

УДК 551.583:551.345(571.1)

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КЛИМАТА В РАЙОНАХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ НА ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Решетько Маргарита Викторовна¹,
MRechetko@tpu.ru

Моисеева Юлия Александровна¹,
julchiky@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.

Актуальность работы связана с необходимостью оценки изменений климата, влияющих на многолетнюю мерзлоту, в связи с возможным увеличением выбросов парниковых газов и увеличения аварийности на объектах промышленной, в том числе и нефтегазовой, инфраструктуры при таянии многолетнемерзлых пород.

Цель работы: исследование современных изменений характеристик климата, непосредственно влияющих на термическое состояние почвогрунтов в районах распространения многолетней мерзлоты севера Западной Сибири.

Методы исследования. Анализ многолетних изменений метеорологических данных включал в себя проверку нулевых гипотез о случайности и однородности рядов наблюдений и наличия тренда. Проверка на однородность осуществлялась с помощью теста Аббе, на случайность – критерием Питмена, на наличие тренда производилась с помощью критерия инверсий. Вывод о неслучайном изменении или нарушении однородности рядов соответствовал условию, когда расчетная статистика превышала соответствующее критическое значение при уровне значимости 0,05.

Результаты. Рассмотрены особенности климата севера Западной Сибири и его изменчивость в последние годы. Исследованы изменения температуры воздуха и почвогрунтов на глубинах 160 и 320 см, продолжительность прямой солнечной радиации, суммы атмосферных осадков и высоты снежного покрова на основе инструментальных данных за последние 35 лет. В результате статистического анализа установлено сохранение темпов роста температуры воздуха в теплое время года, увеличение температуры почвогрунтов в течение всего года, выявлен зональный характер изменения суммы атмосферных осадков и снежного покрова. Микроклиматические изменения характеристик метеорологических величин могут исказить реальную картину изменения климата.

Ключевые слова:

Север Западной Сибири, многолетнемерзлые породы, изменение климата, статистический анализ, температура почвогрунтов.

Введение

Изменения глобального климата, регистрируемые на всей планете, проявляются по-разному: это и уменьшение размеров ледников в Арктическом регионе [1]; прогнозируемое резкое увеличение годовой амплитуды температуры поверхности моря в Северном Ледовитом океане из-за уменьшения площади морского льда [2]; снижение интенсивности и продолжительности гололедно-изморозевых явлений на территории России [3], а также высокий уровень пространственной и временной неоднородности гидрологических последствий изменения климата для рек Арктического региона [4] и Западной Сибири [5], причем вероятность и масштабы негативного воздействия гидрологических явлений и процессов возрастают с увеличением интенсивности изменений климата и антропогенных воздействий. На большей части территории распространения многолетнемерзлых пород в различные сезоны года отмечается повышение температуры воздуха, вариации характеристик снежного и растительного покрова, увеличение экстремальности климата. Это, несомненно, оказывает влияние на термическое состояние пород, изменяя их прочностные свойства, что может сопровождаться увеличением интенсивности экзогенных процессов и негативными последствиями для инфра-

структуры промышленных и гражданских объектов. Возможен также рост эмиссии метана при таянии многолетнемерзлых пород (ММП) и газовых гидратов донных отложений в Арктике. Таяние вечной мерзлоты может привести к важным обратным связям в климатической системе, например оказать существенное влияние на распределение атмосферного озона [6]. Есть большие неопределенности, связанные с изменением содержания озона и метана из-за таяния вечной мерзлоты. По мнению [7], общепринятые оценки годовой интенсивности арктических потоков метана могут быть заниженными по отношению к реальным потокам.

Современное состояние исследований

Территория широкого распространения мощного слоя многолетнемерзлых пород привлекла внимание ученых [8, 9–25] с середины XX в., с момента освоения северных территорий в связи с разработкой нефтегазовых месторождений, строительства нефтяных и газовых трубопроводов, хотя наблюдения за многолетнемерзлыми грунтами в России проводились еще с 1837 г. (в Якутске). Исследования отклика ММП на изменения климата проводились с помощью геотермических изменений в скважинах [8, 9] и геокриологических исследований по программе циркумполярного монито-

ринга деятельного слоя (Circumpolar Activelayer Monitoring, CALM) [8, 10–12], и статистического анализа временного хода метеорологических характеристик, таких как температура воздуха [8, 17–22, 25] и почвогрунтов на разных глубинах [8, 13, 14, 17–22, 25, 26], высота снежного покрова [8, 15, 16] и влияние изменений температуры воздуха и высоты снежного покрова на изменения температуры почвогрунтов [8, 23–15].

Согласно [8] при сравнении результатов современных наблюдений в скважинах с литературными и архивными данными обнаружен устойчивый тренд повышения температуры многолетнемерзлых пород на подавляющем большинстве точек наблюдения в период с 1980 по 2010 г. В разных регионах температура ММП на глубине нулевых годовых амплитуд повысилась на 0,5–2 °С [9]. Потепление происходило главным образом в 70–90-е гг. В начале XXI в. температура мерзлоты на большей части наблюдаемых регионов оставалась стабильной. Тенденция к повышению температуры многолетнемерзлых пород возобновилась только к 2010 г. [8]. В Западной Сибири в пределах некоторых типов ландшафтов в настоящее время повышение температуры ММП достигло критических значений, что привело к формированию новых несквозных таликов, а также к углублению уже существующих.

По данным геокриологических исследований по программе циркумполярного мониторинга деятельного слоя [10] скорость увеличения мощности сезонно-талого слоя (СТС) на трех площадках Западной Сибири составляет от 0 до 2 см/год. Всего в Западной Сибири восемь площадок, но только три имеют продолжительность наблюдений более 10 лет, включая площадку Надым, наблюдения на которой проводятся с 1971 г. В целом по России тренд величины СТС уменьшается по мере продвижения в восточные районы российской криолитозоны [8].

Результаты анализа [11, 12] показали, что за период с 1975 по 2010 г. наблюдается статистически значимое увеличение толщины активного слоя (глубины сезонного протаивания) многолетнемерзлых пород в различных районах криолитозоны Северного полушария, составившее в среднем около 1 см в год. Глубина протаивания возрастала в зонах распространения многолетней мерзлоты различной степени сплошности независимо от видов растительных покровов, почв и влажности грунтов.

Объект, материалы и методы исследования

Около половины территории Западно-Сибирской низменности занято многолетнемерзлыми породами. Район исследования расположен на севере Западной Сибири, простираясь с севера на юг от 73°50' (о. Диксон) до 62°45' с. ш. (п. г. т. Октябрьское) и с запада на восток от 60°88' (с. Саранпауль) до 88°30' в. д. (г. Норильск). Южная граница распро-

странения многолетнемерзлых пород в центральной и восточной частях равнины проходит между 60° и 61° с. ш., постепенно поднимаясь в северо-западном направлении до 63° с. ш. Мощность ММП возрастает с увеличением абсолютных высот и уменьшается под долинами, нарастание мощности происходит с юга на север (в среднем изменение составляет 400–1100 м) [27]. Температура многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской низменности зависит от географической широты и ряда других местных факторов. С севера на юг отмечено закономерное повышение температуры мерзлых пород на подошве слоя сезонных колебаний температуры (на глубине от 5–6 до 15–20 м) от –7...–10 °С до 0 °С. Довольно резкое повышение температуры мерзлых пород на 1–2 °С наблюдается при переходе от тундры к лесной зоне [28].

