

ГЕОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ И ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КРИОСФЕРЕ

УДК 551.345.1

DOI: 10.15372/KZ20210502

ТЕМПЕРАТУРА ПОРОД В СОВРЕМЕННОЙ
ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКЕ СТЕПНОГО ПРИБАЙКАЛЬЯ
(НА ПРИМЕРЕ О. ОЛЬХОН)А.А. Светлаков¹, Е.А. Козырева¹, Д.О. Сергеев²¹Институт земной коры СО РАН,

664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия; svetlakov@crust.irk.ru, kozireva@crust.irk.ru

²Институт геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН,

101000, Москва, Уланский пер., 13, стр. 2, Россия; sergeevdo@mail.ru

Выполнен анализ современного температурного состояния мерзлых и талых пород на территории Прибайкалья (о. Ольхон). Показано, что современный тренд температуры пород напрямую связан с изменением климатических условий и повышением температуры атмосферного воздуха. Многолетнемерзлые породы в пределах о. Ольхон испытывают существенные преобразования, а изменения, происходящие в грунтовой толще, направлены на деградацию мерзлых толщ.

Ключевые слова: мерзлые породы, температурный режим, сезонноталый и сезонномерзлый слои.

SOIL TEMPERATURE IN THE CONTEMPORARY
NATURAL-CLIMATIC SITUATION OF THE STEPPE BAIKAL REGION
(ON THE EXAMPLE OF OLKHON ISLAND)A.A. Svetlakov¹, E.A. Kozyreva¹, D.O. Sergeev²¹Institute of the Earth's Crust, SB RAS,

Lermontov str. 128, Irkutsk, 664033, Russia; svetlakov@crust.irk.ru, kozireva@crust.irk.ru

²Sergeev Institute of Environmental Geoscience, RAS,

Ulansky per. 13, bldg. 2, Moscow, 101000, Russia; sergeevdo@mail.ru

The paper analyzes the current temperature state of frozen and thaw soils in the Baikal region (Olkhon Island). It has been demonstrated that the current trend in soil temperature is directly related to climate changes and to the increase in the atmospheric air temperature. Permafrost within Olkhon Island is significantly transformed: the processes in soils are aimed at the degradation of frozen strata.

Key words: permafrost, temperature regime, seasonally thawed and seasonally frozen layer.

ВВЕДЕНИЕ

Целью работы является оценка состояния сезонномерзлого и сезонноталого слоев в пределах южной границы криолитозоны в условиях современного изменения климата. Основная задача исследования – определение температурного режима мерзлых и талых пород, а также выявление степени его преобразования в условиях промерзания и протаивания.

Климат оказывает сильное воздействие на термодинамический режим многолетнемерзлых грунтов: изменение температуры воздуха способствует активизации геокриологических процессов [Малкова и др., 2011; Grosse et al., 2011]. Для всей территории Прибайкалья установлен положительный тренд температуры воздуха, при этом прирост температуры за период 1965–2003 гг. составил 0.042–0.046 °C/год [Павлов, 2008; Малкова

и др., 2011]. На территории степного Прибайкалья, на острове Ольхон, отмечается рост температуры воздуха, а среднегодовые значения в последние годы варьируют в пределах положительных значений. За последние 65 лет тренд среднегодовой температуры воздуха составил 0.03 °C/год (рис. 1) (<http://gis.ncdc.noaa.gov>; <http://www.pogodaiklimat.ru>). Среднегодовая температура рассчитана для холодного и теплого периодов и соответствует гидрологическому году.

Основные изменения термодинамического режима многолетнемерзлых грунтов зависят от температуры воздуха и в первую очередь отражаются на состоянии сезонномерзлого или сезонноталого слоев, где происходит основной теплообмен в годовом цикле теплооборотов [Общее мерзлотоведение..., 1978]. Изменение температурного

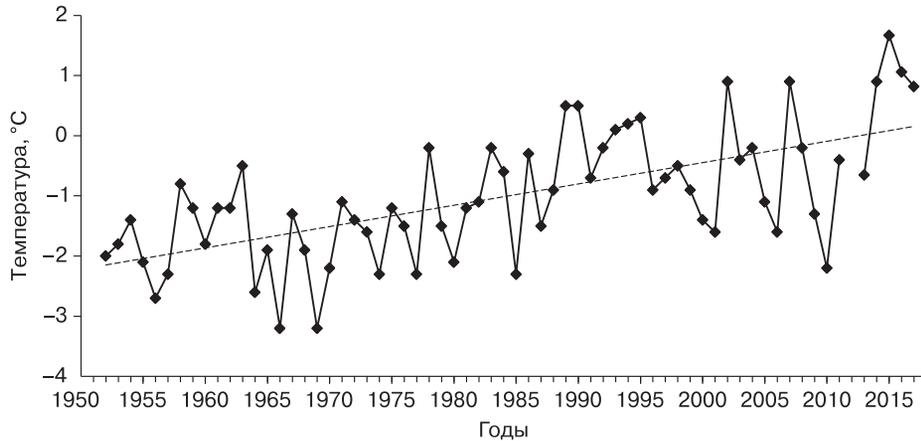


Рис. 1. Температура атмосферного воздуха на о. Ольхон (по данным метеостанции Узурь, абс. отметка 462 м).

