

УДК 630.111:551.587:551.588.6:551345.2

АНАЛИЗ ПРИЧИН ПРОДОЛЖАЮЩЕГОСЯ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ ПОД ХВОЙНЫМИ ЛЕСАМИ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

© 2022 г. С. А. Гулый^а, *, Ю. Б. Скачков^б, М. С. Рожина^б

^аСеверо-Восточная научно-исследовательская мерзлотная станция Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук (СВНИМС ИМЗ СО РАН), ул. Портовая, д. 16, Магадан, 685000 Россия

^бФедеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук (ИМЗ С РАН), ул. Мерзлотная, д. 36, Якутск, 677013 Россия

*E-mail: svnims@mail.ru

Поступила в редакцию 24.01.2020 г.

После доработки 14.09.2020 г.

Принята к публикации 02.02.2022 г.

На основании данных сайта Global Terrestrial Network for Permafrost – Database (GTN-P) сделан анализ изменения температуры мерзлых грунтов за период наблюдений от 3 до 35 лет на глубинах годовых теплооборотов от 14 до 30 м для растительных покровов, соответствующих классификации, принятой на сайте GTN-P: “тундры”, “лесной тундры”, “кустарниковой тундры”, “травяного покрова”, “без растительности”, “хвойного леса”, “лиственного леса”. Анализ полученных данных показал, что из всех рассмотренных точек наблюдений в среднем у 72% точек происходит положительная динамика изменения температуры грунтов. Остальные имеют отрицательную (21%) или нулевую динамику (7%). Анализ по каждому виду растительности показал, что растительность “тундры”, “лесной тундры”, “кустарниковой тундры”, а также мест, где “нет растительности”, имеет примерно одинаковое процентное отношение точек, в которых происходит рост температуры грунтов – 72–82%. Для “хвойных лесов” оно равно 57%. Для скважин, расположенных в местах, где растительность представлена “травяным покровом” ни в одной из наблюдаемых точек не была зафиксирована отрицательная динамика изменения температур. Для точек, в которых “нет растительности” и в “кустарниковой тундре” отрицательная динамика изменения температур (вместе с нулевой динамикой) составляет соответственно 18% и 20%. Для “тундры” этот показатель повышается до 26%, для “лесной тундры” – до 28%. Под хвойными деревьями в районе 43% наблюдаемых точек потепление климата пока не может преодолеть существующую тепловую защиту и вызвать деградацию многолетнемерзлых грунтов. Анализ месторасположения точек наблюдений в северном полушарии при положительной, отрицательной (вместе с нулевой) динамикой изменения температуры в грунте для “хвойных лесов” показал, что для “хвойных лесов” широтная зональность на динамику изменения температуры в грунте не влияет.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, GTN-P, температура в скважинах, хвойные деревья.

DOI: 10.31857/S0024114822040039

В 1992 г. была принята Рамочная конвенция ООН по изменению климата (РКИК), в которой декларировалась озабоченность мирового сообщества потеплением климата. За последние 30 лет собрано достаточно данных как подтверждающих потепление климата в целом на Земле, так и доказывающих повышение температуры атмосферного воздуха и грунта в конкретных местах (Гаврилова, 2008; Дроздов и др., 2010; Решетько и др., 2016; Donglin Guo et al., 2017; Tonghua Wu et al., 2018). Однако нужно признать, что это происходит не повсеместно. Существуют территории, где температуры грунта как в деятельном слое, так и

на глубине годовых теплооборотов не меняются и даже продолжают снижаться (Дроздов и др., 2010; Скачков и др., 2011; Малкова и др., 2011; Скачков, 2013; Шац и др., 2016; Варламов и др., 2017; Fedorov et al., 2019).

Известно, что одним из факторов, который влияет на формирование многолетних пород, является растительность. Влияние растительности на температурный режим мерзлых грунтов было отмечено в исследованиях начала XX в. специалистами, занимающимися непосредственно растительностью и почвами и грунтами, в частности многолетнемерзлыми. Были получены результаты о

том, что при прочих равных условиях под любым растительным покровом температура почвы летом ниже, а глубина протаивания меньше, чем на участках, где растительность отсутствует. Зимой растительность замедляет охлаждение почвы. Исследованиями, приводимыми в настоящее время установлено, что при нынешнем потеплении климата существует обратная связь, усиливающая рост лесов и, следовательно, предотвращающая таяние многолетнемерзлой толщи (Fedorov et al., 2019). При этом мерзлые толщи и растительные покровы развиваются параллельно, реагируя на взаимные изменения (Скрябин и др., 1998; Николаев и др., 2004; Кнорре и др. 2009).

Первое упоминание о возможности формирования многолетней мерзлоты под сомкнутым еловым лесом было сделано в 1911 г. (Безайс, 1911). Он полагал, что обнаруженная им мерзлота сформировалась недавно и после гибели деревьев вновь создадутся условия для лучшего прогрева почвы и последующего исчезновения мерзлого слоя. А.П. Тыртиков (Тыртиков, 1969) в своей работе приводит данные результатов наблюдений за глубиной протаивания, температурой почвы и мощностью многолетнемерзлой толщи, в том числе в пойме р. Селемджи (левый приток р. Зeya в Амурской области) в пихтовом лесу с сомкнутостью крон 0.8–0.9 и тополевым лесу с сомкнутостью крон 0.7. Им было установлено, что в тополевым лесу с пихтой во II ярусе к концу августа 1955 г. сезонно-мерзлый слой протаял полностью, ниже мерзлота отсутствовала. В пихтовом лесу без мохового покрова на песчаной почве к этому же сроку глубина протаивания составила 1.5 м в мерзлых грунтах, где их мощность оценивалась не менее 2.8 м. В это же время в пихтовом лесу с покрытием из сфагновых мхов грунт протаял только на 0.65 м. А.П. Тыртиков сделал вывод о том, что формирование сомкнутого полога из темнохвойных пород (ель, пихта, сосна сибирская кедровая), а также накопление подстилки, состоящей в основном из опада хвои мощностью 3–5 см, изменяют условия прогревания почвы. После того как прогревание ее замедляется сезоннопромерзающие слои почвы летом полностью не протаивают, затем формируются перелетки, а впоследствии грунты переходят в мерзлое состояние, которое сохраняется два года и более.

Именно сильное затенение поверхности почвы темнохвойными породами деревьев, по мнению А.П. Тыртикова, являлось основной причиной, способствовавшей формированию многолетнемерзлых толщ на месте ранее немерзлых аллювиальных отложений. Та же закономерность была отмечена им в еловых лесах Енисейского кряжа и Алданского плоскогорья. В то же время в березовых, смешанных, лиственных, редкостойных заболоченных лесах возможность формирования перелетков и мерзлоты возникала

только при наличии торфянисто-мохового слоя на поверхности почвы.

Исследованиями сотрудников ИМЗ СО РАН (Скрябин и др., 1998) установлено, что в зависимости от типа леса и сомкнутости крон древесный покров может способствовать понижению температуры поверхности грунтов в среднем за теплый сезон на 2–3°C (в редкостойном сосновом лесу) или на 4°C (в сомкнутом лиственничнике) по сравнению с открытым участком. Формирование новообразований мерзлых перелетков и многолетних пород было отмечено не только в естественной природной среде. Например, в случае значительных (более 2 лет) перерывов при строительстве зданий на территориях, где среднегодовая температура была ниже 0°C под возведенным, но не сданным в эксплуатацию зданием, формировались зоны мерзлых грунтов (Гулый, Власов, 2019).

В работе Фишера и др. (Fisher et al., 2016) описывается, что экспериментальное удаление кустарникового или карликового кустарника и осокового покрова в тундре значительно увеличивает мощность деятельного слоя. В бореальных лесах листья кроны деревьев выполняют ту же роль затенения, что и подлесок, при этом вечнозеленые кроны также задерживают снег на ветвях, уменьшая снежный покров на земле. Это улавливание может увеличить теплопотери от земли зимой и таким образом защитить многолетнемерзлую толщу.

А.Н. Федоров и др. (Fedorov et al., 2019) отмечают, что нетронутые старовозрастные лиственные леса с их устойчивым защитным слоем и сукцессионными стадиями восстановления леса после нарушения способствуют устойчивости ландшафтов в зоне распространения многолетнемерзлых пород, не вызывая значительного повышения температуры почвы и мощности деятельного слоя. Сукцессии лиственничников при современном потеплении климата оказывают достаточное сопротивление, способствующее повышению температуры многолетнемерзлых пород.

