

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИСТОЧНИКОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПЕСЧАНОГО МАССИВА МАХАТТА, ВОСТОЧНАЯ СИБИРЬ

В.А. Паламарчук^{1–3,*}, Л.С. Лебедева⁴, Н.А. Павлова⁴, Р.Р. Хайруллин¹, Н.Е. Баишев⁴

¹Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия

²ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики», 629007, Салехард, ул. Республики, 20, Россия

³Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, 107045, Москва, Уланский пер., 13, стр. 2, Россия

⁴Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия

*Автор для контакта, palamarchuk97@inbox.ru

Изучены мерзлотно-гидрогеологические условия тукулана Махатта в Республике Саха (Якутия), где распространены мощные таликовые водоносные горизонты. В первой половине июля 2021 г. дебит источников ручья Мугур-Тарын составлял 690 л/с, что меньше по сравнению с данными 1973–1974 гг. (770–930 л/с). Современные данные подтверждают стабильность химического состава надмерзлотных и межмерзлотных вод обследованных песчаных массивов за последние десятилетия. По химическому составу воды источников гидрокарбонатные кальциево-магниевого с минерализацией 13–50 мг/дм³. По данным маршрутных наблюдений и материалов дистанционного зондирования выявлено, что за последние 40–50 лет площадь песчаного массива, закрепленная растительным покровом, увеличилась примерно на 18 %. Это привело к понижению температуры пород, изменению водно-теплого баланса массива и снижению водных ресурсов таликовых водоносных горизонтов.

Ключевые слова: песчаные массивы криолитозоны, мерзлотно-гидрогеологические условия, водоносные талики, источники подземных вод, ресурсы подземных вод.

Ссылка для цитирования: Паламарчук В.А., Лебедева Л.С., Павлова Н.А., Хайруллин Р.Р., Баишев Н.Е. Современное состояние источников подземных вод песчаного массива Махатта, Восточная Сибирь // Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 4, с. 24–36. DOI: 10.15372/KZ20230403.

CURRENT STATE OF GROUNDWATER SPRINGS OF THE MAHATTA SAND MASSIF, EASTERN SIBERIA

V.A. Palamarchuk^{1–3,*}, L.S. Lebedeva⁴, N.A. Pavlova⁴, R.R. Khairullin¹, N.E. Baishev⁴

¹Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Malygina St. 86, Tyumen, 625026 Russia

²Arctic Research Centre of the Yamal-Nenets autonomous district, Respubliki St. 20, Salekhard, 629007 Russia

³Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanisky Per. 13, bldg 2, Moscow, 107045 Russia

⁴Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, 677010 Russia

*Corresponding author, palamarchuk97@inbox.ru

A study of permafrost and groundwater conditions of the Mahatta Tukulan, Sakha Republic (Yakutia), where thick aquifer talik horizons are common, was carried out. During the first half of July 2021, the water discharge of the Mugur-Taryn Spring was 690 L/s, which is less compared to data from 1973–1974 (770–930 L/s). Current data confirm that the chemical composition of suprapermafrost and interpermafrost groundwater has been stable over the past several decades in the studied sand massifs. The chemical composition of these spring waters is calcium-magnesium bicarbonate, with mineralization of 13–50 mg/dm³. Using field observation data and results of remote sensing data processing, it was determined that the area of the sand massif with a vegetation cover has increased by approximately 18 % during the past 40–50 years. This has led to a decrease in soil temperature, a change in the water heat balance of the massif, and a reduction of water reserves of talik aquifers.

Keywords: sand massifs of the cryolithozone, permafrost-hydrogeological conditions, aquifer taliks, groundwater springs, groundwater reserves.

ВВЕДЕНИЕ

Песчаные эоловые отложения, образующие пустынные ландшафты, широко распространены в криолитозоне Северного полушария [Благовидов, 1935; Павлов, 1981; Black, 1951]. В Якутии такие пустыни называют тукуланами [Галанин и др., 2016]. Они приурочены к бассейнам рек Вилюй, Лена и их притоков Хоруонгка, Линдэ, Тюнг и др. Подобные песчаные массивы развиты в Чарской,

Баргузинской, Муйско-Куандинской, Тункинской и других впадинах [Еникеев, 2014].

Обширные песчаные пустыни в криолитозоне Восточной Сибири характеризуются положительными температурами пород и наличием водоносных таликов, с которыми связаны источники пресных подземных вод с дебитом сотни литров в секунду [Бойцов, Шепелев, 1976; Еникеев, 2014].

Условия формирования, питания и режим таких крупнодебитных источников изучались как на закрепленных растительностью песчаных массивах [Бойцов, 2002; Шепелев, 2011], так и на перевеваемых тукуланах [Шепелев, Бойцов, 1975; Еникеев, 2014].

Одним из наиболее изученных в мерзлотно-гидрогеологическом отношении является тукулан Махатта в Центральной Якутии (левый берег р. Вилюй, ниже устья р. Тюнг). Здесь в 1973–1975 гг. сотрудниками Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова (ИМЗ) СО РАН в процессе комплексных гидрорежимных исследований был выявлен реликтовый таликовый водоносный горизонт мощностью 70–80 м [Бойцов, Шепелев, 1976]. Дебит источников, оцененный по величине разгрузки подземных вод в долине руч. Мугур-Тарын, превышал 700 л/с. В 1970-е гг. был изучен макрокомпонентный состав природных вод, развитых в пределах этого тукуланового массива. Было отмечено, что они обладают весьма низкой минерализацией (0.02–0.03 г/л), а доминирующим химическим типом вод является гидрокарбонатный магниево-кальциевый.

В последние десятилетия трансформации природных условий, которые происходят на фоне климатических изменений, затронули большую часть территории криолитозоны. Влияние этих изменений на подземные и поверхностные воды тукулановых массивов на данный момент не изучено.

Цель настоящей работы – оценка современного состояния и качества подземных вод кругло-

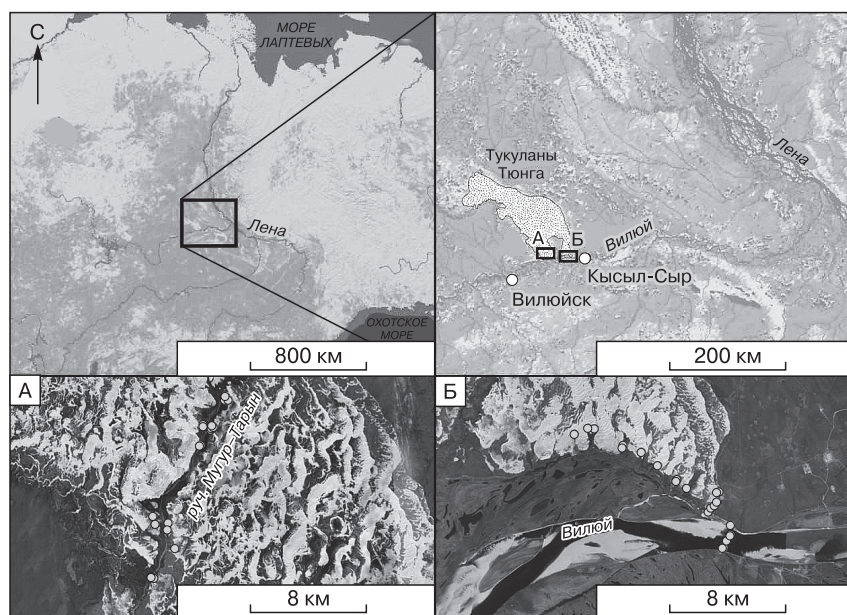
годишно действующих источников тукулана Махатта.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Песчаный массив Махатта расположен на левом берегу р. Вилюй в 40 км к северо-востоку от г. Вилюйск (рис. 1). Для исследуемой площади характерен дюнный тип местности. На большей части массива развиты незакрепленные, активно перевеваемые пески, которые чередуются с площадями, где пески закреплены слабым лишайниковым покровом и сосновым лесом.