состояния многолетнемерзлых пород и их деградация могут продолжаться десятилетиями и даже столетиями [Балобаев, 1971]. Поэтому в краткосрочных исследованиях не всегда фиксируется деградация мерзлых пород, в то время как по изменению температуры в пределах сезонного слоя можно судить о реакции мерзлых пород на современную трансформацию климата и о направленности этих процессов.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Остров Ольхон расположен в центральной части Байкала, на границе Северобайкальской и Среднебайкальской впадин озера (рис. 2) [Лут, 1978]. Детальные исследования температурного

режима горных пород проводились на западном побережье о. Ольхон, на участке, расположенном северо-восточнее пос. Харанцы между мысами Харанцы и Харалдай, на пологом склоне северо-западной экспозиции с проявлениями оползней разной степени активности.

Все степное Прибайкалье испытывает недостаток в атмосферных осадках. На о. Ольхон выпадает от 197 до 278 мм осадков, а годовой коэффициент увлажнения равен 0.34. Зимой осадков еще меньше, а толщина снежного покрова не превышает 10–15 см [Иметхенов и др., 1997; Пеллинен, 2018]. Растительный покров слабо выражен и представлен в основном степными и луговыми растениями [Хименков и др., 2015]. На участках

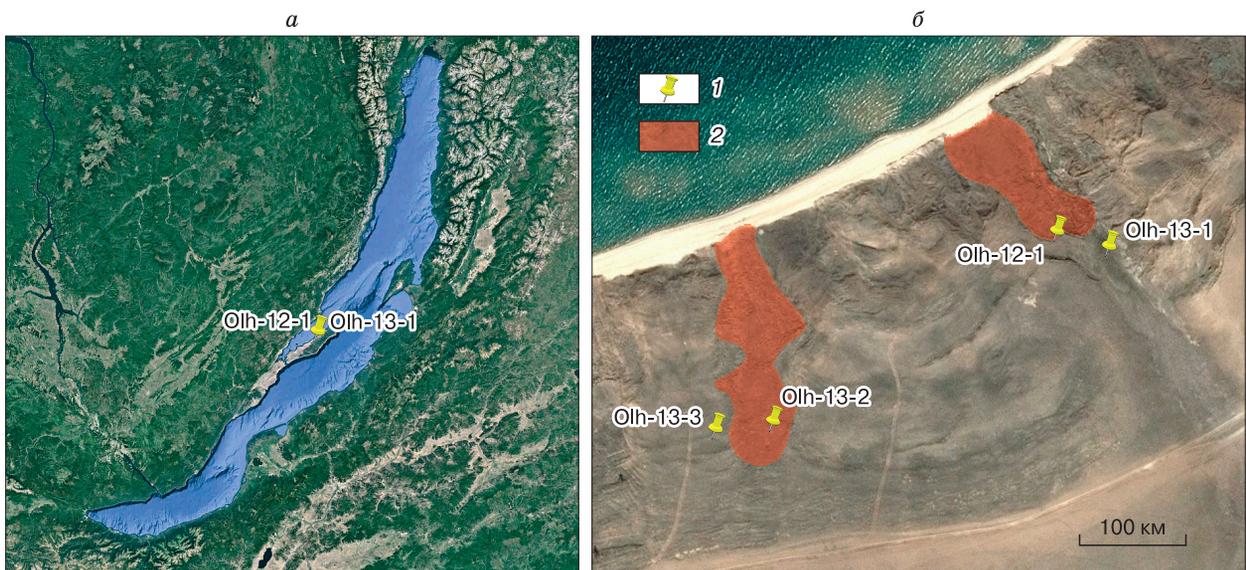


Рис. 2. Территория исследования (а) и схема расположения мониторинговых скважин (б).

1 – расположение мониторинговых скважин; 2 – области, подверженные оползневым процессам.

развития многолетнемерзлых пород растительный покров формируется плотнее и насыщеннее. Грунты исследуемой территории относятся к четвертичным делювиально-пролювиальным и неогеновым озерным, озерно-болотным отложениям, на которых часто развиваются различные экзогенные геологические процессы [Пальшин, 1968]. В геокриологическом аспекте территория относится к области редкоостровного распространения многолетнемерзлых пород (ММП) криолитозоны. Согласно материалам Ф.Н. Лещикова [1978], мощность линз на участках редкоостровного распространения ММП не превышает 10–15 м, среднегодовая температура ММП изменяется от -0.1 до -0.2 °С, их кровля залегает на глубине 2.0–2.5 м, а среднегодовая температура пород сезонного слоя на подошве составляет $-0.1...-0.5$ °С. Глубина сезонного промерзания–протаивания не превышает 2.0–2.5 м. По термическому режиму ММП данных областей крайне неустойчивы и при нарушении природных условий подвержены процессам деградации.

В пределах участка исследования пробурены четыре скважины: Olh-12-1 (глубина 3.5 м), Olh-13-1 (глубина 8.0 м), Olh-13-2 (глубина 9.0 м) и Olh-13-3 (глубина 15.0 м), которые можно разделить на две группы (см. рис. 2). Первая группа скважин (Olh-12-1 и Olh-13-1) пробурена на участке распространения многолетнемерзлых пород. Литологический разрез изучен до глубины 8 м, верхняя часть разреза представлена глинистыми озерными отложениями, с глубины 1.0 м – с прослоями супеси мощностью 1–3 см. На глубине 1.5 м вскрыты воды верховодки, что обуславливает влажность в верхней части разреза (0.5–1.0 м) до 30 %. Мерзлые породы вскрыты на глубине 1.9 м.