Исходя из вышесказанного, можно предположить, что именно леса, в частности хвойные, могут оставаться теми территориями, где, несмотря на повсеместное повышение температуры атмосферного воздуха, продолжают сохраняться многолетнемерзлые породы.

Цель исследований – выявить влияние различного вида растительности на температурное состояние мерзлых грунтов в криолитозоне в современный период времени.

Для решения поставленной задачи была использована база данных сайта Global Terrestrial Network for Permafrost – Database (GTN-P) (<http://gtnpdatabase.org>), где собрана информация о температуре мерзлых и талых грунтов на раз-

личных глубинах по всему миру (Douglas et al., 2008; Biskaborn et al., 2015).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

На основании имеющихся данных на сайте Global Terrestrial Network for Permafrost – Database (GTN-P) (<http://gtnpdatabase.org>) о температуре мерзлых грунтов на глубинах годовых теплооборотов (от 14 до 30 м) был сделан отбор скважин по следующим критериям:

- 1) данные о результатах измерений должны быть на сайте в открытом доступе;
- 2) температура в скважинах на выбранных глубинах должна быть отрицательная;
- 3) замеры температуры должны быть выполнены примерно в одно и то же время в период с конца августа по конец сентября;
- 4) абсолютная высота, на которой располагались скважины, не должна превышать 2000 м;
- 5) растительность (обозначение растительного покрова соответствует классификации, принятой на сайте GTN-P): “тундра”, “лесная тундра”, “кустарниковая тундра”, “травяной покров”, “без растительности” на поверхности или с растительностью в виде “хвойного леса” или “лиственного леса”;
- 6) период наблюдений должен быть не менее 3 лет.

Вычисление статистической характеристики выборки сделано как для всех единиц наблюдений, так и для каждого вида рассматриваемого вида растительности при количественной изменчивости признака, соответствующего положительной или отрицательной динамике изменения температуры грунта в скважине за период наблюдений. При систематизации данных принято, что температура 0°C будет соответствовать данным с отрицательной температурой. Выбровка данных выполнена на основании проверки гипотезы о принадлежности “сомнительных” вариантов к совокупности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из 1380 зарегистрированных в настоящее время на сайте GTN-P скважин выбранным критериям соответствовало 54. Так как в некоторых скважинах было более одной точки наблюдения на разных глубинах, то всего для анализа было получено 102 точки. Из этого количества точек к типу растительный покров “тундра” относилось 35 точек, “хвойные леса” – 28, “лесная тундра” – 18, “поверхность без растительности” – 11, “кустарниковая тундра” – 5, “поверхность с травяным покровом” – 5. Точек с растительным покровом “лиственные леса” для выбранных критериев найдено не было. Наибольшее число точек на-

блюдения располагались в диапазоне глубин 14–19 м – 54 точки, 20–24 м – 30 точек, 25–30 м – 18 точек. Период наблюдений более 35 лет был отмечен только в двух точках. Наибольшее количество точек (49) имело период наблюдений 4–9 лет, 3 г. – 23 точки, 10–24 г. – 16 точек, 25–34 г. – 12 точек. Территориально выбранные скважины находятся в России, США, Канаде, Швейцарии, Норвегии, Исландии. Все скважины расположены в зоне распространения многолетнемерзлых пород. Месторасположение скважин в России и на Аляске, выбранное для анализа, показано на рис. 1. Данные о глубинах, на которых выполнялись измерения, а также температуры на начальный и конечный момент времени в точках, принятых для анализа, относящиеся к каждому из рассматриваемых видов растительности, представлены в табл. 1–6.

Так как сбор данных выполнялся по определенным критериям, то распределение в группы по виду растительного покрова определялось только наличием или отсутствием этих данных на сайте, то есть случайным образом. Количественных признаков в нашем случае всего два – это положительная или отрицательная динамика изменения температуры за период наблюдений. В настоящих исследованиях не ставится задача выяснить причины, почему в одних местах температура в скважинах поднимается, в других опускается, а в третьих остается неизменной. Здесь сделана попытка выяснить, в какой степени различный растительный покров может оказать влияние на динамику изменения температуры в скважине.

Из диаграммы распределения всех наблюдательных точек по динамике изменения температуры грунтов (рис. 2) за период наблюдений (положительной, отрицательной, нулевой) можно видеть, что в среднем 72% точек соответствует положительная динамика. Остальные имеют отрицательную (21%) или нулевую динамику (7%).

Далее рассмотрим, как отдельный тип выбранной растительности влияет на динамику изменения температуры грунтов в скважинах. Результаты распределения количественной изменчивости признака, соответствующего положительной, отрицательной и нулевой динамике изменения температуры грунта в скважинах за период наблюдений для различных видов растительности показаны на рис. 3.

Из диаграмм видно, что растительность “тундры”, “лесной тундры”, “кустарниковой тундры”, а также мест, где “нет растительности”, имеет примерно одинаковое процентное отношение точек, в которых происходит рост температуры грунтов – 72–82%. То же самое соотношение для “хвойных лесов” равно 57%. Таким образом, почти на половине (43%) территорий, где произрастают хвойные леса, не происходит повышение

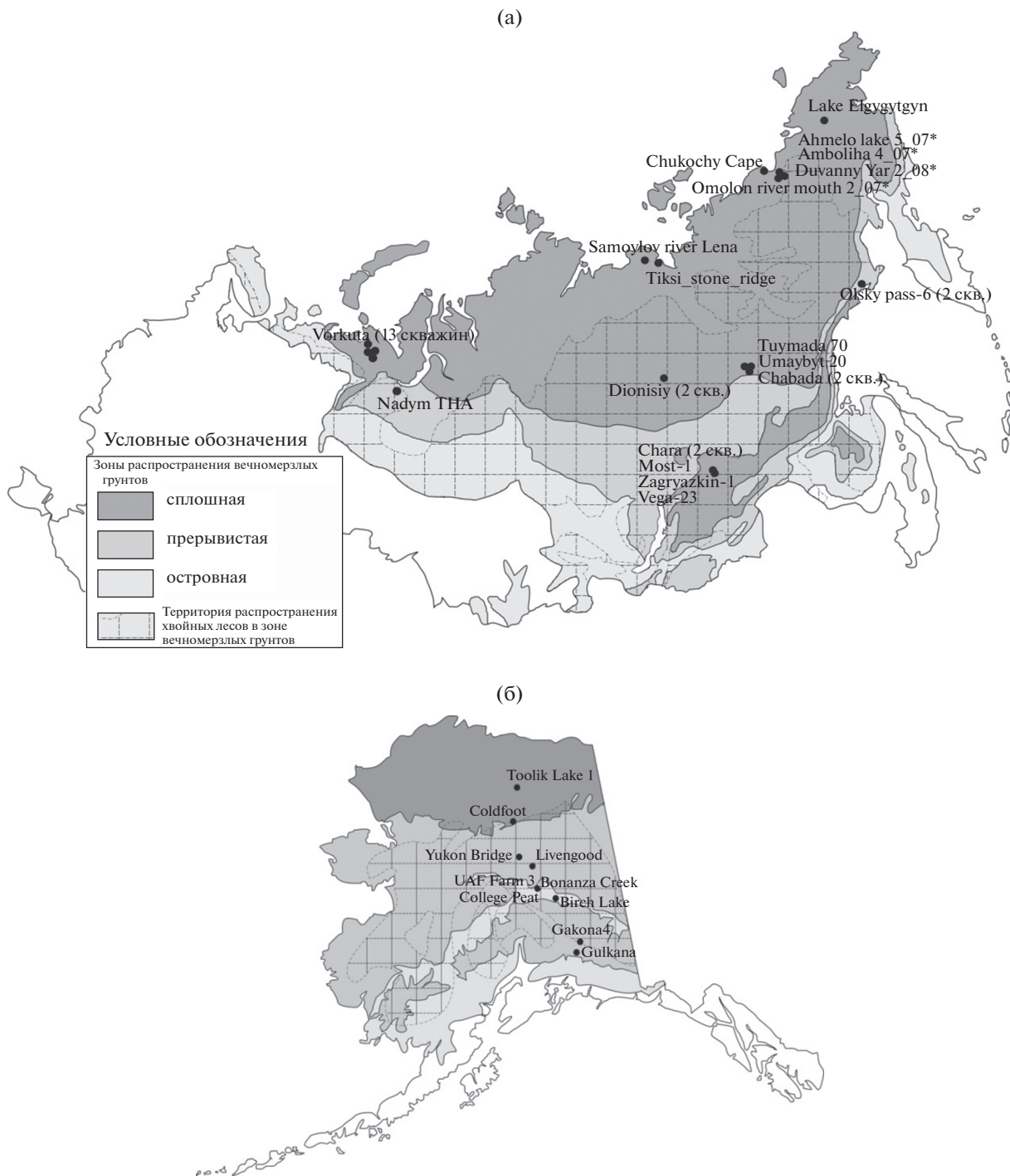


Рис. 1. Месторасположение скважин на территории России (а) и Аляски (б), выбранных по заданным критериям для анализа.