Массив приурочен к четвертой надпойменной террасе, сложенной песчаными эоловыми и аллювиальными отложениями мощностью до 20–25 м, которые с глубиной сменяются песками верхнемелового возраста [Бойцов, Шепелев, 1976]. Гипсометрическая поверхность тукулана Махатта полого повышается от р. Вилюй в сторону водораздела от 90 до 160 м над ур. моря.

Для территории исследования характерен резко континентальный климат. Среднегодовая температура воздуха в г. Вилюйск за период 1882–1980 гг. составляла -9.3°C , годовое количество осадков 272 мм [Научно-прикладной справочник..., 1989]. В последние десятилетия наблюдается повышение среднегодовой температуры воздуха и количества осадков (рис. 2). Так, в г. Вилюйск среднегодовая температура воздуха за последние 50 лет составляет -8°C , а годовое количество осадков 310 мм [http://meteo.ru/]. При этом на ту-



○ 1

Рис. 1. Расположение объекта исследования (вверху) и точек наблюдений на тукуланах Тюнга [Павлов, 1981]:

А – Махатта; Б – восточная Махатта; 1 – точки отбора проб.

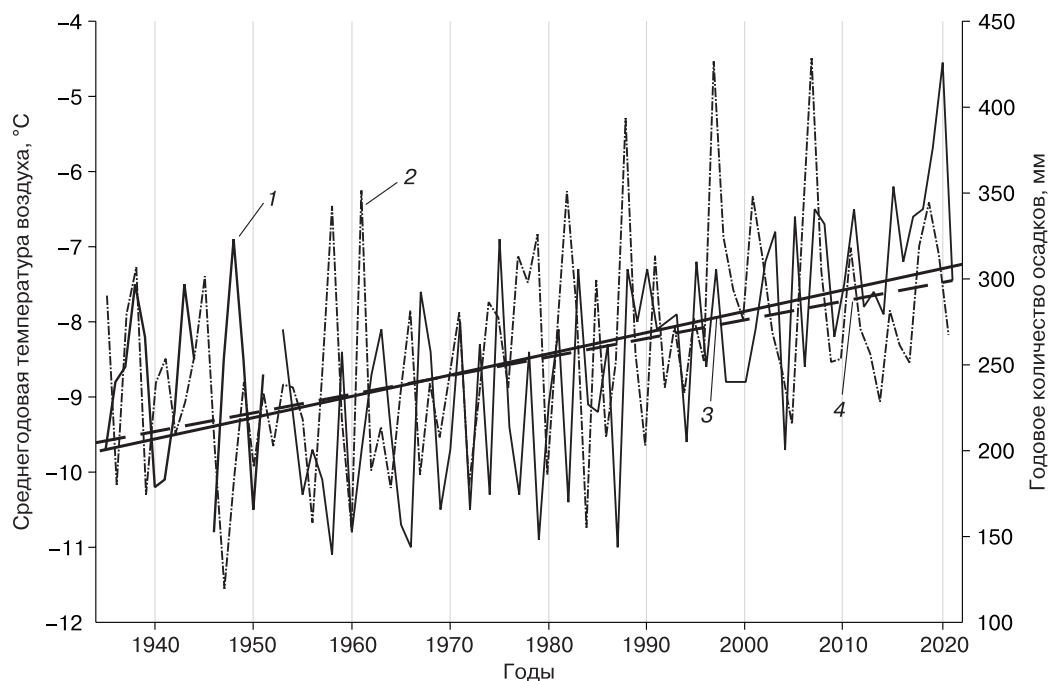


Рис. 2. График многолетней изменчивости (1935–2021 гг.) среднегодовой температуры воздуха и годового количества осадков по данным метеостанции Вилюйск [http://meteo.ru/]:

1 – среднегодовая температура воздуха, °C; 2 – годовое количество осадков, мм; 3, 4 – линейные тренды температуры и осадков соответственно.

кулане Махатта складываются специфические микроклиматические условия, которые выражаются в более низкой температуре воздуха в зимний и летний периоды, а также в большем количестве выпадающих атмосферных осадков по сравнению с другими ландшафтными элементами близлежащих районов [Благовидов, 1935; Бойцов, Шепелев, 1976].

Песчаный массив расположен в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород мощностью 550 м, фоновая температура пород $-3...-4$ °C [Геокриология СССР, 1989]. На участках поверхности массива со слабо развитым растительным покровом находится слой сезонного промерзания пород мощностью 7–8 м с температурой около 0 °C. На закрепленных борových песках, в пределах озерных котловин и других понижений формируется слой сезонного оттаивания мощностью 2.5–3.0 м, составляющий в отдельных случаях 0.8–1.0 м [Шепелев, Бойцов, 1975].

В песчаных отложениях тукулана Махатта в местах, где пески закреплены слабым растительным покровом и сосновым лесом, распространены воды сезонноталого слоя (СТС) [Шепелев, 1981]. Глубина залегания надмерзлотных вод изменяется от 0.6 до 5 м. Мощность обводненного слоя составляет первые десятки сантиметров. Основную роль в питании этих вод играют атмосферные

осадки. Воды гидрокарбонатные кальциево-магнелиевые с минерализацией 9–18 мг/л. Формируются надмерзлотные воды СТС в мае, а в октябре–декабре полностью промерзают [Шепелев, Бойцов, 1975].

В пределах тукулана Махатта развит субаэральный несквозной талик мощностью 120 м и более, до глубины 70–80 м талик – водоносный. В центральной части массива на участке перевалаемых песков воды имеют надмерзлотный характер. На периферийных участках массива, а также в местах, где пески закреплены растительностью, подземные таликовые воды приобретают межмерзлотный характер. Уровни подземных таликовых вод залегают на небольших глубинах (3–10 м). Коэффициент фильтрации водоносных песков составляет 0.2–1.0 м/сут. По данным гидродинамических работ 1973–1975 гг., удельный дебит скважин изменялся от 0.01–0.1 л/с в нижней части талика до 0.4 л/с в верхней. Статические запасы водоносного горизонта оценивались примерно в 25 млрд м³, динамические – в 130 млн м³. Питаются талики атмосферными водами, по химическому составу эти воды гидрокарбонатные магниевые-кальциевые с минерализацией 30–80 мг/л [Шепелев, Бойцов, 1975].