Вторая группа скважин (Olh-13-2 и Olh-13-3) расположена на расстоянии 300 м от первой группы и вскрывает талые породы. Литологический разрез талых пород изучен до глубины 15 м, он представлен глинистыми отложениями с прослоями песка, нижняя часть разреза сложена глинами озерного происхождения. Грунтовые воды вскрыты на глубине 4.5 м, влажность пород в верхней части разреза (0.5–1.0 м) не превышает 4–5 %. Также на участке исследования установлен датчик на высоте 2.5 м для определения температуры воздуха. Датчик расположен юго-западнее скважин первой группы, на расстоянии 800 м.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ

Геокриологический мониторинг осуществлялся в наблюдательных скважинах Olh-12-1, Olh-13-1, Olh-13-2 и Olh-13-3 в соответствии с рекомендациями международной программы GTN-P, входящей в систему наблюдения за глобальными климатическими изменениями Всемир-

ной метеорологической организации. На начальном этапе оборудование наблюдательной сети осуществлялось исходя из технических возможностей, фиксировались изменения температурного режима пород в пределах сезонного и сезонномерзлого слоев. Заложение термодатчиков в скв. Olh-12-1, которая была пробурена в августе 2012 г., производилось на глубинах 0.6, 1.0, 1.6 и 3.5 м. В августе 2013 г. пробурены скважины Olh-13-1, Olh-13-2 и Olh-13-3, термодатчики установлены на глубинах 0.1, 2.0 и 4.0 м. Максимальная глубина заложения термодатчика в скв. Olh-13-3 – на отметке 9.3 м.

Использовались термодатчики (логгеры) компании Onset Computer Corporation – HOBO U12-008, HOBO Pro V2 Temperature/Relative Humidity Data Logger и HOBO UA-001-64 Pendant Temperature/Alarm (Waterproof) Data Logger. Логгеры типа HOBO U12-008 установлены в скважины Olh-12-1, Olh-13-2 и Olh-13-3, точность измерений ± 0.1 °С. Логгеры типа HOBO Pro V2 установлены в скважине Olh-13-1, точность измерений ± 0.2 °С. Датчик HOBO UA-001-64 фиксирует температуру воздуха, точность измерений ± 0.4 °С. Данные по температуре воздуха и пород фиксировались каждый час и записывались на электронный носитель станции термодатчика.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Температура атмосферного воздуха. Среднегодовая температура воздуха на участке исследования, по данным измерений с 2013 г., варьировала в пределах от -1.2 до 1.7 °С, что близко к условиям метеостанции Узуры (абс. отметка 462 м), расположенной в степной зоне севернее данного участка.

Расчет среднегодовых значений температуры соответствует гидрологическому году и включает два периода: зимний – с октября по март и летний – с апреля по сентябрь. За период наблюдений 2013–2018 гг. среднегодовая температура воздуха на участке поднялась выше 0 °С. Незначительный, но стабильный рост температуры воздуха отмечен в теплый период (апрель–сентябрь) (рис. 3, а). В 2013 г. средняя температура в теплый период составила 9.6 °С, а к 2018 г. она поднялась до отметки 12.1 °С. В холодный период (октябрь–март) общий тренд температуры воздуха также показывает положительную динамику, однако для достоверного анализа требуются более продолжительные наблюдения (см. рис. 3, б). Значительный рост температуры отмечен в 2013–2014 гг., когда средний показатель вырос на 4.8 °С, но с 2014 г. средние значения температуры воздуха в зимний период понизились с -7.4 до -10.3 °С.

Температура пород. В 2012 г. на исследуемой территории в скважине Olh-12-1 среднегодовая температура ММП на глубине 3.5 м составила

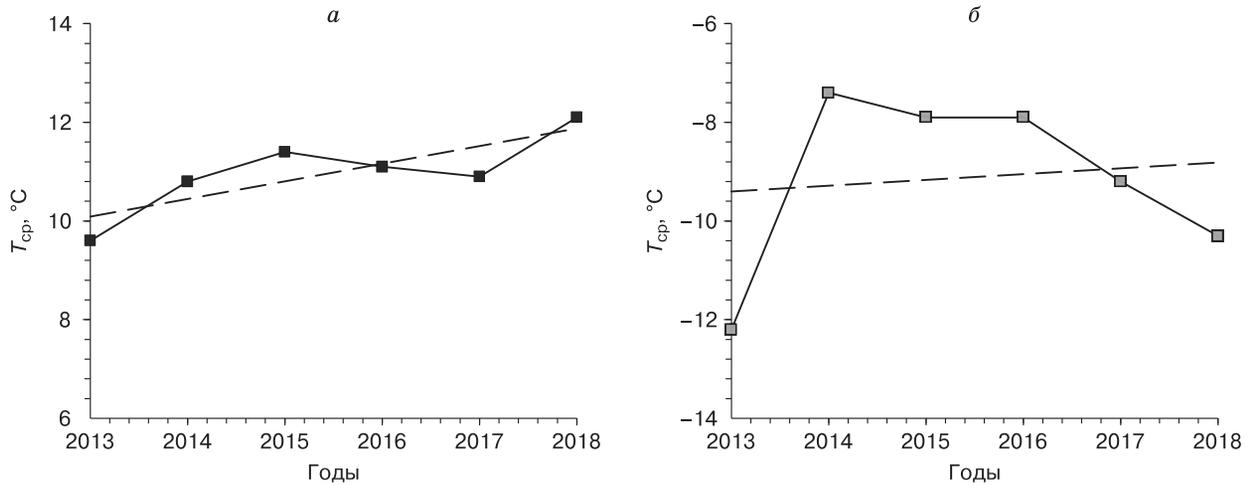


Рис. 3. Среднесезонная температура воздуха ($T_{ср}$) и линейный тренд в теплый (а) и холодный (б) периоды на участке исследования.