температуры грунтов. Для скважин, расположенных в местах, в которых растительность представлена “травяным покровом” (табл. 5), ни в одной из наблюдаемых точек не была зафиксирована отрицательная динамика изменения температур. Для точек, где “нет растительности”, и в “кустарниковой тундре” отрицательная динамика изме-

нения температур (вместе с нулевой динамикой) составляет соответственно 18% и 20%. Для “тундры” этот показатель повышается до 26%, для “лесной тундры” – до 28%.

Имеющиеся данные о местонахождении рассматриваемых точек позволяют сделать оценку влияния географической широты, на которой

Таблица 1. Данные о глубинах, на которых выполнялись измерения, а также температуры на начальный и конечный момент времени в точках, принятых для анализа для типа растительного покрова “тундра”

| №№ п/п | Название скважины (страна) | Глубина замера, м | Годы наблюдений | | Период наблюдений, лет | Температура, °С | | Изменение ΔT за 10 лет (°С*10) |
|-----------|---------------------------------|----------------------|-----------------|-----------|------------------------------|-----------------|-----------|---|
| | | | начало | окончание | | начало | окончание | |
| 1 | Vorkuta Ya1 (Russia) | 15 | 2007 | 2012 | 5 | -0.25 | -0.23 | 0.04 |
| | | 22 | 2007 | 2012 | 5 | -0.25 | -0.28 | -0.06 |
| 2 | Samoylov rive Lena (Russia) | 15.75 | 2006 | 2018 | 12 | -9.09 | -6.78 | 1.93 |
| | | 20.75 | 2006 | 2018 | 12 | -9.06 | -7.36 | 1.42 |
| | | 26.75 | 2006 | 2018 | 12 | -8.99 | -7.82 | 0.98 |
| 3 | Endalen PYRN (Svalbard) | 15 | 2008 | 2020 | 12 | -3.26 | -2.52 | 0.62 |
| | | 19 | 2008 | 2020 | 12 | -3.41 | -2.52 | 0.74 |
| 4 | Vorkuta R-71 (Russia) | 15.6 | 2008 | 2010 | 2 | -1.93 | -1.81 | 0.60 |
| 5 | Dionisiy-22 (Russia) | 20 | 1987 | 2012 | 25 | -4.5 | -4.1 | 0.16 |
| 6 | Dionisiy-111(2) (Russia) | 20 | 1987 | 2012 | 25 | -5.6 | -3.7 | 0.76 |
| 7 | Amboliha 4_07* (Russia) | 14 | 2007 | 2011 | 4 | -5.85 | -5.67 | 0.45 |
| | | 21 | 2007 | 2011 | 4 | -5.7 | -5.64 | 0.15 |
| 8 | Chara 6 (Russia) | 15 | 2006 | 2009 | 3 | -5.17 | -5.01 | 0.53 |
| | | 20 | 2006 | 2009 | 3 | -5.16 | -5.14 | 0.07 |
| 9 | Pangnirtung (Canada) | 15 | 2008 | 2013 | 5 | -5.19 | -4.72 | 0.94 |
| 10 | Igloolik (Canada) | 15 | 2008 | 2011 | 3 | -8.65 | -8.14 | 1.70 |
| 11 | Vorkuta 35 (Russia) | 15.4 | 2007 | 2009 | 2 | -1.76 | -1.54 | 1.10 |
| 12 | Vorkuta 100 (Russia) | 14.2 | 2007 | 2009 | 2 | -2.83 | -2.68 | 0.75 |
| 13 | Lake Elgygytgyn (Russia) | 15 | 2009 | 2011 | 2 | -5.59 | -5.63 | -0.20 |
| | | 20 | 2009 | 2011 | 2 | -5.93 | -6.02 | -0.45 |
| | | 30 | 2009 | 2011 | 2 | -6.42 | -6.44 | -0.10 |
| 14 | Chukochoy Cape (Russia) | 15 | 2007 | 2012 | 5 | -10.05 | -9.24 | 1.62 |
| | | 25 | 2007 | 2012 | 5 | -10.23 | -9.71 | 1.04 |
| 15 | Tiksi_stone_ridge (Russia) | 20 | 1992 | 2016 | 24 | -10.58 | -9.82 | 0.32 |
| | | 30 | 1992 | 2016 | 24 | -11.05 | -10.11 | 0.39 |
| 16 | Vorkuta DS-3/VII-74 (Russia) | 15 | 2007 | 2012 | 5 | -0.53 | -0.45 | 0.16 |
| | | 23 | 2007 | 2012 | 5 | -0.52 | -0.52 | 0.00 |
| 17 | Vorkuta ZS-115 (Russia) | 15 | 2007 | 2012 | 5 | -0.07 | -0.12 | -0.10 |
| 18 | Vorkuta ZS-117 (Russia) | 15 | 2007 | 2012 | 5 | -0.09 | -0.12 | -0.06 |
| | | 25 | 2007 | 2012 | 5 | -0.2 | -0.14 | 0.12 |
| 19 | Vorkuta ZS-124 (Russia) | 15 | 2007 | 2012 | 5 | -1.3 | -1.16 | 0.28 |
| | | 24 | 2007 | 2011 | 4 | -1.38 | -1.27 | 0.28 |
| 20 | Vorkuta ZS-25 (Russia) | 15 | 2009 | 2011 | 2 | -1.1 | -1.1 | 0.00 |
| | | 20 | 2009 | 2011 | 2 | -0.958 | -0.929 | 0.15 |
| | | 30 | 2009 | 2011 | 2 | -0.73 | -0.85 | -0.60 |

Таблица 2. Данные о глубинах, на которых выполнялись измерения, а также температуры на начальный и конечный момент времени в точках, принятых для анализа для типа растительного покрова “хвойные леса”

| №№ п/п | Название скважины (страна) | Глубина замера, м | Годы наблюдений | | Период наблюдений, лет | Температура, °С | | Изменение ΔT за 10 лет (°С*10) |
|-----------|--------------------------------------|----------------------|-----------------|-----------|------------------------------|-----------------|-----------|---|
| | | | начало | окончание | | начало | окончание | |
| 1 | Gakona4 (USA) | 15 | 2008 | 2012 | 4 | -0.8 | -0.8 | 0.00 |
| | | 19 | 2008 | 2015 | 7 | -0.79 | -0.79 | 0.00 |
| 2 | Chabada 5-81 (Russia) | 20 | 1981 | 2017 | 36 | -0.8 | -0.6 | 0.06 |
| 3 | Yukon Bridge (USA) | 15 | 2005 | 2012 | 7 | -2.37 | -1.23 | 1.63 |
| | | 20 | 2005 | 2012 | 7 | -2.38 | -1.3 | 1.54 |
| 4 | Bonanza Creek (USA) | 14 | 2009 | 2012 | 3 | -1.3 | -1.54 | -0.80 |
| | | 20 | 1994 | 2011 | 17 | -1.3 | -1.43 | -0.08 |
| 5 | College Peat (USA) | 15 | 2005 | 2012 | 7 | -2.56 | -2.81 | -0.36 |
| | | 20 | 1983 | 2011 | 28 | -2.6 | -2.56 | 0.01 |
| 6 | GL#1 (USA) | 15 | 2010 | 2012 | 2 | -0.34 | -0.33 | 0.05 |
| | | 20 | 2010 | 2012 | 2 | -0.27 | -0.26 | 0.05 |
| 7 | GL#2 (USA) | 15 | 2009 | 2012 | 3 | -0.41 | -0.4 | 0.03 |
| | | 20 | 2009 | 2015 | 6 | -0.39 | -0.38 | 0.02 |
| 8 | Livengood (USA) | 16 | 2005 | 2010 | 5 | -0.58 | -0.78 | -0.40 |
| | | 26 | 2005 | 2011 | 6 | -0.56 | -0.74 | -0.30 |
| 9 | Chabada 8-82 (Russia) | 15 | 1983 | 2015 | 32 | -2.4 | -2.9 | -0.16 |
| | | 20 | 1983 | 2017 | 34 | -2.2 | -2.7 | -0.15 |
| | | 30 | 1983 | 2017 | 34 | -1.9 | -2.2 | -0.09 |
| 10 | Birch Lake (USA) | 15 | 2007 | 2012 | 5 | -1.42 | -1.67 | -0.50 |
| | | 20 | 1986 | 2012 | 26 | -1.7 | -1.45 | 0.10 |
| 11 | Vega-23 (Russia) | 20 | 1990 | 2013 | 23 | -1.3 | -1.1 | 0.09 |
| | | 30 | 1990 | 2013 | 23 | -0.5 | -0.37 | 0.06 |
| | | 14 | 2013 | 2019 | 6 | -1.67 | -2.04 | -0.62 |
| 12 | Umaybyt 20 (Russia) | 20 | 1982 | 2019 | 37 | -2.9 | -2.56 | 0.09 |
| 13 | Omolon river mouth 2_07* (Russia) | 15 | 2007 | 2011 | 4 | -4.32 | -3.67 | 1.63 |
| | | 25 | 2007 | 2011 | 4 | -4.44 | -4.2 | 0.60 |
| 14 | Olsky pass-6 (Russia) | 14.5 | 1990 | 2019 | 29 | -0.56 | 0.09 | 0.22 |
| | | 20 | 1990 | 2019 | 29 | -0.48 | -0.21 | 0.09 |