Разгрузка подземных вод талика происходит в виде нисходящих одиночных и групповых ис-



Рис. 3. Ключевые объекты полевых исследований:

а – р. Вилюй в районе песчаного массива; *б* – долина руч. Кысыл-Юрях; *в* – русло руч. Мугур-Тарын в нижнем течении (фото с левого берега); *г* – остатки наледи в русле ручья; *д* – разгрузка источников подземных вод; *е* – залесенная циркообразная воронка.

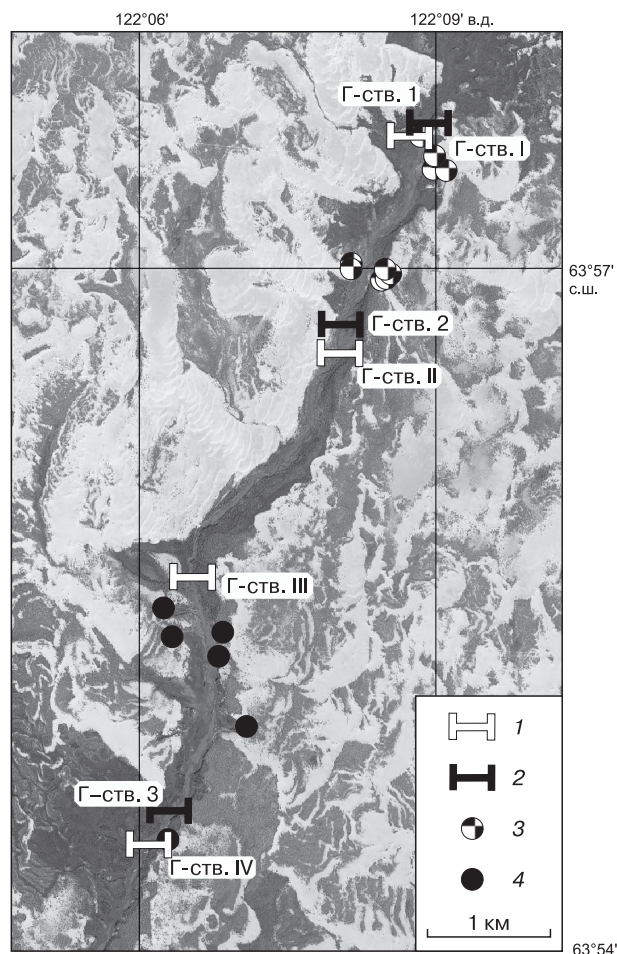


Рис. 4. Расположение гидрометрических створов на ручье Мугур-Тарын в западной части тукулана Махатта.

1 – гидрометрический створ, 2021 г.; 2 – гидрометрический створ, 1974 г.; 3 – группа источников А; 4 – группа источников Б.

точников в пониженных участках рельефа. В западной части массива таликовый водоносный горизонт дренируется в русло руч. Мугур-Тарын. Долина ручья имеет ширину 200–300 м и четко выделяется на местности бортовыми склонами (рис. 3, в). Выходы подземных вод в долине ручья представлены двумя группами – А и Б (рис. 4), каждая из которых включает многочисленные источники. Общая протяженность участка разгрузки подземных вод в долине около 6 км. Многочисленные выходы воды наблюдаются у основания склонов циркообразных понижений и вытянутых распадков, врезанных на глубину 5–8 м в песчаные склоны долины руч. Мугур-Тарын (см. рис. 3, д). В зимний период источники подземных вод образуют крупную наледь площадью более 1 км² и объемом льда 1.8 млн м³ [Шепелев, 1979].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В июле 2021 г. на тукулане Махатта (см. рис. 1) проведены полевые работы, в ходе которых были выполнены измерения температуры t , удельной электропроводности ЕС и водородного показателя pH вод ручьев и источников в западной и восточной частях тукулана Махатта с использованием мультимонитора НМ Digital Hydromaster НМ-200.

Пробы воды для определения химического состава подземных и поверхностных вод отобраны как в западном, так и в слабоизученном восточном участках массива. Всего отобрано 44 водных пробы компонентов водного стока тукулана Махатта (см. рис. 3), из них: 4 – из р. Виллой, 6 – из наледей, 28 – из очагов разгрузки подземных вод и 5 проб – из образуемых ими ручьев, 1 проба – атмосферные осадки. При статистической обработке результатов химических анализов источников подземных вод, опробованных в области распространения подвижных тукуланов, также привлечены фоновые материалы ИМЗ СО РАН за 2014–2017 гг. (24 пробы). Аналитические исследования состава воды выполнены в химической лаборатории ИМЗ СО РАН методами титриметрии и капиллярного электрофореза, а также в Аналитическом сертификационном испытательном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН (г. Черноголовка) масс-спектральным (ICP–MS) и атомно-эмиссионным (ICP–AES) методами анализа с индуктивно связанной плазмой.

Дебит источников подземных вод был определен по данным замеров расходов воды на четырех гидрометрических створах (см. рис. 4) методом площадь–скорость. Измерения скоростей течения производились гидрометрической вертушкой ИСПВ-ГР-21М1, вычисления выполнялись аналитическим способом. Для анализа полученных результатов были привлечены фоновые данные ИМЗ СО РАН за 1973–1974 гг.

Для выявления степени зарастания тукулана Махатта было проведено визуальное дешифрирование космических снимков. В качестве основного источника данных выбран снимок космических миссий Corona D3C1203-100005A012 на дату 08.07.1972 г. и подложка космоснимков ESRI World Imagery. Расчет водосборной площади руч. Мугур-Тарын проводился с помощью ГИС-обработки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Базовые физические и химические характеристики поверхностных и подземных вод тукулана Махатта

Базовые физические и химические характеристики поверхностных и подземных вод были