-0.1 °C [Светлаков, 2018]. С начала наблюдений температура кровли мерзлоты оставалась стабильно отрицательной в течение года, но с 2015 г. отмечен переход в сторону положительных значений в годовом цикле теплооборотов, т. е. кровля мерзлоты опустилась и мощность сезонноталого слоя увеличилась.

Температура пород приповерхностного слоя на участке исследования в 2013–2018 гг. также претерпевала изменения. Так, на глубине 0.1 м среднегодовая температура варьирует в пределах 2.9–4.4 °C. В течение года температура пород на глубине 0.1 м колеблется в диапазоне от -21.3 до 24.4 °C. В период мониторинга высокие показатели температуры в годовом цикле и смещение в сторону положительного градиента указывают на дополнительное отопление пород на поверхности.

В 2018 г. амплитуда колебаний температуры пород приповерхностного слоя в годовом цикле теплооборотов на участке развития ММП (скв. Olh-13-1) составила 29.9 °C (от -11.2 до 18.7 °C, на глубине 0.1 м) при амплитуде колебаний температуры воздуха 53.9 °C (от -31.1 до 22.8 °C). На талом участке (скв. Olh-13-2) амплитуда колебаний температуры пород была 44.0 °C (от -20.0 до 24.0 °C, на глубине 0.1 м). Амплитуда среднемесячных температур на глубине 0.1 м для участка ММП находилась в пределах от -10.2 до 16.2 °C, для талого участка – от -14.8 до 20.4 °C (рис. 4).

Значительный диапазон расхождения температуры пород в пределах приповерхностного слоя на мерзлых и талых участках указывает на высокий показатель термического сопротивления

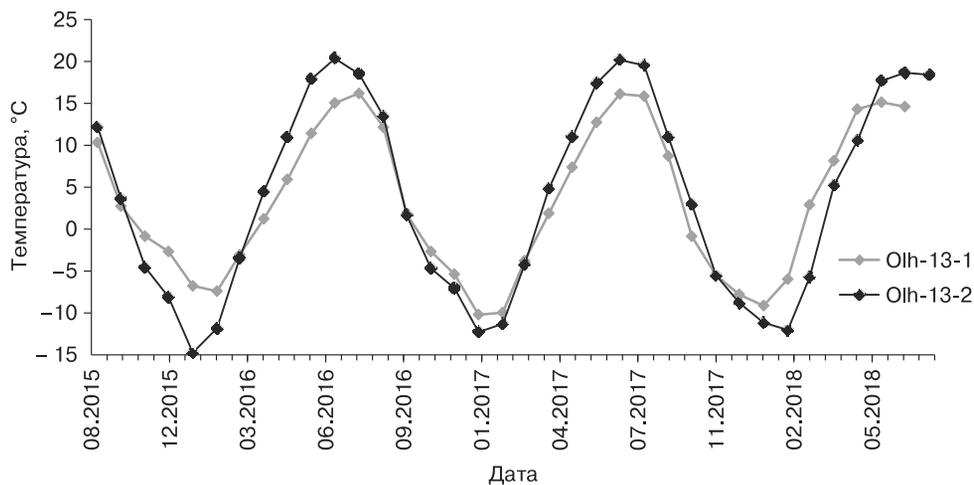


Рис. 4. Среднемесячная температура в мерзлых (скв. Olh-13-1) и талых (скв. Olh-13-2) породах на глубине 0.1 м.

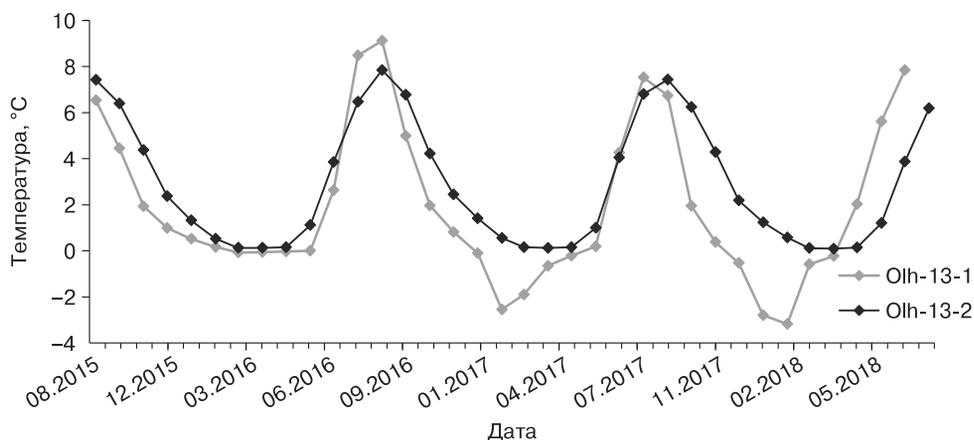


Рис. 5. Среднемесячная температура в мерзлых (скв. Olh-13-1) и талых (скв. Olh-13-2) породах на глубине 2.0 м.