Таблица 3. Данные о глубинах, на которых выполнялись измерения, а также температуры на начальный и конечный момент времени в точках, принятых для анализа для типа растительного покрова “отсутствие растительности”

| №№ п/п | Название скважины (страна) | Глубина замера, м | Годы наблюдений | | Период наблюдений, лет | Температура, °С | | Изменение ΔT за 10 лет (°С*10) |
|-----------|-------------------------------------|----------------------|-----------------|-----------|------------------------------|-----------------|-----------|---|
| | | | начало | окончание | | начало | окончание | |
| 1 | LAP_0198 (Switzerland) | 16 | 2009 | 2018 | 9 | -0.09 | -0.06 | 0.03 |
| | | 19.6 | 2009 | 2018 | 9 | -0.02 | -0.04 | -0.02 |
| 2 | Kapp Linne 1 (Norway) | 15 | 2009 | 2014 | 5 | -3.23 | -2.81 | 0.84 |
| | | 20 | 2009 | 2014 | 5 | -3.21 | -2.84 | 0.74 |
| 3 | Kapp Linne 2 (Norway) | 15 | 2008 | 2014 | 6 | -3.17 | -2.85 | 0.53 |
| | | 20 | 2008 | 2014 | 6 | -3.29 | -2.97 | 0.53 |
| | | 30 | 2008 | 2017 | 9 | -3.5 | -3.1 | 0.44 |
| 4 | Saudafell near Snæfell (Iceland) | 15 | 2004 | 2011 | 7 | -0.55 | -0.53 | 0.03 |
| | | 20 | 2004 | 2011 | 7 | -0.53 | -0.53 | 0.00 |
| 5 | Olsky Pass-9 (Russia) | 14.5 | 1990 | 2019 | 29 | -2.08 | -1.27 | 0.28 |
| | | 20 | 1990 | 2019 | 29 | -1.88 | -1.4 | 0.17 |

Таблица 4. Данные о глубинах, на которых выполнялись измерения, а также температуры на начальный и конечный момент времени в точках, принятых для анализа для типа растительного покрова “лесная тундра”

| №№ п/п | Название скважины (страна) | Глубина замера, м | Годы наблюдений | | Период наблюдений, лет | Температура, °С | | Изменение ΔT за 10 лет (°С*10) |
|-----------|-------------------------------|----------------------|-----------------|-----------|------------------------------|-----------------|-----------|---|
| | | | начало | окончание | | начало | окончание | |
| 1 | Zagryazkin-1 (Russia) | 15 | 2012 | 2019 | 7 | -4.44 | -4.11 | 0.47 |
| | | 19 | 2015 | 2019 | 4 | -4.09 | -3.96 | 0.33 |
| 2 | Ahmelo lake 5_07* (Russia) | 16 | 2007 | 2010 | 3 | -2.88 | -2.89 | -0.03 |
| 3 | Chara 38 (Russia) | 15 | 1988 | 2009 | 21 | -6.6 | -5.35 | 0.60 |
| | | 19 | 1988 | 2009 | 21 | -6.2 | -5.14 | 0.50 |
| 4 | Gulkana (USA) | 16 | 2009 | 2012 | 3 | -0.73 | -0.73 | 0.00 |
| | | 20 | 2009 | 2012 | 3 | -0.701 | -0.678 | 0.08 |
| | | 30 | 2009 | 2012 | 3 | -0.567 | -0.515 | 0.17 |
| 5 | Coldfoot (USA) | 22 | 2006 | 2012 | 6 | -1.03 | -0.87 | 0.27 |
| | | 31 | 2006 | 2012 | 6 | -1.22 | -1.11 | 0.18 |
| 6 | Most-1 (Russia) | 14.1 | 1990 | 2012 | 22 | -5.2 | -5.5 | -0.14 |
| | | 19.8 | 1990 | 2011 | 21 | -5.5 | -5.34 | 0.08 |
| 7 | Duvanny Yar 2_08* (Russia) | 15 | 2009 | 2011 | 2 | -5.85 | -5.73 | 0.60 |
| | | 25 | 2009 | 2011 | 2 | -6.14 | -6.07 | 0.35 |
| 8 | Vorkuta_SH-15 (Russia) | 14.5 | 2007 | 2010 | 3 | -1.38 | -1.13 | 0.83 |
| | | 29 | 2007 | 2010 | 3 | -1.44 | -1.28 | 0.53 |
| 9 | Nadym THA (Russia) | 15 | 2008 | 2011 | 3 | -0.4 | -0.4 | 0.00 |
| | | 30 | 2008 | 2011 | 3 | -0.26 | -0.26 | 0.00 |

Таблица 5. Данные о глубинах, на которых выполнялись измерения, а также температуры на начальный и конечный момент времени в точках, принятых для анализа для типа растительного покрова “травяной покров”

| №№ п/п | Название скважины (страна) | Глубина замера, м | Годы наблюдений | | Период наблюдений, лет | Температура, °С | | Изменение ΔT за 10 лет (°С*10) |
|-----------|-------------------------------|----------------------|-----------------|-----------|------------------------------|-----------------|-----------|---|
| | | | начало | окончание | | начало | окончание | |
| 1 | Toolik Lake 1 (USA) | 15 | 2007 | 2011 | 4 | -2.7 | -2.4 | 0.75 |
| 2 | Tuymada 70 (Russia) | 15 | 1995 | 2019 | 24 | -2 | -1.6 | 0.17 |
| | | 30 | 2008 | 2019 | 11 | -2.2 | -2.1 | 0.09 |
| 3 | UAF Farm 3 (USA) | 15 | 2006 | 2012 | 6 | -0.13 | -0.12 | 0.02 |
| | | 17.5 | 2005 | 2012 | 7 | -0.15 | -0.14 | 0.01 |

Таблица 6. Данные о глубинах, на которых выполнялись измерения, а также температуры на начальный и конечный момент времени в точках, принятых для анализа для типа растительного покрова “кустарниковая тундра”

| №№ п/п | Название скважины (страна) | Глубина замера, м | Годы наблюдений | | Период наблюдений, лет | Температура, °С | | Изменение ΔT за 10 лет (°С*10) |
|-----------|-------------------------------|----------------------|-----------------|-----------|------------------------------|-----------------|-----------|---|
| | | | начало | окончание | | начало | окончание | |
| 1 | Vorkuta ZS-83a' (Russia) | 15 | 2007 | 2012 | 5 | -0.11 | -0.13 | -0.04 |
| | | 28 | 2007 | 2012 | 5 | -0.11 | -0.06 | 0.10 |
| 2 | Vorkuta 8C (Russia) | 19 | 2007 | 2012 | 5 | -0.06 | -0.004 | 0.11 |
| 3 | Vorkuta UP-35 (Russia) | 20 | 2010 | 2013 | 3 | -0.845 | -0.816 | 0.10 |
| | | 30 | 2010 | 2013 | 3 | -0.788 | -0.76 | 0.09 |

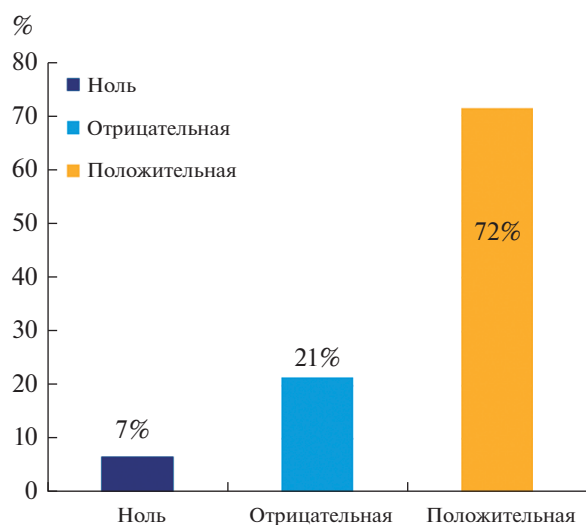


Рис. 2. Средний процент распределения наблюдательных точек по динамике изменения температуры грунтов за период наблюдений.