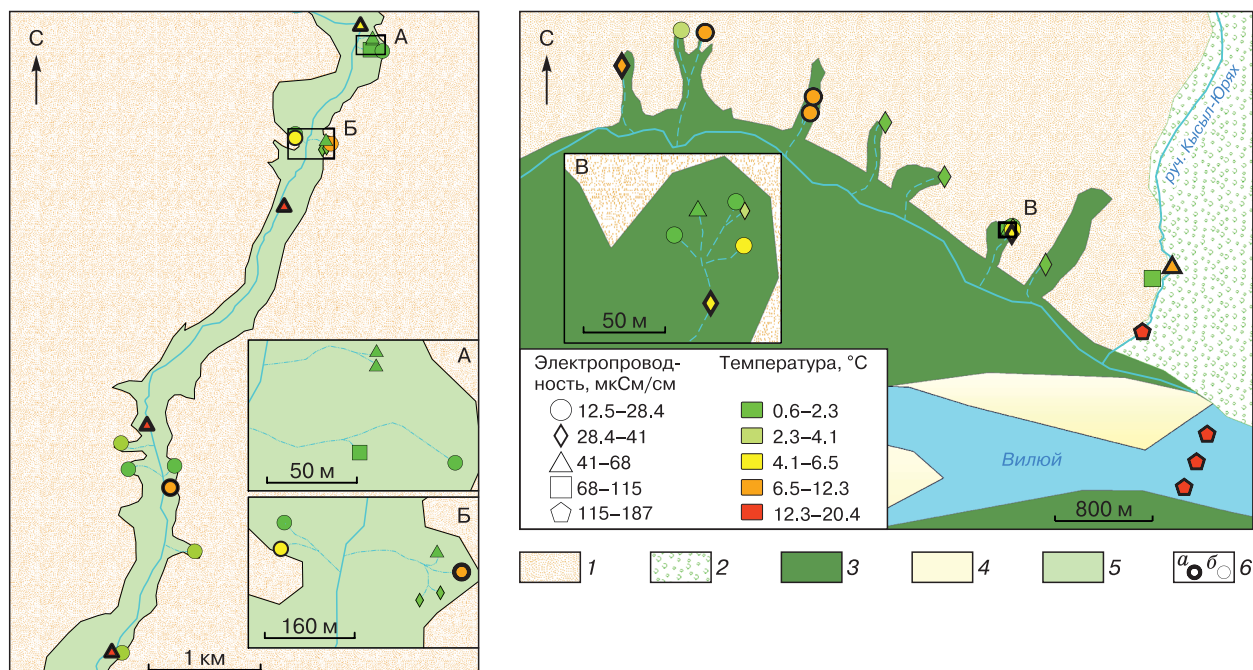


Рис. 5. Температура и электропроводность подземных и поверхностных вод западной (слева) и восточной (справа) частей тукулана Махатта.

1 – незакрепленные развеваемые пески (тукуланы); 2 – пески, закрепленные сосновым лесом; 3 – пойма и низкие надпойменные террасы; 4 – речные отмели; 5 – долина руч. Мугур-Тарын; 6 – воды поверхностные (а) и подземные (б).

определены на двух участках тукулана Махатта (см. рис. 1). Результаты анализа полученных данных по температуре и электропроводности приведены на рис. 5.

В период проведения работ с 5 по 11 июля 2021 г. температура воздуха колебалась от 6 до 37 °C [http://meteo.ru/] и характеризовалась выраженными внутрисуточными колебаниями, достигающими 7–25 °C. Подземные воды в местах разгрузки (в 2–3 м от песчаного склона) имели температуру от 0.6 до 4.1 °C, поверхностные – от 4.7 до 20.4 °C. Средняя температура подземных вод составляла 2 °C, поверхностных равна 13.5 °C. Минимальную температуру среди поверхностных водотоков имел ручей, протекающий в распадке с близким залеганием мерзлых пород, максимальную – воды р. Вилюй. Среди подземных вод наименьшая температура также наблюдалась в местах близкого (0.5–0.9 м) залегания кровли многолетнемерзлых пород к поверхности (проверено металлическим щупом), максимальная температура замерена в одном из распадков верхней группы источников руч. Мугур-Тарын.

Удельная электропроводность подземных вод варьирует от 12.5 до 115.0 мкСм/см, поверхностных – от 15.7 до 187.0 мкСм/см. Наименьшей электропроводностью среди поверхностных вод обладают временные водотоки, сформированные, вероятно, недавно выпавшими осадками. Наи-

большими значениями характеризуются воды р. Вилюй. Среднее значение электропроводности подземных вод восточной части тукулана равно 36.0 мкСм/см, западной – 32.0 мкСм/см.

Химический состав поверхностных и подземных вод тукулана Махатта

В июле 2021 г. вода р. Вилюй напротив тукуланового массива Махатта имела хлоридно-гидрокарбонатный смешанный по катионам состав и минерализацию 88–96 мг/дм³ (здесь и далее минерализация приведена по сумме минеральных веществ) (табл. 1). По условиям кислотно-щелочной среды воды нейтральные, по величине общей жесткости (1.4 мг-экв/дм³) – мягкие. По направлению от правого берега к левому наблюдается небольшое уменьшение минерализации, которое связано, видимо, с разбавляющим действием притоков р. Вилюй, берущих начало с тукуланового массива.

Источники подземных вод и водотоки тукулана Махатта весьма пресные, их минерализация не превышает 50 мг/дм³. Минимальная минерализация (8–19 мг/дм³) отмечена у холодных родников, сформированных надмерзлотными водами СТС. Ее величина сопоставима с атмосферными осадками (10 мг/дм³).

Надмерзлотно-межмерзлотные воды субэаральных таликов в очагах разгрузки имеют мине-

Таблица 1. Осредненный химический состав природных вод тукулана Махатта

Место отбора пробы	Формула химического состава
<i>Источники подземных вод</i>	
Надмерзлотные воды СТС	$M_{0.008-0.02} \frac{HCO_3(77-90)SO_4(4-18)Cl(2-5)}{Ca(25-40)Mg(25-33)Na(21-42)K(4-12)} pH 7.0-7.4$
Надмерзлотно-межмерзлотные воды талика	$M_{0.01-0.05} \frac{HCO_3(65-95)SO_4(1-26)Cl(1-8)}{Ca(26-50)Mg(24-39)Na(10-29)K(3-11)} pH 6.4-7.6$
<i>Поверхностные воды</i>	
Р. Виллой	$M_{0.09-0.1} \frac{HCO_3(69-76)Cl(18-22)SO_4(6-9)}{Ca(46-56)Mg(24-29)Na(19-24)} pH 6.7-7.0$
<i>Ручей Кысыл-Юрях</i>	
Выше наледи	$M_{0.05} \frac{HCO_3 93 SO_4 4 Cl 3}{Ca 47 Mg 37 Na 12 K 4} pH 6.3$
Наледь	$M_{0.02} \frac{HCO_3 77 Cl 13 SO_4 2}{Ca 49 Na 28 Mg 17 K 6} pH 6.7$
Ниже наледи	$M_{0.04} \frac{HCO_3 87 SO_4 10 Cl 2}{Ca 49 Mg 34 Na 13 K 3} pH 6.3$
Атмосферные осадки	$M_{0.01} \frac{HCO_3 82 SO_4 14 Cl 7}{Ca 41 Mg 52 Na 6 K 1} pH 7.4$

рализацию от 13 до 50 мг/дм³. На количество растворенных веществ в поверхностных водах руч. Кысыл-Юрях оказывало влияние таяние остатков наледей, за счет чего наблюдалось уменьшение минерализации ручья вниз по течению (см. табл. 1).

В химическом составе природных вод тукулана Махатта в июне–июле среди анионов стабильно преобладает гидрокарбонат-ион, катионный состав преимущественно магниевый-кальциевый. В пробах надмерзлотных вод СТС отмечается повышенное содержание ионов натрия и калия, доля которых соответственно достигает 20–42 и 6–11 % от суммы главных катионов. Обогащение надмерзлотных вод ионами натрия и калия, вероятно, связано с активным таянием опресненного подземного льда. Об этом свидетельствует обратная связь содержания этих ионов с минерализацией воды.

Отличительной чертой надмерзлотно-межмерзлотных вод является высокая концентрация в них суммарного железа, превышающая нормы для питьевых вод в 4–23 раза. Нередко его содержание больше, чем натрия. Источником железа являются полевые шпаты, содержание которых в неподвижной подстилающей толще эоловых песков достигает 21–25 % [Балыкова и др., 2019], а также алюмосиликатные минералы тяжелой фракции. К последним относятся роговая обманка, эпидот, ильменит, ставролит, которые присутствуют в песках тукулановых массивов [Урбан и др., 2013].