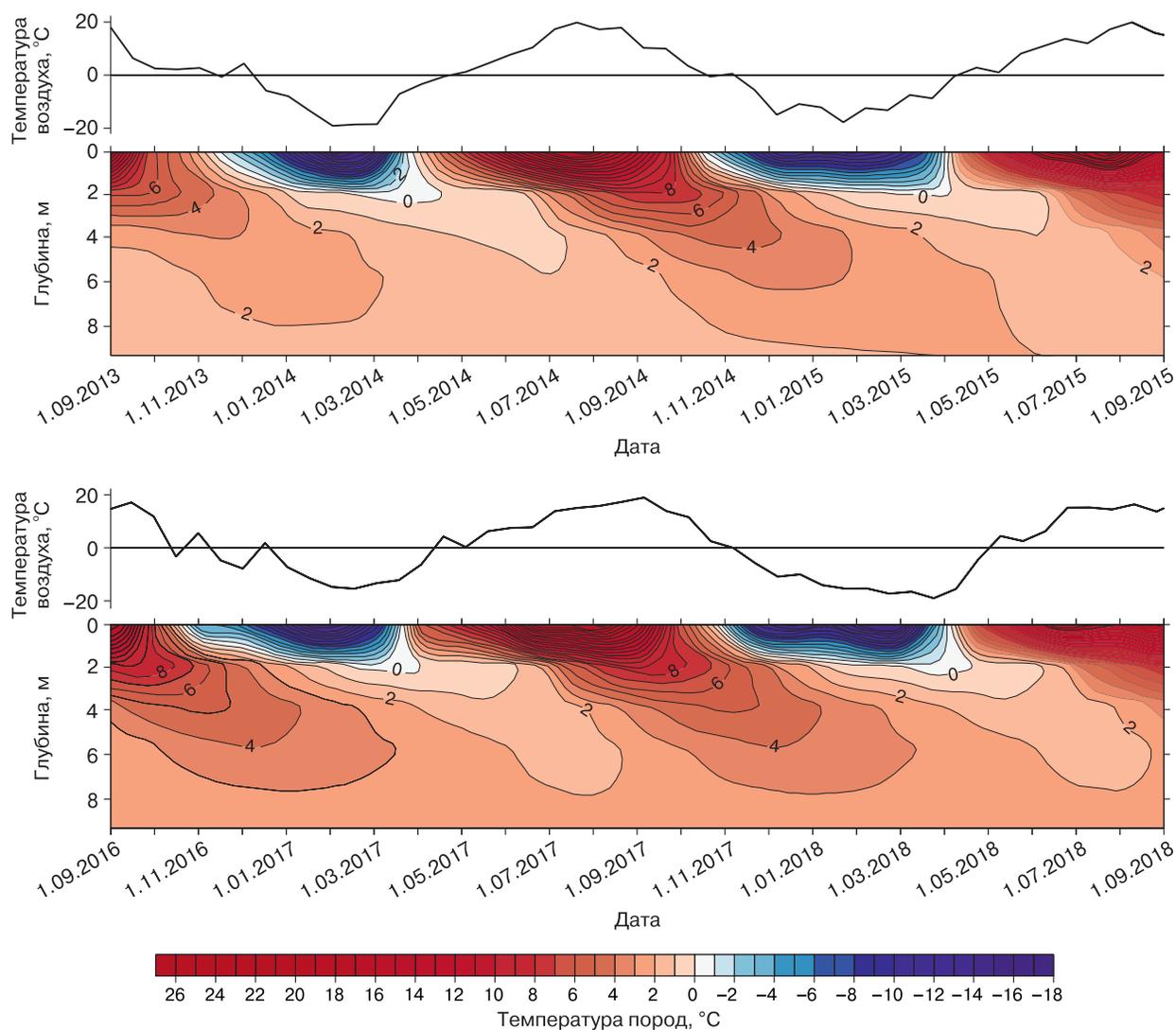


Рис. 6. Термоизоплеты пород по скв. Olh-13-3.

ММП (т. е. на прогрев данного участка затрачивается больше энергии), а также на большую восприимчивость талых грунтов к изменению температуры воздуха. Дополнительное влияние оказывают влажность и растительный покров, который плотнее на участке развития ММП и лучше защищает в летнее и зимнее время. Промерзание сезонноталого слоя в массиве с ММП протекает более интенсивно и, как следствие, более резкий переход через 0°C .

Амплитуда колебаний в годовом цикле теплооборотов на глубине 2.0 м в пределах сезонноталого слоя (скв. Olh-13-1) составляет 13.8°C (от -4.3 до 9.5°C). Как отмечено выше, многолетнемерзлые породы были вскрыты на глубине 1.9 м, но так как бурение осуществлялось в августе, то глубина протаивания увеличилась, на это указывает отрицательная температура, которая устанавливается только в январе (рис. 5).

В области талых пород (скв. Olh-13-3) температура на глубине 2.0 м опускается до 0°C , но ниже отметки 2.0 м остается положительной, определяя подошву сезонномерзлого слоя на данной глубине. Амплитуда колебаний температуры

в годовом цикле на этой глубине составляет 7.9°C (от 0.1 до 8.0°C).

Среднегодовая температура пород в пределах сезонномерзлого и сезонноталого слоев степного Прибайкалья увеличивалась в течение всего периода исследований. Так, в скв. Olh-13-3 на глубине 2.0 м температура грунтов в сезонномерзлом слое выросла с 2.6 до 3.0°C . Температура ниже слоя сезонного промерзания также повысилась: на глубине 9.3 м среднегодовая температура в 2013 г. была 1.8°C , а 2018 г. составила 2.4°C (рис. 6).