расположены точки, на динамику изменения температуры в грунте. Такой анализ выполнен для “хвойных лесов”. К группе А были отнесены точки с положительной динамикой изменения температуры в грунте, к группе Б – с отрицательной и нулевой.

Из данных группы А (56.9; 56.9; 59.6; 59.6; 61.4; 61.9; 64.3; 64.9; 64.9; 64.9; 64.9; 64.9; 65.9; 65.9; 68.7; 68.7) имеются крайние значения (56.9 и 68.7), которые принадлежат к “сомнительным” по отношению к общей совокупности значений. Проверим гипотезу об их принадлежности к совокупности.

Рассчитаем фактические значения критерия τ и сравним их с теоретическими:

$$\text{для } X_1\tau = \frac{X_2 - X_1}{X_{n-1} - X_1} = \frac{59.6 - 56.9}{65.9 - 56.9} = 0.3,$$

$$\text{для } X_n\tau = \frac{X_n - X_{n-1}}{X_n - X_2} = \frac{68.7 - 65.98}{68.7 - 56.9} = 0.235.$$

Полученные значения τ при $n = 16$ для X_1 и X_n меньше теоретических значений $\tau_{05} = 0.369$ и $\tau_{01} = 0.472$. Оба варианта находятся в пределах возможных случайных колебаний и оснований для браковки крайних значений для группы А нет.

Для группы Б (59.6; 61.9; 61.9; 61.9; 62.4; 62.4; 64.3; 64.7; 64.7; 64.9; 65.5; 65.5) крайним значением, которое может относиться к сомнительным,

является значение, равное 59.6. Проверим гипотезу об его принадлежности к совокупности.

Рассчитаем фактические значения критерия τ и сравним его с теоретическими:

$$\text{для } X_1\tau = \frac{X_2 - X_1}{X_{n-1} - X_1} = \frac{61.9 - 59.6}{65.5 - 59.6} = 0.389.$$

Полученное значение τ при $n = 12$ для X_1 меньше теоретических значений $\tau_{05} = 0.428$ и $\tau_{01} = 0.541$. Проверенное значение находится в пределах возможных случайных колебаний и может быть использовано для вычисления среднего значения для группы Б.

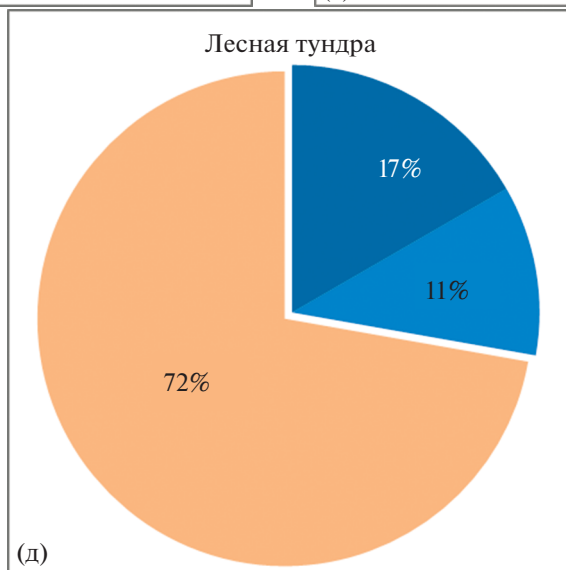
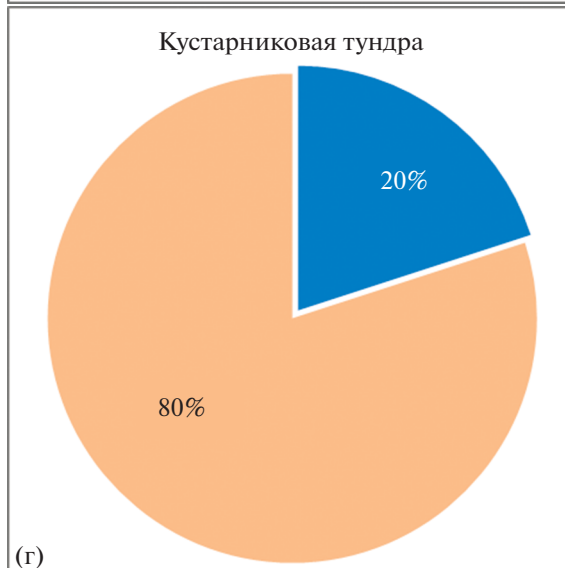
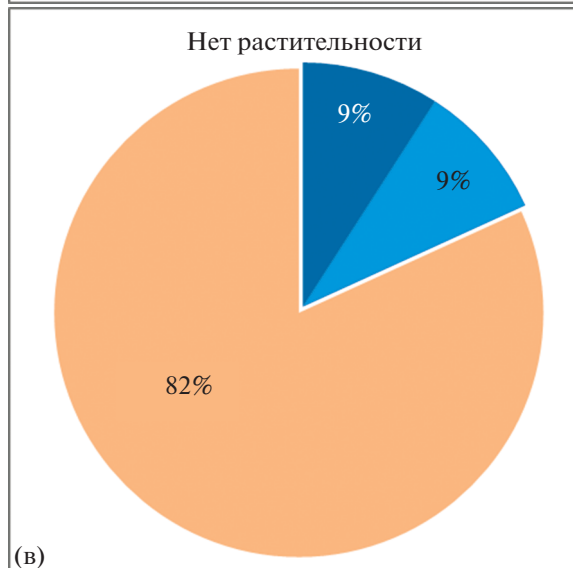
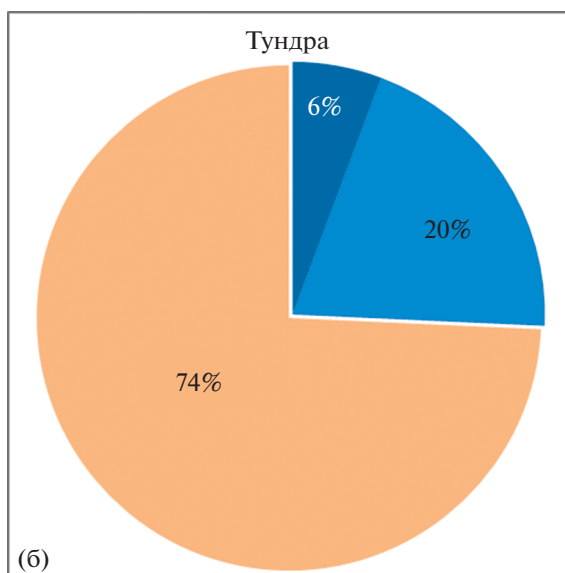
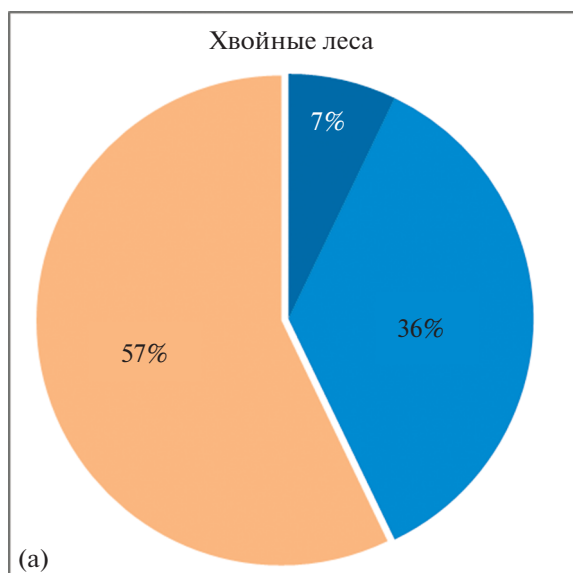
Полученные результаты анализа месторасположения точек наблюдений, расположенных в северном полушарии при положительной, отрицательной (вместе с нулевой) динамика изменения температуры в грунте для растительности “хвойный лес” показали, что для “хвойных лесов” широтная зональность на динамику изменения температуры в грунте не влияет.