В надмерзлотных водах СТС железо не накапливается, поскольку активный водообмен и инфильтрация кислородосодержащих атмосферных осадков резко снижают его миграционную способность и обеспечивают закрепление его в горных породах [Кулаков, 2011].

Таблица 2. Статистические величины содержания основных тяжелых металлов в поверхностных и подземных водах тукулановых массивов в бассейне р. Виллой (n = 52)

Содержание элемента	Fe	Mn	Sr	Ba	Zn	Pb	Ni	Cu	V	Co	Rb	La	Ce
	мкг/л												
Минимум	30	1.3	8.2	4.65	0.53	0.53	0.37	0.6	0.13	0.13	0.13	0.04	0.07
Максимум	6900	288.1	74.5	54.5	9.40	4.35	3.18	1.9	3.64	2.34	1.76	4.31	8.57
Среднее	1990	93.1	30.0	21.2	3.03	1.95	0.87	0.5	0.98	0.54	0.59	0.59	1.31
Медиана	1150	90.8	22.4	12.7	2.34	2.03	1.00	1.0	0.59	0.47	0.44	0.30	0.63
Среднее для подземных вод*	328	12.7	20.8	9.09	22.4	1.52	1.84	2.44	0.64	0.29	1.42	1.11	–
Нормативы**, мг/л	0.3	0.1	7.0	0.7	5.0	0.01	0.02	1.0	0.1	0.1	0.005	–	0.06

* Среднее для подземных вод области криолитозоны [Shvartsev, 2008].

** Гигиенические нормативы для питьевых вод.

Примечание. Прочерк – нет данных.

Относительно средних содержаний, характерных для подземных вод зоны свободного водообмена провинции многолетнемерзлых пород, в поверхностных и подземных водах тукуланового массива Махатта, повышены концентрации марганца, стронция и бария – элементов, которые хорошо переходят в растворимую форму в присутствии органических кислот. При этом их содержание, так же как и всех других тяжелых металлов, на 1–3 порядка меньше гигиенических нормативов для вод питьевого качества (табл. 2). В целом низкая минерализация над- и межмерзлотных вод свидетельствует о малом времени их взаимодействия с горными породами в условиях интенсивного водообмена.

Ресурсы подземных вод источников ручья Мугур-Тарын

Длина руч. Мугур-Тарын около 12 км, а площадь водосбора составляет 122 км². По данным замеров расходов воды на гидрометрических створах руч. Мугур-Тарын (см. рис. 4) были определены естественные ресурсы водоносного талика в первой половине июля 2021 г.

Боковая приточность между гидрометрическими створами I и II, III и IV ручья формируется источниками подземных вод в его долине. Суммарный дебит группы источников А в июле 2021 г. составлял 343.3 л/с, группы источников Б – 113.5 л/с. Общий дебит источников, определенный как разность между расходом воды на замыкающем створе и значением поверхностного стока, составлял около 690 л/с. В 1974 г. дебит группы источников А составлял около 492 л/с, группы Б – около 278 л/с, а суммарный дебит источника в начале июля был равен 770 л/с. Суммарный дебит источника, полученный по многократным измерениям в летний период 1973–1974 гг., колебался в интервале 730–930 л/с. В период отсутствия инфильтрации атмосферных осадков дебит источника снижается. Так, дебит источника в зимний период, оцененный по наледным наблюдениям в 1974–1975 гг., составил 327 л/с [Шепелев, 1979]. Модуль родникового стока, рассчитанный по летнему дебиту руч. Мугур-Тарын, в 1974 г. изменялся от 6 до 7.7 л/(с·км²), в 2021 г. он составил 5.7 л/(с·км²). Слой стока в рассматриваемые периоды был равен 80–102 и 75 мм соответственно. Среднегодовое количество осадков за летний период (май–сентябрь) с 1973 по 2021 г. принято за 190 мм [http://meteo.ru/], средний летний дебит руч. Мугур-Тарын составляет 40–53 % от данной величины.

В 2021 г. отмечается пониженный по сравнению с 1973 и 1974 гг. суммарный летний дебит источника Мугур-Тарын. Необходимо учитывать, что верхний створ в 1970-х гг. (см. рис. 4) определял поверхностный сток и имел расход в среднем

10–16 л/с [Шепелев, Бойцов, 1975]. В 2021 г. расход на верхнем створе был значительно выше и составил 177 л/с. Вероятно, данный замер оценивает подземный сток вновь появившихся источников. Очаг разгрузки фиксировался и ранее, но был минимальным [Там же]. Это одна из причин расхождения в замерах на гидростворах I и II в разные годы. Тем не менее суммарный дебит источника Мугур-Тарын в 2021 г. по всем замерам оказался меньше, чем в 1974 г. На замыкающем створе в начале июля 1974 г. расход составлял 780 л/с, а в этот же период в 2021 г. был равен 706 л/с. Это может быть связано как с межгодовой изменчивостью факторов формирования поверхностного и подземного стока, так и с их направленными изменениями.

Влияние гидрометеорологических факторов на разгрузку подземных вод различно. Инфильтрация жидких атмосферных осадков, отмеченная по повышению уровня и температуры подземных вод, проявляется только с конца июля [Шепелев, 1978], поэтому ее влияние на различие расходов в рассматриваемые периоды минимально. В начале июля питание подземных вод талика происходит локально за счет талых вод [Там же]. По данным ближайшей метеостанции Вилюйск, высота снежного покрова в конце зимнего периода в 1974 г. была в среднем 38 см, а в 2021 г. составляла 47 см [http://meteo.ru/]. Различная метеорологическая ситуация не объясняет уменьшенный дебит источников в 2021 г. по сравнению с 1974 г.

В 70-е гг. прошлого столетия отмечалось, что цирки группы Б были более четко выражены по сравнению с верховьем ручья и имели обнаженные песчаные склоны [Шепелев, Бойцов, 1975]. В 2021 г. при проведении маршрутных наблюдений отмечено, что многие циркообразные воронки заросли молодой растительностью (преимущественно сосновым лесом) (см. рис. 3, е). Зарастание воронок может быть обусловлено увеличением количества осадков в Центральной Якутии за последние 50 лет. Это предположение подтверждают данные мониторинговых наблюдений на других подобных территориях, а именно, на песчаных раздувах Западной Сибири. При повышении суммы положительных температур воздуха за период 1970–2012 гг. на 0.3 °С/год и увеличении количества атмосферных осадков за последнее десятилетие с 500 до 590 мм площадь закрепленных растениями песков в долине р. Надым увеличилась на 10 %, а растительный покров стал более разнообразным [Лоботросова, 2014].