Среднегодовая температура пород сезонноталого слоя (скв. Olh-13-1) на глубине 2.0 м изменялась в пределах 2.0 – 2.1°C , что выше данных, опубликованных ранее [Лещиков, 1978]. Среднегодовые значения температуры пород на глубине 3.5 м за период наблюдений также повысились с -0.1 до 0.7°C (скв. Olh-12-1), что указывает на увеличение глубины сезонного протаивания с 2.5 – 3.0 м до фиксируемой отметки 3.5 м и глубже в области редкоостровного распространения ММП на участках степных ландшафтов (рис. 7).

В пределах степного участка геокриологические исследования проводились в 1984 г. Первич-

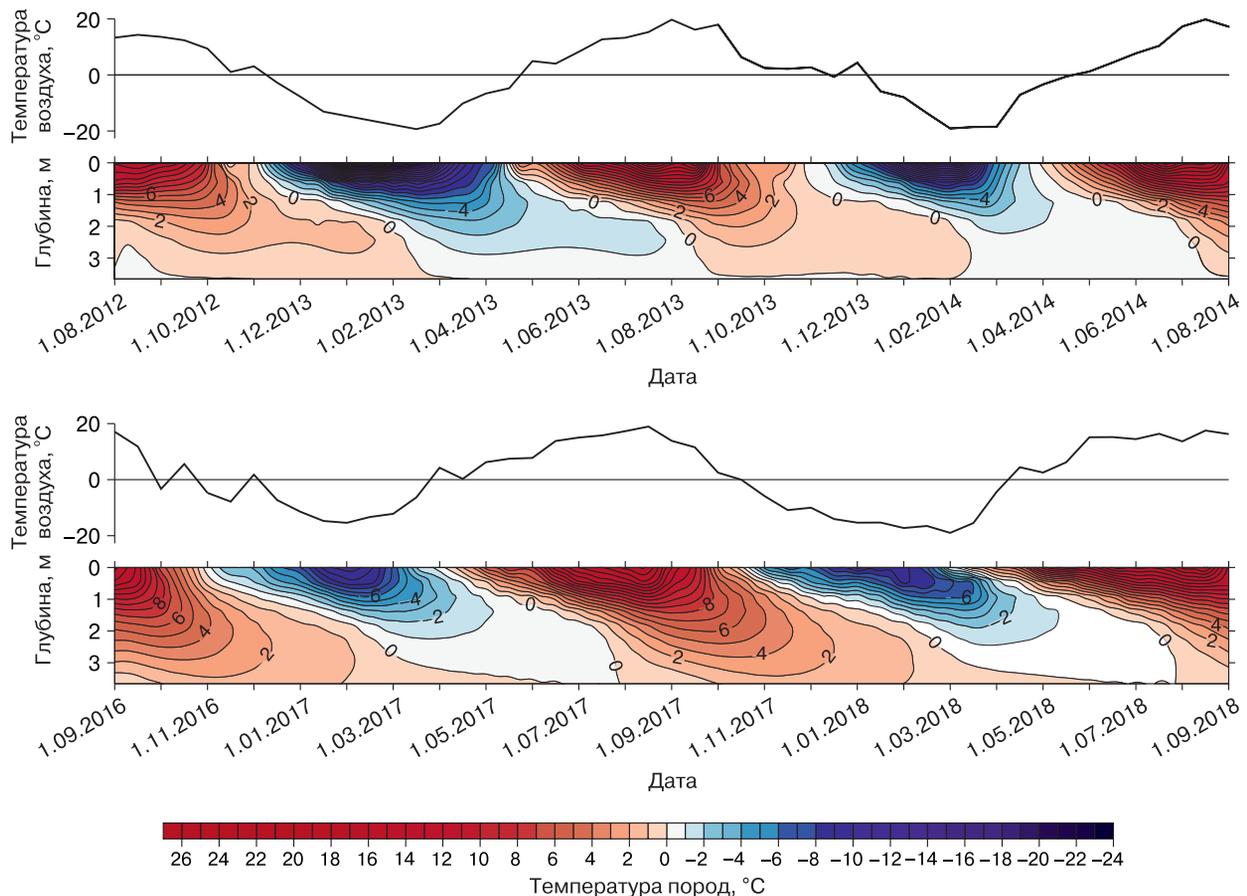


Рис. 7. Термоизоплеты мерзлых пород по скв. Olh-12-1.

ные наблюдения показали, что среднегодовая температура мерзлых пород варьировала от -0.1 до -0.2 °С при суммарной весовой влажности 30–40 %, а кровля ММП находилась на глубине 2.0–2.5 м [Лешиков и др., 1984]. За период исследования 2013–2018 гг. общий тренд среднегодовой температуры пород близок к тренду температуры воздуха в регионе, с этим связаны основные современные изменения температурного режима пород.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В условиях современного тренда температуры воздуха меняется термический режим многолетнемерзлых пород. Изменение температуры пород в значительной степени связано с повышением температуры атмосферного воздуха, а влияние второстепенных факторов (атмосферные осадки, растительный покров, влажность) привело к дополнительному отоплению пород и локальному оттаиванию многолетнемерзлых пород.

Для о. Ольхон характерно недостаточное атмосферное увлажнение. В среднем за год выпадает от 197 до 278 мм осадков, а годовой коэффициент увлажнения равен 0.34. Большая часть осадков приходится на три летних месяца. В зимний период месячное количество осадков не превышает 5 мм, а толщина снежного покрова не превышает 10–15 см [Иметхенов и др., 1997; Пеллинен, 2018], что недостаточно для увлажнения приповерхностного слоя. Влажность на участке с тальми глинистыми породами (скв. Olh-13-2, Olh-13-3) составляет 4.5 и 6.3 % в верхней части разреза до глубины 1 м и увеличивается до 29.2 и 27.0 % на глубинах до 4 м. Растительность на поверхности не формирует плотного покрова, поэтому прогрев в летний период приповерхностного слоя пород происходит интенсивно.