Однозначно ответить, какой из известных факторов (снежный покров, затененность, задымленность, хвойный опад и торф, влажность грунтов, скорость ветра) сдерживает рост температуры грунтов в 43% из рассмотренных нами скважинах на глубинах от 15 м до 30 м в хвойных лесах, пока не представляется возможным. Для этого требуются специальные исследования.

К сожалению, до последнего времени, кроме температуры грунтов в скважинах на разных глубинах, мы не собирали дополнительных данных о температуре воздуха и поверхности, высоте снежного покрова. Однако для одной скважины у нас имеются все необходимые данные. Расположена эта точка наблюдения (скважина 1М) в районе точки Olsky Pass-6 (Russia) около г. Магадана. В начале периода наблюдений в 2007 г. основным видом растительности на этой территории были кедровый стланик (60–180 см), лиственница (2–6 м), немногочисленные кустарники ольховника и березы (рис. 4а). Из-за этого при регистрации скважины на сайте GTN-P она была отнесена к “хвойным деревьям”. Однако через 10 лет на этой территории растительность в виде ольховника и березы стала преобладающей (рис. 4б).

Как изменялись температуры грунта на разных глубинах в этой скважине за период наблюдений? Если вести обработку данных по методике разовых замеров, выполняемых в сентябре каждого года, что было применено в настоящей работе при анализе данных GTN-P, то тренд температур

Рис. 3. Процент распределения количественной изменчивости признака, соответствующего положительной, отрицательной и нулевой динамике изменения температуры грунта в скважине за период наблюдений для различных видов растительности: (а) “хвойного леса”, (б) “тундры”, (в) “нет растительности”, (г) “кустарниковой тундры”, (д) “лесной тундры”.



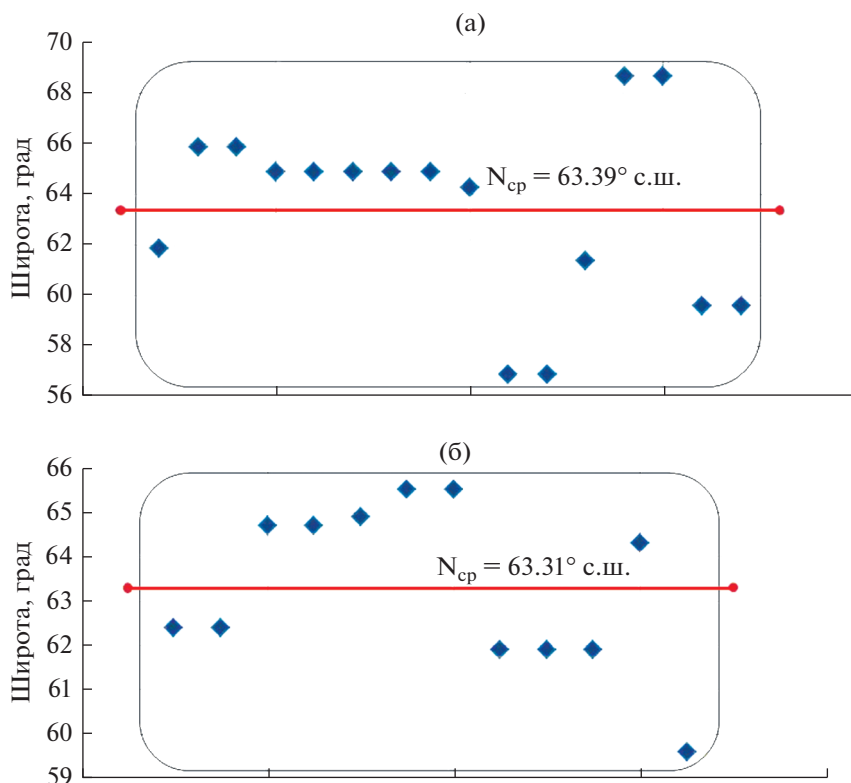


Рис. 4. Распределение точек, обозначающих широту их расположения в северном полушарии, относительно среднего значения широты при положительной динамике изменения температуры в грунте в “хвойных лесах” для группы А (рис. 3а) и отрицательной или нулевой динамике изменения температуры в грунте в “хвойных лесах” для группы Б (рис. 3б).

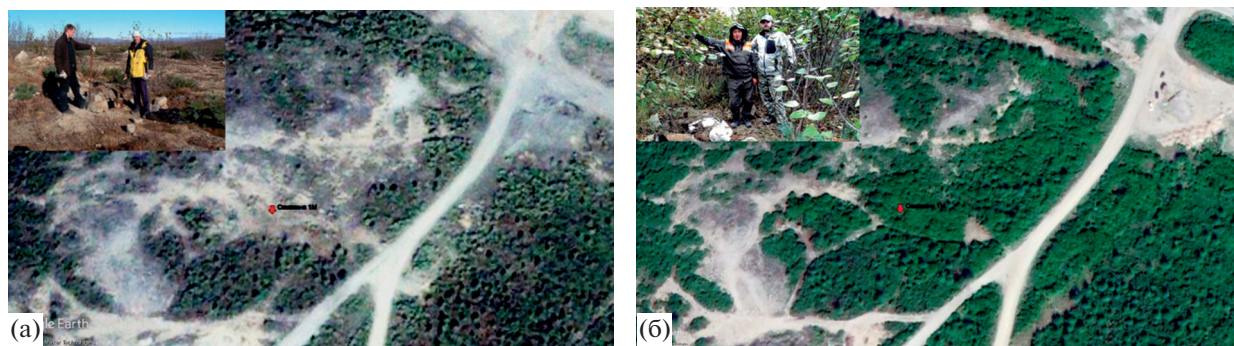


Рис. 5. Растительность около скважины 1М: (а) – 2002–2007 гг. (б) – 2018 г.

грунта с 2007 г. получается положительный. Так, для глубины 10.0 м с 2007 г. по 2019 г. температура выросла с -0.22°C до $+0.6^\circ\text{C}$, для глубины 14.5 м – с -0.38°C до $+0.09^\circ\text{C}$, 20.0 м – с -0.39°C до -0.21°C . Если же анализ температур на разных глубинах делать исходя из данных температур, полученных в результате непрерывных замеров проводимых через каждые 4 часа, то линия тренда приобретает другую форму. На рис. 5 видно, что с 2007 г. по 2013 г. тренд температур на глубинах 3, 7 и 10 м имел положительное значение. Но с 2012 г. для температур, измеряемых на глубине 3 м, по насто-

ящее время он уже стал отрицательным (рис. 5). С 2015 г. та же закономерность была отмечена для температур, измеряемых на глубине 7 м. На глубине 10 м отрицательного тренда вообще не было, но с 2013–2014 гг. и по настоящее время он стал нейтральным. По нашему мнению, именно растительность повлияла на изменение температуры в скважине 1М. Какие еще аргументы имеются в пользу этой гипотезы?

Во-первых, по нашим замерам, выполненным в летнее время в 2020 г., освещенность на поверхности почвы под кустарниками в месте располо-

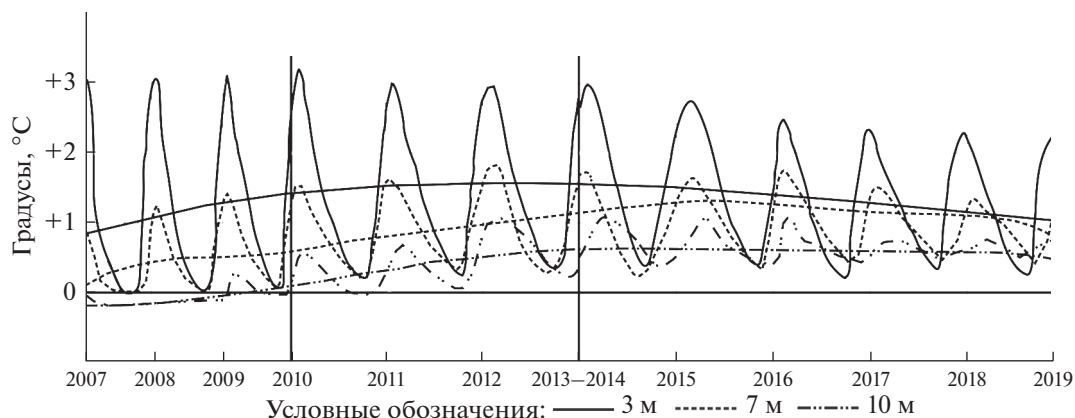


Рис. 6. Результаты наблюдений за температурой грунтов в скважине 1М (в районе точки Olsky Pass-6) на разных глубинах с 2007 г. по 2019 г. С 2007 г. по 2010 г. наблюдения велись через каждые 4 ч, с 2010 г. — через 3 ч. Данные о наблюдениях с сентября 2013 г. по сентябрь 2014 г. отсутствуют из-за выхода из строя наблюдательного прибора. Линия тренда для 3 м представлена полиномиальной линией 3-й степени с двумя экстремумами, для 7 м — 6-й степени с 5 экстремумами, для 10 м — 4-й степени с 3 экстремумами.