Результаты анализа космических снимков за 1972 и 2022 гг. показали, что увеличение площади растительности на тукулане Махатта происходит, как правило, за счет ее уплотнения. Там, где было редколесье, увеличилось количество деревьев и,

вероятно, сомкнутость напочвенного покрова. Это дешифрируется по более зернистой текстуре на снимках 2022 г. (рис. 6, б). Также ранее четко выделяемые песчаные “поляны” в лесах и редколе-

сях уменьшаются в размерах под наступлением новых деревьев и напочвенного покрова или подстилки (см. рис. 6). Увеличение залесенности наблюдается также в некоторых циркообразных во-

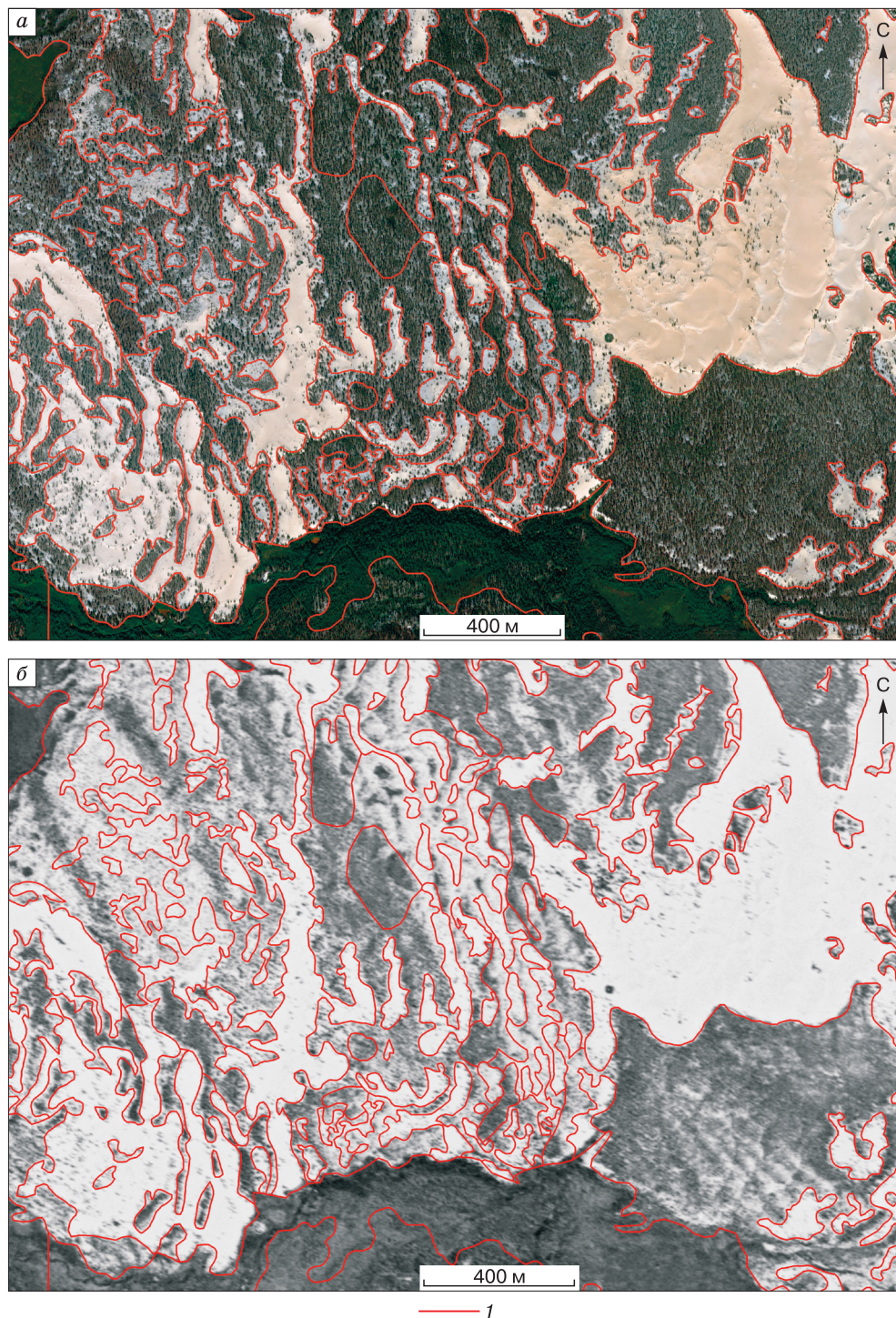


Рис. 6. Изменения растительного покрова в восточной части тукулана:

а – 2022 г.; б – 1972 г.; 1 – границы различных типов поверхностного покрова (проведены по современным снимкам сервиса ESRI World Imagery).

ронках, к которым приурочены выходы подземных вод. Зарастают как песчаные склоны и днища суффозионных воронок, так и русла ручьев, обра-

зованных источниками (рис. 7). Следует отметить, что на снимках 2022 г. в русле руч. Кысыл-Юрях фиксируются новые выходы подземных вод и ко-