Влажность глинистых пород в пределах распространения ММП (скв. Olh-12-1, Olh-13-1) изменялась в пределах от 23.4 до 30.7 %, что сопоставимо с данными, приведенными выше [Лешиков и др., 1984]. Повышенная влажность создает более благоприятные условия для формирования устойчивого растительного покрова, с чем связано различие амплитуд колебаний температуры приповерхностного слоя в годовом цикле теплооборотов на участке с мерзлыми и тальми породами (см. рис. 4). В холодный период до установления отрицательных температур на поверхности количество атмосферных осадков уменьшается и происходит миграция воды в сторону кровли многолетнемерзлых пород. Промерзание пород осуществляется при низких показателях влажности на поверхности. Аномально большие для глинистых грунтов величины сезонного протаивания в скв. Olh-12-1 объясняются, по-видимому, относительно низкой влажностью пород на начальных этапах протаивания. Показатель влажности при-

поверхностного слоя способствует большему прогреву и протаиванию пород, а с учетом постоянно возрастающей температуры в летний период происходит изменение термодинамического режима пород как сезонноталого слоя, так и залегающих ниже ММП. По всему разрезу в период исследования среднегодовые значения температуры имеют положительный тренд, что связано с изменением температуры атмосферного воздуха и незначительными осадками, а также с низкими показателями влажности пород.

Сезонное промерзание на участках с тальми породами происходит интенсивно, а из-за высоких показателей температуры воздуха в зимний период глубина промерзания пород не достигает 2 м. Оттаивание сезонноталого слоя в пределах степного участка происходит без задержек, снежный покров незначительный, растительный покров скуден и слабо защищает поверхность от прогрева. В совокупности с незначительной влажностью теплопроводность пород увеличивается, и промерзший зимой грунтовый массив оттаивает быстро еще в мае и практически до ноября только прогревается, оставаясь в талом состоянии (см. рис. 6).

Температура ММП в пределах сезонноталого слоя в период наблюдений с 2012 по 2018 г. имеет положительно направленный тренд. На начальном этапе исследования (скв. Olh-12-1) в 2012 г. температура многолетнемерзлых пород на глубине 3.5 м была отрицательной и стабильной в цикле годовых теплооборотов в диапазоне от 0 до -0.1 °С (немного выше, чем в работе [Лешиков и др., 1984]). В 2015 г. отмечен переход от отрицательных значений к положительным: максимальная температура составила 1.3 °С. В 2017–2018 гг. максимальная температура на глубине 3.5 м достигла 1.7 °С.

Изменение температурного режима ММП также связано с общим повышением температуры атмосферного воздуха и отсутствием атмосферных осадков. Влажность пород на участках распространения мерзлых пород выше, но из-за смещения влаги к кровле подстилаемых многолетнемерзлых пород промерзание происходит без значительных задержек и на полную мощность глубины протаивания. Среднегодовая температура в массиве изменяется от -0.3 до 1.3 °С, поэтому оттаявший в летний период сезонноталый слой полностью промерзает зимой. В условиях постоянно повышающейся температуры как в теплый период, так и в холодный, глубина протаивания достигает 3.5 м. При сохранении общего тренда температуры, недостаточного атмосферного увлажнения и изменения влажности пород на участках распространения ММП будут формироваться таликовые участки, которые приведут к деградации многолетнемерзлых пород в пределах степных ландшафтов на о. Ольхон.

Многолетнемерзлые породы на территории о. Ольхон испытывают наибольшую нагрузку в результате изменения климатических условий по сравнению с другими районами Прибайкалья. Поэтому стационар Ольхон Института земной коры СО РАН рекомендуется поддерживать и развивать как один из опорных пунктов наблюдения за естественным состоянием криолитозоны на ее южных границах.

ВЫВОДЫ

Многолетнемерзлые породы на границе южной геокриологической зоны испытывают существенные преобразования под воздействием меняющегося климата. На территории участка исследований в пределах степного района о. Ольхон температура атмосферного воздуха имела положительный тренд и с 2013 по 2018 г. выросла с -1.2 до 1.7 °С. Основной рост температуры атмосферного воздуха приходится на летний период, за счет чего прогрев поверхности происходит интенсивнее.

Температура талых пород демонстрирует рост среднегодовых значений по всему массиву и влияет на промерзание пород, которое на данном участке не превышает 2 м. Температура на участке ММП также показывает положительный рост, что способствует деградации высокотемпературных мерзлых пород в области их редкоостровного распространения. Глубина протаивания опустилась ниже 3.5 м, а среднегодовая температура повысилась до 1.7 °С.

Значительное влияние на формирование температурного режима пород о. Ольхон оказывает миграция влаги. Влажность на участках талых пород приповерхностного слоя составляет 4.5 и 6.3 %, что ускоряет промерзание, а фазовый переход происходит без задержек. На участках развития ММП влажность пород выше и изменяется от 23.4 до 30.7 %, но за счет миграции влаги к кровле ММП и положительного тренда температуры воздуха протаивание достигает максимальных значений и способствует формированию таликовых участков.

Благодарности. Авторы выражают благодарность кандидатам геол.-мин. наук А.А. Рыбченко и В.А. Пеллину, а также коллективу лаборатории Инженерной геологии и геоэкологии за существенную помощь в проведении полевых работ.