Мощность слоя сезонного оттаивания мерзлоты увеличивается с севера на юг и колеблется в зависимости от литологического состава отложения, расчлененности рельефа и высоты над уровнем моря, толщины снежного покрова, температуры воздуха, водонасыщенности и теплопроводности отложений, растительного покрова и пр. [28]. Глубина сезонного протаивания на вечномерзлых грунтах рек Обь, Надым, Пур и Таз – менее 1,0 м и сезонного промерзания на талых грунтах – 1,0–2,5 м. На севере территории глубина сезонного протаивания до 2 м, в центральной и южной частях протаивание на вечномерзлых грунтах 0,5–1 м промерзание до 2 м, в южной более 2 м [28].

Территория района исследований располагается в трех климатических зонах: арктической, субарктической и умеренной [28]. Особенности климата определяются близостью Карского моря, обилием заливов, рек, болот и озер.

В целом для территории характерна длительная зима (7–8 месяцев), среднемесячные температуры которой составляют –23...–29 °С, а минимальные достигают –60 °С. Суровость климата увеличивается сильными ветрами. На арктическом побережье Западной Сибири годовые суммы осадков не превышают 300–350 мм/год. К югу района исследований количество осадков увеличивается (500–550 мм/год). Наибольшее количество осадков выпадает в июле [29]. Снежный покров зимой формируется в основном в первую половину холодного периода. Высота снежного покрова на наветренных склонах Среднесибирского плоскогорья достигает 80 см, на северо-востоке – лишь 30–40 см, что не предохраняет почву от промерзания. Мощность снежного покрова в конце зимы составляет 50–70 см. Число дней со снежным покровом – 220–270 [22]. Летом усиливается циклоническая деятельность. Из-за частых северных ветров и пасмурной погоды лето прохладное. Средняя температура июля изменяется от 10 до 14 °С, максимальная температура воздуха иногда достигает 30 °С. На протяжении всего лета возможны за-

морозки и выпадение снега. Лето продолжается в среднем около 40–60 дней. Среднегодовая температура воздуха территории $-5...-7^{\circ}\text{C}$, в отдельных районах составляет -10°C .

Авторами исследованы характеристики метеорологических величин, такие как температура воздуха и почвогрунтов, продолжительность прямой солнечной радиации, сумма атмосферных осадков, высота снежного покрова, являющиеся приоритетными при проведении мониторинга криолитозоны.

Для исследования многолетних изменений характеристик метеорологических величин были использованы специализированные массивы данных 19 метеостанций севера Западной Сибири за период с 1980 по 2014 г. Данные двух из расположенных на исследуемой территории 21 метеостанций (рис. 1) не использовались, ввиду отсутствия непрерывного ряда наблюдений (на метеостанциях

Халесовая и Янов Стан данные отсутствуют с 1993 по 1996 г.). Выявлено, что за исследуемый период метеостанция в п. г. т. Березово была перенесена в 1983 г. на 1,5 км к юго-западу.

Анализ многолетних изменений как месячных, так и суточных данных продолжительности прямой солнечной радиации, температуры воздуха, суммы атмосферных осадков, температуры почвогрунтов на глубинах 160 и 320 см и высоты снежного покрова [30, 31] включал в себя проверку нулевых гипотез об однородности рядов наблюдений с помощью критерия Аббе [32], о случайности и наличии тренда с помощью критерия Питмена и критерия инверсий соответственно [33, 34]. Вывод о неслучайном изменении или нарушении однородности рядов соответствовал условию, когда расчетная статистика превышала соответствующее критическое значение при уровне значимости 0,05.

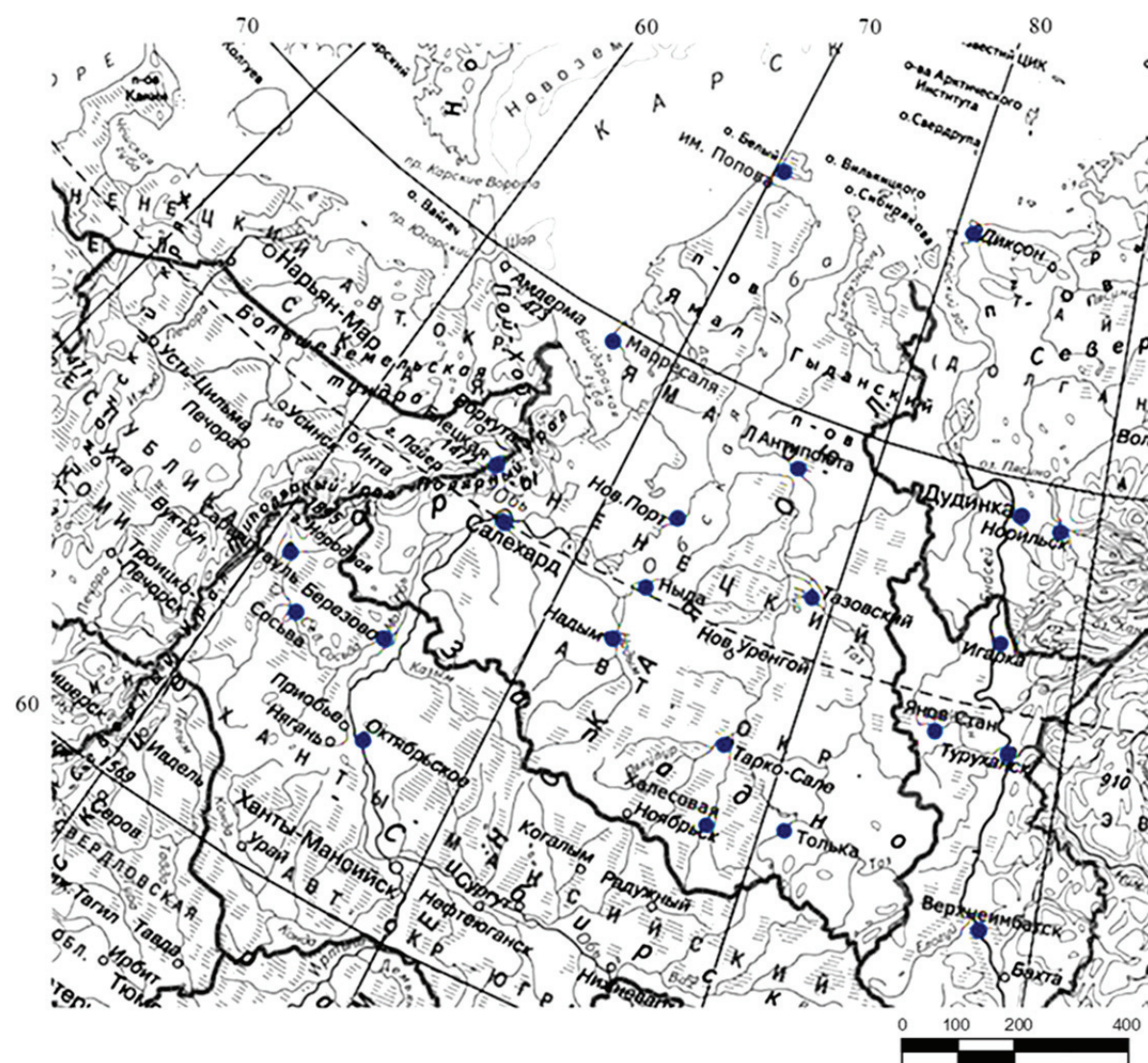


Рис. 1. Карта-схема расположения метеостанций [29] с дополнениями автора

Fig. 1. Map of location of meteorological stations [29] with the additions of the author

Результаты и их обсуждение

При проверке нулевых гипотез об однородности рядов наблюдений выявлено, что неоднородными являются среднемесячные значения суммы атмосферных осадков в холодный период года (с октября по февраль); продолжительность прямой солнечной радиации в летние и зимние месяцы. Ряды наблюдений за высотой снежного покрова являются неоднородными преимущественно в зимнее и весеннее время (с декабря по май), а ряды температуры воздуха неоднородны в летне-осеннее период (с июня по ноябрь); ряды наблюдений за температурой почвогрунтов на глубине 160 см неоднородны в весенние месяцы, а на глубине 320 см неоднородны во все сезоны года.

