грунтов в Центральной Якутии // География и природ. ресурсы. 1998. № 2. С. 49–55.
27. *Соломатин В.И.* Геокриология: подземные льды. Учеб. пособие для бакалавриата и магистратуры. М.: Юрайт, 2018. 411 с.
28. *Толстихин О.Н.* Наледи и подземные воды Северо-Востока СССР. Новосибирск: Наука, 1974. 164 с.
29. *Фотиев С.М.* Криогенный метаморфизм пород и подземных вод (условия и результаты). Новосибирск: Гео, 2009. 279 с.
30. *Шварцев С.Л.* Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра, 1978. 287 с.
31. *Шендер Н.И., Бойцов А.В., Тетельбаум А.С.* Формирование таликов и высокотемпературных мерзлых

- пород в условиях Центральной Якутии // Матер. первой конф. геокриологов России. М.: Изд-во МГУ, 1996. Кн. 1. Ч. 3. С. 525–537.
32. *Шепелев В.В.* Родниковые воды Якутии. Якутск: Якутское кн. изд-во, 1987. 128 с.
33. *Шепелев В.В.* Надмерзлотные воды криолитозоны. Новосибирск: Гео, 2011. 169 с.
34. *Boitsov A.V.* Underground water regime of frozen deposits in Central Yakutia // Proc. Second Int. Workshop Energy and Water Cycle in GAME-Siberia. Nagoya, Japan, 1998. № 4. P. 54–67.
35. *Hiyama T., Asai K., Kolesnikov A.B., Gagarin L.A., Shepelev V.V.* Estimation of the residence time of permafrost groundwater in the middle of the Lena River basin, Eastern Siberia // Environ. Res. Lets. 2013. V. 8. № 3. P. 035040.
36. *Mackay J.R.* Oxygen isotope variations in Permafrost, Tuktoyaktuk Peninsula area, Northwest Territories // Current Res. Pt B, Geol. Surv. Can. 1983. Pap. 83-1B. P. 67–74.
37. *Stachnik L., Yde J.C., Kondracka M., Ignatiuk D.* Glacier naled evolution and relation to the subglacial drainage system based on water chemistry and GPR surveys (Werenskioldbreen, SW Svalbard) // Annals of Glaciol. 2016. V. 57. № 72. P. 19–30. <https://doi.org/10.1017/aog.2016.9>