Работа выполнена в рамках исследований по государственному заданию по темам АААА-А19-119021190077-6 (ИГЭРАН). Работа поддержана грантом № 075-15-2020-787 в форме субсидий крупных научных проектов Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования

экологической обстановки Байкальской природной территории»).

Литература

- Балобаев В.Т.** Особенности геотермических процессов в районах с многолетнемерзлыми породами // Геокриологические исследования. Якутск, Кн. изд-во, 1971, с. 9–17.
- Иметхенов А.Б.** Ольхон – край родной / А.Б. Иметхенов, Э.З. Долгонова, П.Н. Елбаскин. Улан-Удэ, Изд-во Бурят. ун-та, 1997, 352 с.
- Лещиков Ф.Н.** Мерзлые породы Приангарья и Прибайкалья. Новосибирск, Наука, 1978, 145 с.
- Лещиков Ф.Н., Спесивцев В.И., Мирошниченко А.П.** Оползневые деформации на берегах острова Ольхон // Береговые процессы в криолитозоне. Новосибирск, Наука, 1984, с. 71–77.
- Лут Б.Ф.** Геоморфология Прибайкалья и впадины озера Байкал. Новосибирск, Наука, 1978, 213 с.
- Малкова Г.В., Павлов А.В., Скачков Ю.Б.** Оценка устойчивости мерзлых толщ при современных изменениях климата // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 4, с. 33–36.
- Общее мерзлотоведение (геокриология)** / Под ред. В.А. Кудрявцева. М., Изд-во Моск. ун-та, 1978, 464 с.
- Павлов А.В.** Тренды современных изменений температуры почвы на севере России // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 3, с. 22–27.
- Пальшин Г.Б.** Инженерная геология Прибайкалья. М., Наука, 1968, 194 с.
- Пеллинен В.А.** Оценка устойчивости геологической среды острова Ольхон: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 2018, 136 с.
- Светлаков А.А.** Особенности температурного режима грунтов в условиях южной геокриологической зоны Восточной Сибири: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 2018, 153 с.
- Хименков А.Н., Сергеев Д.О., Власов А.Н. и др.** Криогенные и посткриогенные образования на острове Ольхон // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 4, с. 54–63.
- Grosse G., Romanovsky V., Jorgenson T. et al.** Vulnerability and feedbacks of permafrost to climate change // Eos, Transactions Amer. Geophys. Union, 2011, vol. 92, No. 9, p. 73–74.
- URL:** <http://gis.ncdc.noaa.gov/map> (дата обращения: 20.10.2018).
- URL:** <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=30637> (дата обращения: 07.05.2018).

References

- Balobaev V.T. Peculiarities of geothermal processes in regions with permafrost rocks. In: Geocryological Research. Yakutsk, Knizhnoe izd-vo, 1971, p. 9–17 (in Russian).
- Imetkhenov A.B., Dolkhonova E.Z., Elbaskin P.N. Olkhon – krai rodnoi [Olkhon is a Native Land]. Ulan-Ude, Buryat State University, 1997, 352 p. (in Russian).
- Leshchikov F.N. Merzlye porodu Priangariya i Pribaikaliya [Frozen Rocks of the Angara Region and the Baikal Region]. Novosibirsk, Nauka, 1978, 145 p. (in Russian).
- Leshchikov F.N., Spesivtsev V.I., Miroshnichenko A.P. Landslide deformations on the shores of Olkhon Island. In: Beregovye protsessy v kriolitozone [Coastal Processes in Permafrost]. Novosibirsk, Nauka, 1984, p. 71–77 (in Russian).
- Lut B.F. Geomorfologiya Pribaikaliya i vpadinu ozera Baikal [Geomorphology of the Baikal Region and the Depressions of Lake Baikal]. Novosibirsk, Nauka, 1978, 213 p. (in Russian).

- General Permafrost (Geocryology). V.A. Kudryavtseva (Ed.). Moscow, Izd-vo MGU, 1978, 464 p. (in Russian).
- Malkova G.V., Pavlov A.V., Skachkov Yu.B. Assessment of permafrost stability under contemporary climatic changes. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2011, vol. XV, No. 4, p. 33–36 (in Russian).
- Pavlov A.V. Trends of contemporary changes of soil temperature in northern Russia. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2008, vol. XII, No. 3, p. 22–27 (in Russian).
- Palshin G.B. Inzhenernaya geologiya Pribaikaliya [Engineering Geology of the Baikal Region]. Moscow, Nauka, 1968, 194 p. (in Russian).
- Pellinen V.A. Assessment of the stability of the geological environment of Olkhon Island: Dissertation of Ph.D. Irkutsk, 2018, 136 p. (in Russian).
- Svetlakov A.A. Features of the temperature regime of soils in the conditions of the southern geocryological zone of Eastern Siberia: Dissertation of Ph.D. Irkutsk, 2018, 153 p. (in Russian).
- Khimenkov A.N., Sergeev D.O., Vlasov A.N. et al. Modern and paleo-cryogenic formations on Olkhon island. Earth's Cryosphere, 2015, vol. XIX, No. 4, p. 48–57.
- Grosse G., Romanovsky V., Jorgenson T. et al. Vulnerability and feedbacks of permafrost to climate change. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2011, vol. 92, No. 9, p. 73–74.
URL: <http://gis.ncdc.noaa.gov/map> (last visited: 20.10.2018).
URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=30637> (last visited: 07.05.2018).

*Поступила в редакцию 30 июля 2020 г.,
после доработки – 4 мая 2021 г.,
принята к публикации 18 июня 2021 г.*