Обработка результатов является полноценной только в том случае, когда используются однородные ряды или учитывается неоднородность ряда. В метеорологических рядах различают климатологическую и статистическую неоднородность. Причем если появление климатологической неоднородности зависит от человеческого фактора (ошибки методического характера), то статистическая неоднородность вызвана естественными причинами.

Существуют две главные причины нарушения однородности ряда [35]. Первая состоит в том, что вследствие изменения действий основных климатообразующих или антропогенных факторов в рядах имеется детерминированная, или, как принято говорить, «трендовая», составляющая. Выявление такого вида неоднородности позволяет судить о тенденции изменения климата. Данный вид неоднородности ряда, вызванный действием естественных природных факторов, обычно называют статистической неоднородностью или нестационарностью. Вторая причина возможных нарушений однородности ряда состоит в изменении условий и методики наблюдений, ее принято называть климатологической [28]. Изменение метеорологического режима может быть вызвано либо изменением микроклимата, либо неправильной работой приборов в определенных местных условиях, что может приводить к большим ошибкам как случайного, так и систематического характера. Изменение деятельности поверхности на обширных территориях, что в настоящее время характерно для районов севера Западной Сибири, могут сказываться на интенсивности изменений характеристик метеорологических величин, имитируя изменения климата. Микроклиматические изменения характеристик метеорологических величин, обусловленные воздействием антропогенных факторов, могут искажать реальную картину изменения климата.

Некоторая часть этих неоднородностей, вероятно, вызвана нарушением однородности условий наблюдений, которые не удалось надежно выявить из-за невозможности проследить изменения деятельности поверхности за исследуемый период во-

круг метеостанций; часть же, возможно, относится к естественной структуре рядов метеорологических величин, характеристики которых изменяются от года к году или от некоторого периода лет к другому периоду лишь в соответствии с естественной изменчивостью макропроцессов, оказывающих влияние на погоду и климат данного района.

В результате анализа исследуемых характеристик метеорологических величин на наличие тренда для 19 метеостанций, где имеются данные, в среднем на 26,8 % метеостанций обнаружены тренды среднегодовых данных, а для рядов некоторых среднемесячных значений тренд установлен на 52 % метеостанций (подробнее в табл. 1).

При выполнении статистического анализа установлено, что для 80 % рядов, в которых обнаружен тренд с помощью критерия инверсий, наличие тренда подтверждено результатами проверки гипотезы о случайности с помощью критерия Питмена.

Таблица 1. Количество метеостанций, на которых выявлены статистически достоверные тренды

Table 1. Number of meteorological stations with statistically significant trends

Исследуемые характеристики Test characteristics	Количество метеостанций, где The number of meteorological stations, where		
	имеются данные data are available	установлен тренд среднегодовых значений trend of average annual values was established	наблюдается тренд только для некоторых среднемесячных значений trend is observed only for some monthly averages values
Температура воздуха Air temperature	18	1	15
Температура почвогрунтов на глубине Soil temperature at a depth	160 см/см cm/cm	7	2
	320 см/см cm/cm	4	3
Сумма атмосферных осадков Amount of precipitation	17	5	12
Высота снежного покрова Snow depth	18	4	6
Продолжительность солнечного сияния Sunshine duration	11	0	11

В результате анализа данных временных рядов продолжительности прямой солнечной радиации выявлены тренды средних значений преимущественно в зимние месяцы (январь и февраль), увеличение составляет от 0,15 до 1,5 ч/год на всей территории исследования и в ноябре вблизи побережья Обской и Тазовской губы, уменьшение величин наблюдается в с. Березово в ноябре (на 0,56 ч/год) и п. г. т. Елецкий в августе (на 1 ч/год).

На территории севера России учеными [17–19, 26] выявлено повышение температуры воздуха за период 1965–1995 гг. на 1,1–1,2 °C (в отдельных пунктах более 2 °C), во второй половине 1990-х гг. темпы потепления климата снизились, в 2001–2005 гг. температура воздуха повысилась в отдельных пунктах на европейском севере и севере Западной Сибири, но не более чем на 0,3–0,4 °C. В среднем по всему северу России потепление климата оценивается за 2001–2005 гг. как очень слабое (около +0,1 °C за пять лет) [26].

При исследовании величин многолетних изменений температуры воздуха на всей территории увеличение температуры воздуха выявлено только в мае (рис. 2) и июне, что говорит о продолжающейся тенденции к потеплению в теплое время года и подтверждает ранее выявленные изменения в [17–19, 26]. Наибольшее увеличение среднемесячных значений за исследуемый период наблюдается в восточной части на 0,1 °C/год, на западе со стороны Уральских гор на 0,07 °C/год, за исключением м/с Елецкая, на побережье Карского моря в среднем на 0,09 °C/год и в центральной части района, где температура воздуха увеличивается на 0,08 °C/год. Тренды статистически не доказаны в прибрежной части Обской губы (м/с Новый порт и Ныда).

Рост температуры воздуха может быть связан с тепловым воздействием урбанизированных территорий, но их влияние не столь значительно в исследуемом районе. Одной из причин роста, возможно, является увеличение продолжительности прямой солнечной радиации. Авторами найдена линейная связь между среднемесячными значениями продолжительности прямой солнечной радиации и температуры воздуха в июне в с. Тазовское ($R^2=0,69$).

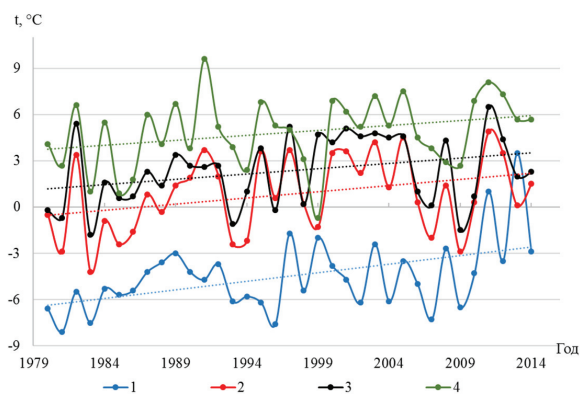


Рис. 2. Многолетние изменения температуры воздуха в мае с линейным трендом на метеостанциях Дудинка (1), Надым (2), Толька (3) и Саранпауль (4) за период 1980–2014 гг.