жения скважины 1М в десять и более раз меньше по сравнению с открытой поверхностью.

Во-вторых, с 2013 г. нами были начаты наблюдения за температурой атмосферного воздуха над растительностью и температурой на поверхности почвы над скважиной 1 М. Если сравнивать полученную среднегодовую температуру атмосферного воздуха со среднегодовой температурой поверхности грунта, то за период наблюдений с 2013 г. по 2019 г. первая незначительно выросла с -1.4°C до -1.3°C , вторая снизилась с 3.9°C до 3.0°C за тот же период наблюдений. Мы считаем, что причиной этого явился интенсивный рост растительности. Именно увеличившаяся затененность поверхности в летнее время снизила интенсивность поступления тепла на поверхность грунта и явилась основной причиной, изменившей общий тренд наблюдаемых температур грунта на разных глубинах с положительного на отрицательный.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа данных сайта Global Terrestrial Network for Permafrost — Database (GTN-P) установлено, что на глубинах годовых теплооборотов от 14 до 30 м для растительных покровов, соответствующих классификации, принятой на сайте GTN-P: “тундры”, “лесной тундры”, “кустарниковой тундры”, “травяного покрова”, “без растительности”, “хвойного леса”, “лиственного леса” — в среднем у 72% точек происходит положительная динамика изменения температуры грунтов, остальные точки имеют отрицательную (21%) или нулевую динамику (7%). Растительность “тундры”, “лесной тундры”, “кустарниковой тундры”, а также мест, где “нет растительности”, имеет процентное отношение точек, где происходит рост температуры грунтов — 72–82%. Для “хвойных лесов” оно равно 57%. Для

точек, в которых “нет растительности”, и в “кустарниковой тундре” отрицательная динамика изменения температур (вместе с нулевой динамикой) составляет соответственно 18% и 20%. Для “тундры” этот показатель повышается до 26%, для “лесной тундры” — до 28%, для “хвойных деревьев” — до 43%. Полученные результаты свидетельствуют о том, что растительность в виде хвойных деревьев из всех рассмотренных наилучшим образом способна защитить многолетнемерзлые грунты от их деградации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Безайс Э.К. Условия почвообразования на Камчатке // Материалы по изучению русских почв. Вып. 20. СПб., 1911. С. 89–148.
- Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н. Результаты 35-летних мониторинговых исследований криолитозоны на стационаре “Чабыда” (Центральная Якутия) // Наука и образование. 2017. № 2. С. 34–40.
- Гаврилова М.К. Изменение климата (температуры воздуха) на примере Западной Сибири и Якутии // В сб. материалов международных конференций “Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения”. Тюмень, 2008. С. 217–220.
- Гулый С.А., Власов В.П. Особенности проектирования и строительства в условиях островного распространения вечномерзлых грунтов // Наука и техника в Якутии. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2019. № 1(36). С. 10–15.
<https://doi.org/10.24411/1728-516X-2019-10002>
- Дроздов Д.С., Украинцева Н.Г., Царев А.М., Чекрыгина С.Н. Изменения температурного поля мерзлых пород и состояния геосистем на территории Уренгойского месторождения за последние 35 лет (1974–2008) // Криосфера Земли. 2010. Т. 14. № 1. С. 22–31.
- Кнорре А.А., Кирдянов А.В., Прокушкин А.С. Оценка скорости подъема мерзлоты в лиственничниках Центральной Эвенкии методами дендрохронологии // Лесоведение. 2009. № 2. С. 77–80.

- Малкова Г.В., Павлов А.В., Скачков Ю.Б. Оценка устойчивости мерзлых толщ при современных изменениях климата // Криосфера Земли. 2011. Т. 15. № 4. С. 33–36.
- Николаев А.Н., Федоров П.П. Влияние климатических факторов и термического режима мерзлотных почв Центральной Якутии на радиальный прирост лиственницы и сосны // Лесоведение. 2004. № 6. С. 3–13.
- Решетько М.В., Моисеева Ю.А. Климатические особенности и статистические оценки изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на территории севера Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 4. С. 108–118.
- Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н., Варламов С.П. Изменение температуры грунтов слоя годовых теплооборотов на якутском теплосбалансовом стационаре за последние сорок лет: материалы IX Международного симпозиума “Проблемы инженерного мерзлотоустройства”. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2011. С. 445–450.
- Скачков Ю.Б. Роль аномальных зим в межгодовой изменчивости термического режима многолетнемерзлых пород Центральной Якутии // Десятое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу: материалы докладов. Томск, 2013. С. 200–208.
- Скрябин П.Н., Скачков Ю.Б., Варламов С.П. Потепление климата и мониторинг теплового состояния грунтов в Центральной Якутии // Проблемы геоэкологии. Якутск: Изд-во СО РАН, 1998. С. 31–39.
- Тыртиков А.П. Влияние растительного покрова на промерзание и протаивание грунтов. М.: МГУ, 1969. 192 с.
- Шац М.М., Скачков Ю.Б. Климат Севера: потепление или похолодание? // Климат и природа. 2016. № 2(19). С. 27–37.
- Biskaborn B.K., Lanckman J.-P., Lantuit H., Elger K., Streletskiy D.A., Cable W.L., Romanovsky V.E. The new database of the Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P) // Earth System Science Data. 2015. № 7. P. 245–259. <https://doi.org/10.5194/essd-7-245-2015>
- Donglin Guo, Huijun Wang Permafrost degradation and associated ground settlement estimation under 2°C global warming // Climate Dynamics. 2017. № 49. P. 2569–2583. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3469-9>
- Douglas T.A., Jorgenson M.T., Kanevski M.Z. Romanovsky V.E., Shur Y., Yoshikawa K. Permafrost Dynamics at the Fairbanks Permafrost Experimental Station Near Fairbanks, Alaska // Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost. 2008. P. 373–378.
- Fedorov A.N., Konstantinov P.Y., Vasilyev N.F., Shestakova A.A. The influence of boreal forest dynamics on the current state of permafrost in Central Yakutia // Polar Science. 2019. V. 22. P. 100483.
- Fisher J. P., Estop-Aragonés C., Thierry A., Charman D.J., Wolfe S.A., Hartley I.P., Murton J.B., Williams M., Phoenix G.K. The influence of vegetation and soil characteristics on active-layer thickness of permafrost soils in boreal forest // Glob Change Bioljgy. 2016. № 22. P. 3127–3140. <https://doi.org/10.1111/gcb.13248>
- Global Terrestrial Network for Permafrost – Database. URL: <http://gtnpdatabase.org>
- Tonghua Wu, Yanhui Qin, Xiaodong Wu, Ren Li, Defu Zou, Changwei Xie Spatiotemporal changes of freezing/thawing indices and their response to recent climate change on the Qinghai–Tibet Plateau from 1980 to 2013 // Theor Appl Climatol. 2018. № 132. P. 1187–1199. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2157-y>

Analysing the Continuation of Permafrost Forming under the Coniferous Forests during the Global Warming

S. A. Gulyi¹*, Yu. B. Skachkov², and M. S. Rozhina²

¹North-Eastern Permafrost Station of the Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the RAS, Portovaya st. 16, Magadan 685000 Russia

²Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the RAS, Merzlotnaya st. 36, Yakutsk, 677013 Russia

*E-mail: svnims@mail.ru

Based on the data from the Global Terrestrial Network for Permafrost – Database (GTN-P) website, an analysis was made of the temperature change in permafrost soils over a period of observation from 3 to 35 years at depths of annual thermal cycles, from 14 to 30 m, for vegetation covers corresponding to the classification adopted on the GTN-P website: “tundra”, “forest tundra”, “shrub tundra”, “grass cover”, “no vegetation”, “coniferous forest”, “deciduous forest”. The analysis of the data obtained showed that out of all the observation plots considered, on average, 72% of the plots had a positive dynamics in the change in soil temperature. The rest have negative (21%) or stable dynamics (7%). An analysis for each type of vegetation showed that the vegetation of the “tundra”, “forest tundra” and “shrub tundra”, as well as the “no vegetation” areas, had approximately the same percentage of plots on which the ground temperature was on the rise – 72–82%. For “coniferous forests” it is equal to 57%. For wells located in places where the vegetation is represented by a “grass cover” in none of the observed points, a negative temperature change dynamics was recorded. For points where there is “no vegetation” and in “shrub tundra”, the negative dynamics of temperature changes (together with stable dynamics) is 18% and 20%, respectively. For the “tundra” this figure rises to 26%, for the “forest tundra” – up to 28%. Under coniferous trees, around 43% of the observed points the global warming was yet unable to overcome the existing insulation and cause degradation to permafrost soils. An observation plots’ location analysis in the northern hemisphere, with positive and negative (coupled with stable) temperature changes dynamics in the “coniferous forests” soils for showed that for those plots the latitudinal zonality does not affect the dynamics of soil temperature changes.