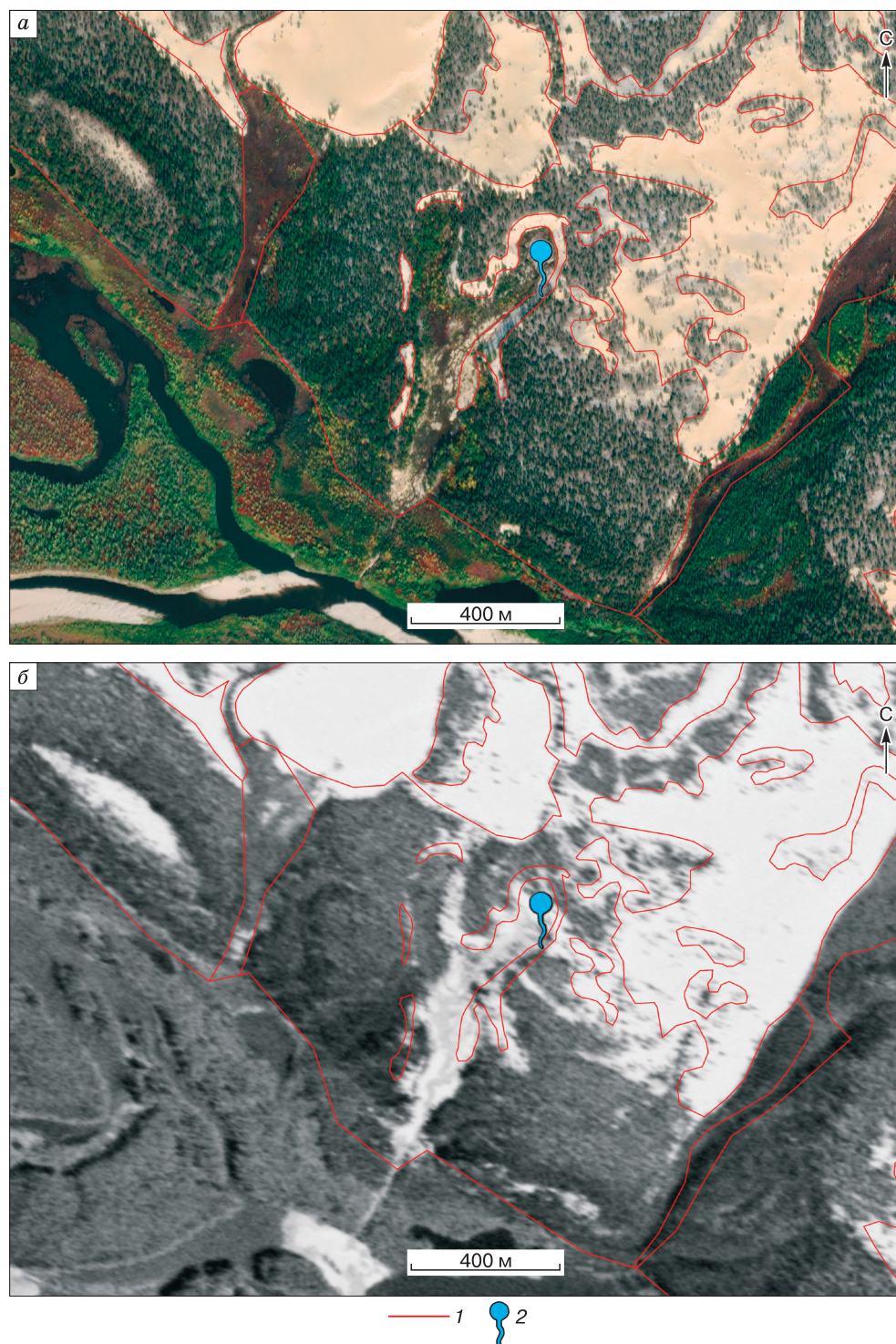


Рис. 7. Изменение растительного покрова в местах разгрузки подземных вод в восточной части тукулана:

a – 2022 г.; *б* – 1972 г.; 1 – границы различных типов поверхностного покрова (проведены по современным снимкам сервиса ESRI World Imagery); 2 – места разгрузки подземных вод.

нус выноса песчаного материала (рис. 8). Вероятно, это связано с перераспределением подземного стока и миграцией его выходов в связи с измене-

нием поверхностных условий, что указывает на динамичность гидрогеологической обстановки на тукулане.



Рис. 8. Появление новых очагов разгрузки подземных вод в русле ручья Кысыл-Юрях:

a – 2022 г.; *б* – 1972 г.; 1 – границы различных типов поверхностного покрова (проведены по современным снимкам сервиса ESRI World Imagery); 2 – новые (появившиеся) очаги разгрузки подземных вод.

По данным П.Д. Павлова, в 1981 г. закрепленность тукулана Махатта (включая восточную часть – тукулан Тарагай) растительностью составляла 32 % от площади всего массива [Павлов, 1981]. Результаты дешифрирования современных космических снимков показали, что площадь, закрепленная растительным покровом, увеличилась до 50 %. Необходимо учитывать, что различия методик оценки закрепленности тукулана могут вызывать некоторую погрешность в полученных данных, что требует отдельных исследований. Таким образом, результаты анализа космических снимков подтверждают данные полевых наблюдений о закреплении поверхности тукулана Махатта растительным покровом. Причем происходит увеличение как площади основного леса и напочвенного покрова, так и их плотности.

Заращение площади таликовых участков и связанное с ним понижение температуры горных пород в период климатического потепления рассмотрено в работе А.В. Бойцова [2004]. Одной из причин формирования таликов в песчаных отложениях является их специфический влажностный режим: летом влажность песков выше, чем зимой, что приводит к повышению теплопроводности талых грунтов относительно мерзлых и формированию положительной температурной сдвижки, обеспечивающей существование таликов [Бойцов, 2002]. При увеличении площади, занятой растительностью, возрастают расходные составляющие водного баланса – испарение и транспирация. Это, в свою очередь, приводит к снижению величины инфильтрационного питания зоны аэрации, а также к уменьшению положительной температурной сдвижки за счет уменьшения летней влажности песков [Бойцов, 2011]. Кроме того, заращение пустынных участков приводит к затенению поверхности и, как следствие, уменьшению прямой солнечной радиации.

В сочетании вышеперечисленные факторы ведут к изменению мерзлотной обстановки, а именно, к увеличению площади мерзлых пород и понижению их температуры, что находит отражение в режиме и условиях разгрузки подземных вод. Это, по мнению авторов, послужило главной причиной уменьшения дебита источников руч. Мугур-Тарын в 2021 г.

ВЫВОДЫ

1. Поверхностные воды ручьев и подземные воды свободного водообмена в пределах тукулана Махатта весьма пресные, по величине общей жесткости – очень мягкие, по значению pH – нейтральные, по температуре воды – холодные и очень холодные. Надмерзлотные воды СТС имеют гидрокарбонатный смешанный по катионам химический состав и минерализацию 8–19 мг/дм³. В формировании этого типа вод в июне–июле, наряду с ат-

мосферными осадками, большая роль принадлежит ультрапресной воде, образующейся при таянии подземного льда. Надмерзлотные и межмерзлотные воды таликов гидрокарбонатные кальциево-магниевые с минерализацией 13–50 мг/дм³. Их макрокомпонентный состав за более чем 45-летний период не претерпел изменений.

2. По данным полевых наблюдений и результатам обработки космических снимков отмечается увеличение площади растительного покрова на тукулане Махатта за последние 40–50 лет примерно на 18 %. Закрепление площади тукулана в дальнейшем может способствовать сокращению количества тепла, поступающего в талик с поверхности, уменьшению его размеров в результате промерзания и вследствие этого может привести к изменению режима и условий разгрузки подземных вод талика.

3. Уменьшение дебита источников руч. Мугур-Тарын в 2021 г. авторы связывают с изменением мерзотно-гидрогеологических условий в результате заращения поверхности тукулана.

Изучение подобных территорий требует мониторинговых наблюдений на опорных гидрогеотермических режимных площадках.

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность к.г.-м.н., доценту А.В. Бойцову за помощь и советы при проведении данного исследования.

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

Литература

- Балыкова С.Д., Харламова А.Е., Кунафин А.Д. и др. Состав и строение песчаных почв тукуланов в долинах Лены и Вилюя // Литология осадочных комплексов Евразии и шельфовых областей: Материалы IX Всерос. литолог. совещ. Казань, Изд-во Казан. ун-та, 2019, с. 34–35.
- Благовидов Н.Л. Четвертичные отложения, климат и почвы бассейна реки Тюнг (Якутская АССР). М., Изд-во АН СССР, 1935, 174 с.
- Бойцов А.В. Условия формирования и режим подземных вод надмерзлотного и межмерзлотного стока в Центральной Якутии: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Якутск, 2002, 176 с.
- Бойцов А.В. Устойчивость к промерзанию надмерзлотных таликов Центральной Якутии // Криосфера нефтегазоносных провинций: Материалы Междунар. конф. Тюмень, ТИССО, 2004, с. 30.
- Бойцов А.В. Геокриология и подземные воды криолитозоны. Тюмень, ТюмГНГУ, 2011, 176 с.
- Бойцов А.В., Шепелев В.В. Мерзотно-гидрогеологические условия массива разведываемых песков Махатта (Центральная Якутия) // Гидрогеологические исследования криолитозоны. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1976, с. 25–34.
- Галанин А.А., Павлова М.Р., Шапошников Г.И., Лыткин В.М. Тукуланы: песчаные пустыни Якутии // Природа, 2016, № 11 (1215), с. 44–55.

Геокриология СССР. Средняя Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Наука, 1989, 414 с.

Еникеев Ф.И. Урочище пески Чарской впадины (Северное Забайкалье) // География и природ. ресурсы, 2014, № 4, с. 73–80.