Fig. 2. Long-term changes of air temperature in May with the linear trend at the meteorological stations in Dudinka (1), Nadym (2) Tolka (3) and Saranpaul (4), 1980–2014

Изменение среднегодовой температуры почвы в 1961–1995 гг. [17] в основном соответствовало изменению среднегодовой температуры воздуха. На всей территории криолитозоны отмечались поло-

жительные тренды температуры почвы. Наибольшие локальные тренды повышений температуры почвы на глубине 320 см за период с 1965 по 2005 г. (до 0,04–0,06 °C/год) отмечаются и для условий севера Западной Сибири [14, 25, 26]. Однако, несмотря на сильное потепление климата, криолитозона сохраняет высокую устойчивость в отношении стабильности термических показателей грунтов.

Для температуры почвогрунтов на глубине 160 см в результате проведенного анализа положительные тренды выявлены преимущественно с октября по январь в западной части района исследования и в восточной (+0,02 °C/год), а в летние месяцы (июль и август), по данным метеостанции с. Толька, наблюдается уменьшение температуры до 0,06 °C/год. На глубине 320 см температура на протяжении всего года увеличивается в среднем на 0,01 °C/год. Полученные результаты свидетельствуют об уменьшении величины тренда температуры почвогрунтов на глубине 320 см, по сравнению с [14, 26], но тенденция к увеличению сохраняется.

Повышение температуры воздуха и связанное с ним повышение температуры почвогрунтов оказывает влияние на увеличение температуры подземных вод.

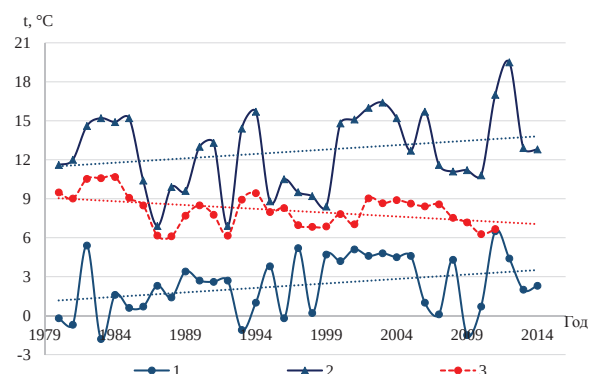


Рис. 3. Многолетнее изменение температуры воздуха в мае (1) и июне (2) и почвогрунтов на глубине 160 см в июле (3) в с. Толька, 1980–2014 гг.

Fig. 3. Long-term changes in air temperature in May (1) and in June (2) and soil temperature at a depth of 160 cm in July (3) in Tolka, 1980–2014

По данным метеостанции в с. Толька выявлены отрицательные тренды температуры почвогрунтов на глубине 160 см в июле и августе (рис. 3), при этом для временных рядов температуры воздуха этой же метеостанции статистически достоверный тренд выявлен в мае и наблюдается тенденция к увеличению в июне, следовательно, температура почвы на глубине 160 см должна увеличиваться или оставаться неизменной (согласно третьему закону Фурье годовые максимумы и минимумы температуры запаздывают на каждый метр глубины на 20–30 суток). Возможной причиной выявленного факта может быть как климатологическая неоднородность, так и нарушение закона Фурье из-за инфильтрации талых вод в переходные сезо-

ны года. Согласно [16] на большей части Сибири с 1966 г. запас воды в снеге растёт или не изменяется, в то время как продолжительность периода со снегом на земле сократилась в основном из-за более раннего снеготаяния.

Источников положительного тренда хода температур почвогрунтов в исследуемом районе могло быть несколько. С одной стороны, как уже упоминалось, это реальные изменения климата; с другой стороны, существуют многолетние изменения деятельной поверхности почвы в месте установления термометров, не замечаемые наблюдателем. Зимой это различие в залегании снега из-за изменения защищённости места, связанного с постепенной застройкой окружающей территории или вырубкой леса. Летом в зависимости от антропогенного изменения деятельной поверхности почвы, которая непосредственно получает и отдаёт тепло, постепенной смены растительности и уплотнения почвы меняются и условия нагревания почвогрунтов, поразному изменяется температурный режим в разных средах из-за различия в теплопроводности и теплоёмкости талого и мерзлого грунтов [8]. Известно, что отклик многолетней мерзлоты на изменение климата существенно зависит от исходного термического состояния ММП и местного разнообразия ландшафтов [8], различия трендов температуры воздуха и ММП обусловлены затратами тепла на оттаивание ММП. Этот фактор особенно сильно проявляется в высокотемпературных (с температурой, близкой к 0 °C) ММП в островной криолитозоне. Авторами [36] установлено, что даже при значительном потеплении тепловое состояние приповерхностных слоев вечной мерзлоты демонстрирует устойчивость; но антропогенное воздействие на почвенный покров, такое как рубка лесов, разрушение естественного почвенного покрова и последствия пожаров приводят к значительному повышению температуры почвогрунтов и глубины сезонного оттаивания, а также активизации неблагоприятных криогенных процессов. При потеплении приземного слоя атмосферы происходит постепенное оттаивание пород сверху и уменьшение площадей островов мерзлоты, на что расходуется значительная часть поступающей тепловой энергии. Мерзлый грунт проводит тепло лучше, чем талый, поэтому даже при равной продолжительности холодного и теплого периодов теплопотери зимой будут больше, чем поступление тепла летом [8].

Характер трендов многолетнего изменения температуры почвогрунтов в районах многолетней мерзлоты определяются не только изменениями температуры воздуха, но и во многом определяется изменением характеристик снежного покрова, поскольку он является хорошим теплоизолятором.

Результаты, приводимые в работах [23–25], свидетельствуют о том, что многолетние изменения среднегодовой температуры грунтов в Сибири определяются в большей мере изменениями высоты снежного покрова (до 50 %), чем изменениями

температуры воздуха (0–5 %). Пространственный анализ корреляций между зимней температурой почвогрунтов на глубинах и высотой снежного покрова в феврале показал, что на глубинах 80 и 160 см преобладают значимые положительные коэффициенты корреляции $k=0,4–0,6$ на огромной территории России от Предуралья до восточных границ континента. Исключение составляют районы Северо-Сибирской низменности с корреляцией около нуля на глубинах 80 и 160 см [23].

Установлено [8], что в Сибири многолетние изменения среднегодовой температуры грунтов на глубине 320 см в большей степени определяются изменениями высоты снежного покрова, что приводит к дополнительному повышению среднегодовой температуры почвогрунтов и ускоренному ее росту по сравнению с трендами потепления нижней атмосферы. Это обстоятельство приобретает особое значение в зоне многолетней мерзлоты, так как усиливает одну из составляющих ее возможной деградации. Влияние высоты снежного покрова на температуру почвогрунтов прослеживается почти на всей территории многолетней мерзлоты. Наибольшие современные термические изменения в верхних горизонтах криолитозоны происходят при одновременном повышении температуры воздуха и высоты снежного покрова. Если тенденции изменения температуры воздуха и толщины снега не однонаправлены, термическое состояние многолетней мерзлоты меняется не столь сильно или же вообще остается неизменным [8]. В результате исследований установлено, что увеличение температуры почвогрунтов может наблюдаться при отсутствии положительных трендов среднегодовой температуры воздуха и высоты снежного покрова. На рис. 4 представлены многолетние изменения данных характеристик на метеостанции с. Туруханск. Возможной причиной может служить антропогенное воздействие на термический режим почвогрунтов.