Keywords: permafrost soils, GTN-P, temperature in wells, coniferous trees.

REFERENCES

- Bezais E.K., Usloviya pochvoobrazovaniya na Kamchatke (Conditions of soil formation in Kamchatka), In: *Materialy po izucheniyu russkikh pochv* (Materials on the study of Russian soils), Saint Petersburg, 1911, Vol. 20, pp. 89–148.
- Biskaborn B.K., Lanckman J.-P., Lantuit H., Elger K., Streletskiy D.A., Cable W.L., Romanovsky V.E., The new database of the Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P), *Earth System Science Data*, 2015, No. 7, pp. 245–259.
DOI 10.5194/essd-7-245-2015
- Donglin Guo, Huijun Wang, Permafrost degradation and associated ground settlement estimation under 2°C global warming, *Climate Dynamics*, 2017, No. 49, pp. 2569–2583.
DOI 10.1007/s00382-016-3469-9
- Douglas T.A., Jorgenson M.T., Kanevski M.Z., Romanovsky V.E., Shur Y., Yoshikawa K., Permafrost Dynamics at the Fairbanks Permafrost Experimental Station Near Fairbanks, Alaska, In: *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost*, 2008, pp. 373–378.
- Drozdov D.S., Ukrainitseva N.G., Tsarev A.M., Chekrygina S.N., Izmeneniya temperaturnogo polya merzlykh porod i sostoyaniya geosistem na territorii Urengoijskogo mestorozhdeniya za poslednie 35 let (1974–2008) (Change of permafrost temperature field and geosystem state on the Urengoy oil-gas-field territory during the last 35 years (1974–2008)), *Kriosfera Zemli*, 2010, Vol. 14, No. 1, pp. 22–31.
- Fedorov A.N., Konstantinov P.Y., Vasilyev N.F., Shestakova A.A., The influence of boreal forest dynamics on the current state of permafrost in Central Yakutia, *Polar Science*, 2019, Vol. 22, pp. 100483.
- Fisher J.P., Estop-Aragonés C., Thierry A., Charman D.J., Wolfe S.A., Hartley I.P., Murton J.B., Williams M., Phoenix G.K., The influence of vegetation and soil characteristics on active-layer thickness of permafrost soils in boreal forest, *Glob Change Biology*, 2016, No. 22, pp. 3127–3140.
DOI 10.1111/gcb.13248
- Gavrilova M.K., Izmenenie klimata (temperatury vozdukh) na primere Zapadnoi Sibiri i Yakutii (Climate change (air temperature) on the example of Western Siberia and Yakutia), *Cryogenic resources of polar and alpine regions. State and outlook of engineering geocryology*, Tyumen, V Proc. of International Conf., pp. 217–220.
- Global Terrestrial Network for Permafrost* – Database, available at: <http://gtnpdatabase.org>
- Gulyi S.A., Vlasov V.P., Osobennosti proektirovaniya i stroitel'stva v usloviyakh ostrovnogo rasprostraneniya vechnomerzlykh gruntov (Features of design and construction in the conditions of island distribution of permafrost soils), *Nauka i tekhnika v Yakutii*, 2019, Yakutsk: Izd-vo IMZ SO RAN, No. 1(36), pp. 10–15.
DOI 10.24411/1728-516X-2019-10002
- Knorre A.A., Kirryanov A.V., Prokushkin A.S., Otsenka skorosti pod'ema merzloty v listvennichnikakh Tsentral'noi Evenkii metodami dendrokronologii (Estimation of rate of elevating permafrost table under Larch stands in the Cryolithozone of Central Evenkia by dendrochronological methods), *Lesovedenie*, 2009, No. 2, pp. 77–80.
- Malkova G.V., Pavlov A.V., Skachkov Y.B., Otsenka ustoychivosti merzlykh tolshch pri sovremennykh izmeneniyakh klimata (Assessing the stability of frozen strata under modern climate change), *Kriosfera Zemli*, 2011, Vol. 15, No. 4, pp. 33–36.
- Nikolaev A.N., Fedorov P.P., Vliyanie klimaticheskikh faktorov i termicheskogo rezhima merzlotnykh pochv Tsentral'noi Yakutii na radial'nyi prirost listvennitsy i sosny (The influence of climatic factors and thermal regime of permafrost-affected soils on radial increment of pine and larch trees in Central Yakutia), *Lesovedenie*, 2004, No. 6, pp. 3–13.
- Reshet'ko M.V., Moiseeva Y.A., Klimaticheskie osobennosti i statisticheskie otsenki izmeneniya elementov klimata v raionakh vechnoi merzloty na territorii severa Zapadnoi Sibiri (Climatic features and statistical evaluation of climate change in permafrost regions in the north of Western Siberia), *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*, 2016, Vol. 327, No. 4, pp. 108–118.
- Shats M.M., Skachkov Y.B., Klimat Severa: poteplenie ili pokholodanie? (Climate of the North: warming or cooling?), *Klimat i priroda*, 2016, No. 2(19), pp. 27–37.
- Skachkov Y.B., Rol' anomal'nykh zim v mezhgodovoi izmenchivosti termicheskogo rezhima mnogoletnemerzlykh porod Tsentral'noi Yakutii (The role of anomalous winters in the interannual variability of the thermal regime of permafrost in Central Yakutia), *Desyatoe sibirskoe soveshchaniye po klimato-ekologicheskomu monitoringu* (Tenth Siberian meeting on climate and environmental monitoring), Tomsk, Abstracts of Papers, pp. 200–208.
- Skachkov Y.B., Skryabin P.N., Varlamov S.P., Izmeneniya temperatury gruntov sloya godovykh teplooborotov na yakutskom teplobalansovom stacionare za poslednie sorok let (Changes in soil temperature in the layer of annual heat exchanges at the Yakutsk heat balance station over the past forty years), *Problems of Engineering Permafrost*, Yakutsk: Izd-vo IMZ SO RAN, Proc. the IX International Symposium, pp. 445–450.
- Skryabin P.N., Skachkov Y.B., Varlamov S.P., Poteplenie klimata i monitoring teplovogo sostoyaniya gruntov v Tsentral'noi Yakutii (Climate warming and monitoring of the thermal state of soils in Central Yakutia), In: *Problemy geokriologii* (Challenges of permafrost studies), Yakutsk: Izd-vo SO RAN, 1998, pp. 31–39.
- Tonghua Wu, Yanhui Qin, Xiaodong Wu, Ren Li, Defu Zou, Changwei Xie, Spatiotemporal changes of freezing/thawing indices and their response to recent climate change on the Qinghai–Tibet Plateau from 1980 to 2013, *Theor Appl Climatol*, 2018, No. 132, pp. 1187–1199,
DOI 10.1007/s00704-017-2157-y
- Tyrtikov A.P., Vliyanie rastitel'nogo pokrova na promerzanie i protaivanie gruntov (Influence of vegetation cover on freezing and thawing of soils), Moscow: MGU, 1969, 192 p.
- Varlamov S.P., Skachkov Y.B., Skryabin P.N., Rezul'taty 35-letnikh monitoringovykh issledovaniy kriolitozony na stacionare "Chabyda" (Tsentral'naya Yakutiya) (Results of 35 years of permafrost monitoring at the Chabyda station, Central Yakutia), *Nauka i obrazovanie*, 2017, No. 2, pp. 34–40.