Кулаков В.В. Геохимия подземных вод Амурской области. Хабаровск, ИВЭП ДВО РАН, 2011, 254 с.

Лоботросова С.А. Восстановление растительности на эоловых формах рельефа в северной тайге Западной Сибири // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 1, с. 83–87.

Научно-прикладной справочник по климату СССР. Вып. 24. Якутская АССР. Кн. 1. Л., Гидрометеиздат, 1989, 608 с.

Павлов П.Д. Географическое распространение эоловых песков в Центральной Якутии // Эоловые образования Центральной Якутии. Якутск, Изд-во ИМЗ СО АН СССР, 1981, с. 18–30.

Урбан А.А., Галанин А.А., Чжан Т.Р. Литолого-минералогическая характеристика перевеваемого песчаного комплекса “Кызыл-Сырский” // Разведка и охрана недр, 2013, № 12, с. 23–26.

Шепелев В.В. О режиме, балансе и особенностях питания межмерзлотных вод песчаных массивов Центральной Якутии // Геокриологические и гидрогеологические исследования Якутии. Якутск, Изд-во ИМЗ СО АН СССР, 1978, с. 145–162.

Шепелев В.В. Режим источника и наледи Мугур-Тарын в Центральной Якутии // Исследования наледей. Якутск, Изд-во ИМЗ СО АН СССР, 1979, с. 87–97.

Шепелев В.В. Подземные воды тукуланов Центральной Якутии // Эоловые образования Центральной Якутии. Якутск, Изд-во ИМЗ СО АН СССР, 1981, с. 30–41.

Шепелев В.В. Надмерзлотные воды криолитозоны. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2011, 169 с.

Шепелев В.В., Бойцов А.В. Особенности формирования и режима подземных вод тукуланых массивов Центральной Якутии (на примере массива Махатта). Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 1975, 238 с.

Black R.F. Aeolian deposits of Alaska // Arctic, 1951, vol. IV, No. 2, p. 89–111.

Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth // Geochem. Int., 2008, vol. 46, No. 13, p. 1285–1398.

URL: <http://meteo.ru/> (дата обращения: 10.02.2022).

References

Balykova S.D., Kharlamova A.E., Kunafin A.D. et al. Composition and structure of sandy soils of tukulans in the Lena and Vilyui valleys. In: Lithology of sedimentary complexes of Eurasia and shelf regions: materials of the IX All-Russian Lithological Meeting. Kazan, Kazan Univ. Press, 2019, p. 34–35 (in Russian).

Blagovidov N.L. Chetvertichnye otlozheniya, klimat i pochvy bassejna reki Tyung (Yakutskaya ASSR) [Quaternary sediments, climate and soils of the Tyung River basin (Yakut ASSR)]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1935, 174 p. (in Russian).

Boitsov A.V. The Conditions of Formation and the Regime of Ground Waters of Supra-permafrost and Intra-permafrost Runoff in Central Yakutia. Candidate thesis (geology). Yakutsk, 2002, 176 p. (in Russian).

Boitsov A.V. Frost resistance of supra-permafrost taliks in Central Yakutia. In: Cryosphere of oil and gas provinces: Materials of the Int. Conf. Tyumen, TISSO, 2004, p. 30.

Boitsov A.V. Geokriologiya i podzemnye vody kriolitozony [Geocryology and Ground Waters of Permafrost Zone]. Tyumen, TyumGNGU, 176 p. (in Russian).

Boitsov A.V., Shepelev V.V. The permafrost-hydrogeological conditions of the Makhatta massif of quick sands (Central Yakutia). In: Gidrologicheskie issledovaniya kriolitozony [Hydrogeological Studies of the Permafrost Zone]. Yakutsk, 1976, p. 25–34 (in Russian).

Galanin A.A., Pavlova M.R., Shaposhnikov G.I., Lytkin V.M. Tukulans: sandy deserts of Yakutia. Priroda, 2016, No. 11 (1215), p. 44–55.

Geokriologiya SSSR. Srenyaya Sibir [Geocryology of the USSR. Central Siberia]. Moscow, Nauka, 1989, 414 p. (in Russian).

Enikeev V.I. The tract of the sands of the Chara Basin (northern Transbaikalia). Geogr. and Natur. Resour., 2014, No. 4, p. 73–80.

Kulakov V.V. Geokhimiya podzemnykh vod Amurskoi oblasti [Geochemistry of groundwater in the Amur region]. Khabarovsk, IWEP FEB RAN, 2011, 254 p. (in Russian).

Lobotrova S.A. Vegetation recovery on eolovy relief forms in the northern taiga of West Siberia. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2014, vol. XVIII, No. 1, p. 83–87.

Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR [Scientific and applied reference book on the climate of the USSR]. Issue 24. Yakut ASSR. Book 1. Leningrad, Gidrometeizdat, 1989, 608 p. (in Russian).

Pavlov P.D. Geographic distribution of eolian sands in Central Yakutia. In: Eolovye obrazovaniya Central'noi Yakutii [Eolian formations of Central Yakutia]. Yakutsk, IMZ SO AN SSSR, 1981, p. 18–30 (in Russian).

Urban A.A., Galanin A.A., Chzhan T.R. Lithologic-and-mineralogical characteristic of dune complex “Kyzyl-Syrskiy”. Razvedka i okhrana nedr [Prospect and protection of mineral resources], 2013, No. 12, p. 23–26.

Shepelev V.V. On the regime, balance and features of the nutrition of interpermafrost waters of sandy massifs in Central Yakutia. In: Geokriologicheskie i gidrogeologicheskie issledovaniya Yakutii [Geocryological and hydrogeological studies of Yakutia]. Yakutsk, IMZ SO AN SSSR, 1978, p. 145–162 (in Russian).

Shepelev V.V. Regime of the source and icing of Mugur-Taryn in Central Yakutia. In: Issledovanie naledei [Research of icings]. Yakutsk, IMZ SO AN SSSR, 1979, p. 87–97 (in Russian).

Shepelev V.V. Underground waters of tukulans in Central Yakutia. In: Eolovye obrazovaniya Central'noi Yakutii [Eolian formations in Central Yakutia]. Yakutsk, IMZ SO AN SSSR, 1981, p. 30–41 (in Russian).

Shepelev V.V. Nadmerzlotnye vody kriolitozony [Superpermafrost Cryolithozone Water]. Novosibirsk, Acad. Publ. House “Geo”, 2011, 169 p. (in Russian).

Shepelev V.V., Boitsov A.V. Peculiarities of the formation and regime of groundwater in the tukulan massifs of Central Yakutia (on the example of the Makhatta massif). Yakutsk, IMZ SO AN SSSR, 1975, 238 p. (in Russian).

Black R.F. Aeolian deposits of Alaska. Arctic, 1951, vol. IV, No. 2, p. 89–111.

Shvartsev S.L. Geochemistry of Fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth. Geochem. Int., 2008, vol. 46, No. 13, p. 1285–1398.

URL: <http://meteo.ru/> (last visited: 10.02.2022).

*Поступила в редакцию 18 декабря 2022 г.,
после доработки – 31 мая 2023 г.,
принята к публикации 28 июня 2023 г.*