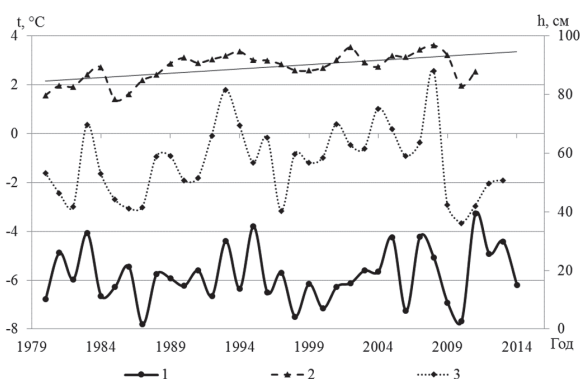


Рис. 4. Многолетние изменения среднегодовой температуры воздуха (1), температуры почвогрунтов на глубине 320 см (2) и высоты снежного покрова (3), м/с, Туруханск, 1980–2014 гг.

Fig. 4. Long-term changes in air temperature (1) and soil at a depth of 320 cm (2) and depth of snow cover (3), Turukhansk, 1980–2014

По результатам исследований авторов установлено, что изменения суммы атмосферных осадков и снежного покрова имеют зональный характер.

Увеличение величин высоты снежного покрова наблюдается с января по апрель на 8,6 см/10 лет в пределах границ атлантической области субарктического пояса; уменьшение – в пределах атлантической области арктического пояса и континентальной западно-сибирской северной области умеренного пояса на 0,3 см/10 лет и 0,6 см/10 лет соответственно. В западной части территории изменений не выявлено.

В ходе исследования многолетних изменений суммы атмосферных осадков по данным метеостанций Маррессаля и с. Толька изменений уровня средних значений ряда не выявлено. В летние месяцы тренд статистически не доказан. В октябре и ноябре наблюдается увеличение месячных сумм осадков на западе в нижнем течении реки Оби на 7 мм/год, а на территории бассейнов рек Надым, Пур и Таз увеличение в среднем составляет 6 мм/год в марте, при этом по мере продвижения на север, к побережью Карского моря, происходит уменьшение месячных сумм осадков в апреле (4 мм/год) и в ноябре (3 мм/год). В декабре наблюдается уменьшение месячных сумм осадков на 6,6 мм/год по данным метеостанций с. Туруханск и с. Новый Порт.

Согласно [37] внутригодовое перераспределение атмосферного увлажнения, а именно рост количества атмосферных осадков в летне-осенний период, может вызвать некоторое увеличение уровней подземных вод. Следовательно, выявленное авторами внутригодовое перераспределение атмосферного увлажнения в исследуемом районе может повлиять на изменение уровней подземных вод.

Отмечаемое в последние десятилетия потепление климата влияет на Арктический регион и может оказать существенное влияние на дестабилизацию и деградацию вечной мерзлоты, в том числе и на Арктическом шельфе [38, 39], что приведет к непредсказуемым последствиям. С другой стороны, в ближайшие десятилетия, согласно сценарию изменения климата [40], не только сохранится продолжающаяся уже 15 лет стабилизация температуры, но и возможно некоторое похолодание. Следует подчеркнуть, что вопрос климатологической неоднородности многолетних рядов характеристик метеорологических величин требует серьезного учета при исследованиях для обоснованного прогноза изменений климата.

Выводы

На территории широкого распространения многолетнемерзлых пород с момента освоения северных районов проводились исследования откликов ММП на изменения климата с помощью геотермических изменений и геокриологических исследований, статистического анализа характеристик метеорологических величин и др. Выводы в публи-

кациях разных авторов по вопросу направлений и величины изменений характеристик метеорологических величин не всегда согласуются между собой в основном из-за использования ограниченного числа точек наблюдений, коротких рядов или, возможно, использования данных метеостанций, имеющих климатологическую неоднородность.

В результате статистического анализа многолетних изменений:

- установлено увеличение продолжительности прямой солнечной радиации (от 0,15 до 1,5 ч/год) преимущественно в холодное время года на всей территории и уменьшение в августе и ноябре в восточной части области исследования (0,5–1 ч/год);
- установлено продолжающееся увеличение температуры воздуха в мае и июне в среднем на 0,08 °C/год преимущественно на всех точках исследования, кроме прибрежной части Обской губы (изменений не выявлено);
- обнаружены разнонаправленные тенденции температуры почвогрунтов: на глубине 160 см преимущественно с октября по январь в западной и в восточной части района исследования наблюдается увеличение, а в летние месяцы (июль и август), по данным метеостанции с. Толька, наблюдается уменьшение температуры до 0,06 °C/год. На глубине 320 см температура увеличивается в среднем на 0,01 °C/год. Ряды данных по температуре почвогрунтов могут иметь климатологическую неоднородность, вызванную нарушением однородности условий наблюдений в результате антропогенной деятельности, а выявить произошедшие изменения деятельной поверхности вблизи метеостанций за исследуемый период авторами не представляется возможным;
- выявлен зональный характер изменения суммы атмосферных осадков и снежного покрова. В октябре и ноябре наблюдается увеличение месячной суммы атмосферных осадков на западе в нижнем течении р. Оби (7 мм/год), а в районах бассейнов рек Надым, Пур и Таз увеличение происходит в марте (6 мм/год). По мере продвижения на север, к побережью Карского моря, происходит уменьшение величин суммы атмосферных осадков в апреле (4 мм/год) и в ноябре (3 мм/год). Изменения высоты снежного покрова происходит зонально, рост значений достигает 8,6 см/10 лет, а уменьшения – 0,6 см/10 лет. При этом в западной части района изменений не выявлено.

Повышение температуры воздуха, которое наблюдается в различные сезоны года на исследуемой территории, изменение характеристик снежного и растительного покрова, увеличение экстремальности климата, несомненно, оказывает влияние на состояние почвогрунтов в зоне многолетней мерзлоты Севера Западной Сибири. Установленные авторами разнонаправленные тенденции из-

менения температуры почвогрунтов не позволяют говорить об однозначном увеличении выброса метана на исследуемой территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Glacier changes in the circumpolar Arctic and sub-Arctic, mid-1980s to late-2000s/2011 / S.H. Mernild, J.K. Malmros, J.C. Yde, S. De Villiers, N.T. Knudsen, R. Wilson // *Geografisk Tidsskrift – Danish Journal of Geography*. – 2015. – V. 115 – № 1. – P. 39–56.
2. Carton J.A., Ding Y., Arrigo K.R. The seasonal cycle of the Arctic Ocean under climate change // *Geophysical Research Letters*. – 2015. – V. 42. – № 18. – P. 7681–7686.
3. Icing conditions over Northern Eurasia in changing climate / O.N. Bulygina, N.M. Arzhanova, P.Ya. Groisman // *Environmental research letters*. – 2015. – V. 10. – № 2 – P. 11.
4. Bring A., Destouni G. Arctic Climate and Water Change: Model and Observation Relevance for Assessment and Adaptation // *Surveys in Geophysics*. – 2014. – V. 35. – Iss. 3. – P. 853–877.
5. Hydrological risks in Western Siberia under the changing climate and anthropogenic influences conditions / V.A. Zemtsov, V.V. Paromov, S.G. Kopysov, A.V. Kouraev, S.V. Negrul // *International Journal of Environmental Studies*. – 2014. – V. 71. – № 5. – P. 611–617.
6. Atmospheric Ozone and Methane in a Changing Climate / I.S.A. Isaksen, T.K. Berntsen, S.B. Dalsøren, K. Eleftheratos, Y. Orsolini, B. Rognerud, F. Stordal, O.A. Sævi, C. Zerefos, C.D. Holmes // *Atmosphere*. – 2014. – V. 5. – P. 518–535.
7. Modeling the Influence of Methane Emissions from Arctic Gas Hydrates on Regional Variations in Composition of the Lower Atmosphere / S.P. Smyshlyaeva, E.A. Mareev, V.Ya. Galinc, P.A. Blakitnaya // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2015. – V. 51. – № 4. – P. 412–422.
8. Семенов С.М. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем: монография. – Москва: Росгидромет, 2012. – 511 с.
9. Thermal state of permafrost in Russia / V.E. Romanovsky, D.S. Drozdov, N.G. Oberman, G.V. Malkova et al. // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2012. – V. 21. P. 136–155.
10. Мажитова Г.Г., Каверин Д.А. Динамика глубины сезонного протаивания и осадки поверхности почвы на площадке циркулярного мониторинга деятельного слоя (CALM) в европейской части России // *Криосфера Земли* – 2007. – Т. XI. – № 4. – С. 20–30.
11. Brown J., Hinkel K.M., Nelson F.E., The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) Program: Research designs and initial results // *Polar Geography*. – 2000. – V. 24. – № 3. – P. 165–258.
12. Дзюба А.В., Зекцер И.С. Климатический криолитозон: влияние деградации криолитозона на климат // *Науки о Земле*. – 2011. – С. 260–272. URL: http://www.rfbr.ru/rffi/ru/popular_science_articles/o_1894459 (дата обращения: 07.11.2015).
13. История наблюдений за температурой почвы на сети метеорологических станций России / С.С. Быховец, В.А. Сорокиных, Р.А. Мартуганов, В.Г. Мамыкин, Д.А. Гиличинский // *Криосфера Земли* – 2007. – Т. XI. – № 1. – С. 7–20.
14. Павлов А.В., Малкова Г.В. Мелкомасштабное картографирование трендов современных изменений температуры грунтов на Севере России // *Криосфера Земли* – 2009. – Т. XIII. – № 4. – С. 32–39.
15. Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Разуваев В.Н. Изменения характеристик снежного покрова на территории России в последние десятилетия // *Труды ГУ «ВНИИГМИ МЦД»*. – Обнинск, 2007. – Вып. 178. – С. 54–62.
16. Climate changes in Siberia / P.Ya. Groisman, T.A. Blyakharchuk, A.V. Chernokulsky et al. // *Regional environmental changes in Siberia and their global consequences*. Ch. 3. – Dordrecht: Springer, 2013. – P. 57–109.
17. Изменение климата в районах вечной мерзлоты на территории России / Ю.А. Израэль, Ю.А. Анохин, Л.Т. Мяч, А.Б. Шерстюков // *Материалы международной конференции «Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз её изменений»*. – Тюмень: Нефтегазовый университет, 2006. – Т. I. – С. 72–75.
18. Оценка возможных экологических и экономических последствий изменения климата в районах вечной мерзлоты / Ю.А. Израэль, Ю.А. Анохин, Л.Т. Мяч, А.Б. Шерстюков // *Тезисы докладов Всероссийской конференции «Научные аспекты экологических проблем России»*. – М.: Гидрометеиздат, 2006. – С. 19–20.
19. Статистические оценки изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на территории Российской Федерации / Ю.А. Израэль, А.В. Павлов, Ю.А. Анохин, Л.Т. Мяч, А.Б. Шерстюков // *Метеорология и гидрология*. – 2006. – Т. 5. – С. 27–38.
20. Алфимов А.В., Берман Д.И. Подснежные температуры и почвенная биота в северной Евразии // *Науки о Земле*. – 2007. – С. 1–8. URL: http://www.rfbr.ru/rffi/ru/popular_science_articles/o_16747 (дата обращения: 07.11.2015).
21. Павлов А.В., Гравис Г.Ф. Вечная мерзлота и современный климат // *Науки о Земле*. – 2000. – С. 1–9. URL: http://www.rfbr.ru/rffi/ru/popular_science_articles/o_16473 (дата обращения: 07.11.2015).
22. Anisimov O.A., Reneva S.A. Permafrost and changing climate: the Russian perspective // *Ambio*. – 2006. – № 4. – P. 169–175.
23. Шерстюков А.Б., Шерстюков Б.Г. Пространственные особенности и новые тенденции в изменениях термического состояния почвогрунтов и глубины их сезонного протаивания в зоне многолетней мерзлоты // *Метеорология и климатология* – 2015. – Т. 40. – № 2. – С. 73–78.
24. Nicolsky D.J., Romanovsky V.E., Tzipenko G.S. Using in-situ temperature measurements to estimate saturated soil thermal properties by solving a sequence of optimization problems // *Cryosphere*. – 2007. – № 1. – P. 41–58.
25. Шерстюков А.Б. Длительные тенденции и изменения температуры почвогрунтов последнего десятилетия в зоне многолетней мерзлоты России // *Труды ФГБУ ВНИИГМИ-МЦД*. – 2014. – Т. 178 – С. 224–232.
26. Павлов А.В. Тренды современных изменений температуры почвы на севере России // *Криосфера Земли*. – 2008. – Т. XII. – № 3. – С. 22–27.
27. Гидрогеология СССР. Т. XVI. Западно-Сибирская равнина (Тюменская, Омская, Новосибирская и Томская области) / под ред. А.В. Сидоренко. – М.: Недра, 1970. – 368 с.
28. Израэль Ю.А., Павлов А.В., Анохин Ю.А. Эволюция криолитозона при современных изменениях глобального климата // *Метеорология и гидрология*. – 2002. – № 1. – С. 22–34.
29. Национальный атлас России. Экология и природа. Т. 2. URL: <http://национальныйатлас.рф> (дата обращения: 07.10.15).
30. Российский гидрометеорологический портал. URL: <http://meteo.ru/> (дата обращения: 01.10.15).
31. Официальный сайт ООО «Расписание Погоды». URL: <http://rp5.ru/> (дата обращения: 10.10.15).
32. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

33. Христофоров А.В. Надежность расчетов речного стока. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 168 с.
34. Rapp J., Schönwiese Ch.-D. Atlas der Niederschlags und Temperaturtrends in Deutschland 1891–1990 // Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten: Serie B Meteorologie und Geophysik. – Frankfurt am Main: Universität Frankfurt, 1996. – Bd. 5. – 255 s.
35. Климатология / О.А. Дроздов, В.А. Васильев, Н.В. Кобышева, Л.К. Смекалова, Е.П. Школьный. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1989. – 568 с.
36. Varlamov S., Skachkov Yu., Skryabin P. Current climate change effects on the ground thermal regime in Central Yakutia // Sciences in cold and arid regions. – 2014. – V. 6. – № 4. – P. 282–292.
37. Льготин В.А., Савичев О.Г., Макушин Ю.В. Многолетние изменения среднесезонных и среднегодовых уровней и температуры подземных вод верхней гидродинамической зоны в Томской области // Геоэкология. – 2010. – № 1. – С. 23–29.
38. Distributions of bacterial and archaeal membrane lipids in surface sediments reflect differences in input and loss of terrestrial organic carbon along a cross-shelf Arctic transect / S.A. Doğrul, R.B. Sparkes, J. Bischoff, H.M. Talbot, T. Gustafsson et al. // Organic Geochemistry. – 2015. – V. 83–84. – P. 16–26.
39. Historical records of organic matter supply and degradation status in the East Siberian Sea / L. Bröder, T. Tesi, A. Andersson, T.I. Eglinton, I.P. Semiletov et al. // Organic Geochemistry. – 2016. – V. 91. – P. 16–30.
40. Vakulenko N.V., Nigmatullin R.I., Sonechkin D.M. On the Problem of the Global Climate Change // Meteorology and hydrology. – 2015. – V. 40. – № 9. – P. 629–634.

Поступила 22.12.2015 г.

Информация об авторах

Решетько М.В., кандидат географических наук, доцент кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Моисеева Ю.А., аспирант кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 551.583:551.345(571.1)

CLIMATIC FEATURES AND STATISTICAL EVALUATION OF CLIMATE CHANGE IN PERMAFROST REGIONS IN THE NORTH OF WESTERN SIBERIA

Margarita V. Reshetko¹,
MRechetko@tpu.ru

Yulia A. Moiseeva¹,
julchiky@mail.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is related to the necessity to assess climate changes affecting the permafrost due to the possible growth of greenhouse gas emissions and increase of accident rate in industrial, oil and gas infrastructure at permafrost thawing.

The aim of the research is to estimate the current changes in climate characteristics, which affect directly the thermal state of soils in permafrost areas in the north of Western Siberia.

Methods. Analysis of long-term changes of meteorological data consisted of tests of null hypothesis of randomness and homogeneity of observation series and trend presence. The homogeneity test was carried out using the Abbe test, the test of randomness was carried out by Pitman criterion, the trend presence was checked using the criterion of inversions. The conclusion on nonrandom change or violation of the homogeneity of rows corresponded to the condition, when the modulus of the estimated statistics exceeded the corresponding critical value at significance level of 0,05.

Results. The paper considers the climatic features in the north of Western Siberia and its variability in recent years. The analysis of temperature changes of air and soil at depths of 160 and 320 cm, the amount of precipitation and snow cover based on the instrumental data for the last 35 years has shown that air temperature continues rising in the warmer months, soil temperature increases throughout the year. The authors have revealed zonal character of changes in the amount of precipitation and snow cover. Microclimatic changes in characteristic of meteorological values can distort the real picture of climate change.

Key words:

North of Western Siberia, permafrost, climate change, statistical analysis, soil temperature.

The research was financially supported by Tomsk Polytechnic University (project BNY_VAF_144_2014).

REFERENCES

1. Mernild S.H., Malmros J.K., Yde J.C., De Villiers S., Knudsen N.T., Wilson R. Glacier changes in the circumpolar Arctic and sub-Arctic, mid-1980s to late-2000s/2011. *Geografisk Tidsskrift – Danish Journal of Geography*, 2015, vol. 115, no. 1, pp. 39–56.
2. Carton J.A., Ding Y., Arrigo K.R. The seasonal cycle of the Arctic Ocean under climate change. *Geophysical Research Letters*, 2015, vol. 42, no. 18, – P. 7681–7686.
3. Bulygina O.N., Arzhanova N.M., Groisman P.Ya. Icing conditions over Northern Eurasia in changing climate. *Environmental research letters*, 2015, vol. 10, no. 2, pp. 11.
4. Bring A., Destouni G. Arctic Climate and Water Change: Model and Observation Relevance for Assessment and Adaptation. *Surveys in Geophysics*, 2014, vol. 35, Iss. 3, pp. 853–877.
5. Zemtsov V.A., Paromov V.V., Kopysov S.G., Kouraev A.V., Negrul S.V. Hydrological risks in Western Siberia under the changing climate and anthropogenic influences conditions. *International Journal of Environmental Studies*, 2014, vol. 71, no. 5, pp. 611–617.
6. Isaksen I.S.A., Berntsen T.K., Dalsøren S.B., Eleftheratos K., Orsolini Y., Rognrud B., Stordal F., Sørve O.A., Zerefos C., Holmes C.D. Atmospheric Ozone and Methane in a Changing Climate. *Atmosphere*, 2014, vol. 5, pp. 518–535.
7. Smyshlyaeva S.P., Mareev E.A., Galinc V.Ya., Blakitnaya P.A. Modeling the Influence of Methane Emissions from Arctic Gas Hydrates on Regional Variations in Composition of the Lower Atmosphere. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, vol. 51, no. 4, pp. 412–422.
8. Semenov S.M. *Metody otsenki posledstviy izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem* [Methods for assessing the effects of climate change for physical and biological systems]. Ed. by S.M. Semenov. Moscow, Rosgidromet Publ., 2012. 511 p.
9. Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G., Malkova G.V. Thermal state of permafrost in Russia. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2012, vol. 21, pp. 136–155.
10. Mazhitova G.G., Kaverin D.A. Dinamika glubiny sezonnogo protaivaniya i osadki poverkhnosti pochvy na ploshchadke tsirkumpolyarnogo monitoringa deyatelnogo sloya (CALM) v evropeyskoy chasti Rossii [Thaw depth dynamics and soil surface subsidence at a circumpolar active layer monitoring (CALM) site, the European north of Russia]. *Cryosphere of the Earth's*, 2007, vol. XI, no. 4, pp. 20–30.
11. Brown J., Hinkel K.M., Nelson F.E. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) Program: Research designs and initial results. *Polar Geography*, 2000, vol. 24, no. 3, pp. 165–258.
12. Dzyuba A.V., Zektser I.S. Klimaticheskiy kriolitoeffekt: vliyaniye degradatsii kriolitozony na klimat [Climatic cryolite effect: the impact of degradation of the permafrost zone on the climate]. *Sciences about the Earth*, 2011, pp. 260–272. Available at: http://www.rfbr.ru/rffi/ru/popular_science_articles/o_1894459 (accessed 7 November 2015).
13. Bykhovets S.S., Sorokovikov V.A., Martuganov R.A. Istoriya nablyudeniya za temperaturoy pochvy na seti meteorologicheskikh stantsiy Rossii [History of soil temperature measurements at the network of meteorological stations in Russia]. *Cryosphere of the Earth's*, 2007, vol. XI, no. 1, pp. 7–20.
14. Pavlov A.V., Malkova G.V. Melkomasshtabnoye kartografirovaniye trendov sovremennykh izmeneniy temperatury gruntov na Severe

- Rossii, Novosibirsk [Small-scale mapping of trends of the contemporary ground temperature changes in the Russian north]. *Cryosphere of the Earth's*, 2009, vol. XIII, no. 4, pp. 32–39.
15. Bulygina O.N., Korshunova N.N., Razuvaev V.N. Izmeneniya kharakteristik snezhnogo pokrova na territorii Rossii v poslednie desyatiletia [Changes of snow cover in the last decade in Russia]. *Trudy FGBU VNIIGMI-MTsD* [Proc. FGBU RIHMI MCD]. Obninsk, 2007. Vol. 178, pp. 54–62.
 16. Groisman P.Ya., Blyakharchuk T.A., Chernokulsky A.V. Climate changes in Siberia. *Regional environmental changes in Siberia and their global consequences*. Ch. 3. Dordrecht, Springer, 2013. pp. 57–109.
 17. Izrael Yu.A., Anokhin Yu.A., Myach L.T., Sherstyukov A.B. Izmeneniye klimata v rayonakh vechnoy merzloty na territorii Rossii [Climate change in permafrost regions in Russia]. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii. Teoriya i praktika otsenki sostoyaniya kriosfery Zemli i prognoz ee izmeneniy* [Proc. of the international conference. Theory and practice of assessing the state of the cryosphere and the Earth's forecast it changes]. Tyumen, 2006. Vol. I, pp. 72–75.
 18. Izrael Yu.A., Anokhin Yu.A., Myach L.T., Sherstyukov A.B. Otsenka vozmozhnykh ekologicheskikh i ekonomicheskikh posledstviy izmeneniya klimata v rayonakh vechnoy merzloty [Assessment of possible environmental and economic impacts of climate change in permafrost regions]. *Vserossiyskaya konferentsiya. Nauchnye aspekty ekologicheskikh problem Rossii* [Proc. Rus. Conf. The scientific aspects of environmental problems in Russia]. Moscow, 2006. pp. 19–20.
 19. Izrael Yu.A., Pavlov A.V., Anokhin Yu.A., Myach L.T., Sherstyukov A.B., Statistical assessment of the elements of climate change in permafrost regions in Russia. *Meteorology and Hydrology*, 2006, vol. 5, pp. 27–38. In Rus.
 20. Alfimov A.V., Berman D.I. Podsnenezhnye temperatury i pochvennaya biota v Severnoy Evrazii [Undersnow temperature and soil biota in the Northern Eurasia]. *Sciences about the Earth*, 2007, pp. 1–8. Available at: http://www.rfbr.ru/rffi/ru/popular_science_articles/o_16747 (accessed 7 November 2015).
 21. Pavlov A.V., Gravis G.F. Vechnaya merzlota i sovremenniy klimat [Permafrost and the current climate]. *Sciences about the Earth*, 2000, pp. 1–9. Available at: http://www.rfbr.ru/rffi/ru/popular_science_articles/o_16473 (accessed 7 November 2015).
 22. Anisimov O.A., Reneva S.A. Permafrost and changing climate: the Russian perspective. *Ambio*, 2006, vol. 4, pp. 169–175.
 23. Sherstyukov A.B., Sherstyukov B.G. Spatial features and new trends in thermal conditions of soil and depth of its seasonal thawing in the permafrost zone. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2015, vol. 40, no. 2, pp. 73–78. In Rus.
 24. Nicolsky D.J., Romanovsky V.E., Tipenko G.S. Using in-situ temperature measurements to estimate saturated soil thermal properties by solving a sequence of optimization problems. *Cryosphere*, 2007, no. 1, pp. 41–58.
 25. Sherstyukov A.B. Dlitelnye tendentsii i izmeneniya temperatury pochvogruntov poslednego desyatiletia v zone mnogoletney merzloty Rossii [Long-term trends and changes in soil temperature of the last decade in the permafrost zone of Russia]. *Trudy FGBU VNIIGMI-MTsD*, [Proc. FGBU RIHMI MCD]. Obninsk, 2014. Vol. 178, pp. 224–232.
 26. Pavlov A.V. Trendy sovremennykh izmeneniy temperatury pochvy na severe Rossii [Trends of contemporary changes of soil temperature in northern Russia]. *Cryosphere of the Earth's*, 2008, vol. XII, no. 3, pp. 22–27.
 27. Gidrogeologiya SSSR. T. XVI. *Zapadno-Sibirskaya ravnina (Tyumenskaya, Omskaya, Novosibirskaya i Tomskaya oblasti)* [Hydrogeology of the USSR. T. XVI. West Siberian Plain (Tyumen, Omsk, Novosibirsk and Tomsk regions)]. Moscow, Nedra Publ., 1970. 368 p.
 28. Izrael Yu.A., Pavlov A.V., Anokhin Yu.A. Evolution of the permafrost zone in current global climate change. *Meteorology and Hydrology*, 2002, no. 1, pp. 22–34. In Rus.
 29. Natsionalny atlas Rossii, Ekologiya i priroda. T. 2 [The National Atlas of Russia. Vol. 2]. Available at: <http://национальныйатлас.рф> (accessed 7 October 2015).
 30. Rossiyskiy gidrometeorologicheskiy portal [The Russian Hydro-meteorological portal]. Available at: <http://meteo.ru/data> (accessed 1 October 2015).
 31. Ofitsialny sayt OOO «Raspisanie Pogody» [The official site of «Reliable Prognosis»]. Available at: <http://rp5.ru/> (accessed 10 October 2015).
 32. Bendat Dzh., Pirsol A. *Prikladnoy analiz sluchaynykh dannyykh* [Applied analysis of random data]. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1989. 540 p.
 33. Khristoforov A.V. *Nadezhnost raschetov rechnogo stoka* [The reliability of calculations of river flow]. Moscow, MGU Press, 1993. 168 p.
 34. Rapp J., Schönwiese Ch.-D. Atlas der Niederschlags und Temperaturtrends in Deutschland 1891–1990. *Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten: Serie B Meteorologie und Geophysik*. Frankfurt am Main: Universität Frankfurt, 1996. Bd. 5, 255 s.
 35. Drozdov O.A., Vasilyev V.A., Kobysheva N.V., Smekalova L.K., Shkolny E.P. *Klimatologiya* [Climatology]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989. 568 p.
 36. Varlamov S., Skachkov Yu., Skryabin P. Current climate change effects on the ground thermal regime in Central Yakutia. *Sciences in cold and arid regions*, 2014, vol. 6, no. 4, pp. 282–292.
 37. Lgotin V.A., Savichev O.G., Makushin Yu.V. Long-term changes in the average seasonal and annual mean levels and temperature of groundwater of upper hydrodynamic zone in Tomsk Region. *Geoehtologiya*, 2010, no. 1, pp. 23–29. In Rus.
 38. Doğrul S.A., Sparkes R.B., Bischoff J., Talbot H.M., Gustafsson T. Distributions of bacterial and archaeal membrane lipids in surface sediments reflect differences in input and loss of terrestrial organic carbon along a cross-shelf Arctic transect. *Organic Geochemistry*, 2015, vol. 83–84, pp. 16–26.
 39. Bröder L., Tesi T., Andersson A., Eglinton T.I., Semiletov I.P. Historical records of organic matter supply and degradation status in the East Siberian Sea. *Organic Geochemistry*, 2016, vol. 91, pp. 16–30.
 40. Vakulenko N.V., Nigmatullin R.I., Sonechkin D.M. On the Problem of the Global Climate Change. *Meteorology and hydrology*, 2015, vol. 40, no. 9, pp. 629–634. In Rus.

Received: 22 December 2015.

Information about the authors

Margarita V. Reshetko, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Yulia A. Moiseeva, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.