

УДК 631.436; 551.5; 504.456
doi: 10.17223/19988591/45/10

Н.Г. Коронатова, Н.П. Миронычева-Токарева

*Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения
Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия*

Температурный режим торфяных олиготрофных почв лесостепи Западной Сибири (на примере Николаевского рьяма)

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ
№ 16-55-16007 НЦНИЛ_а.

Приведены результаты пятилетнего наблюдения за температурным режимом торфяной олиготрофной почвы сосново-кустарничково-сфагнового верхового болота (Николаевского рьяма), расположенного в лесостепной зоне Западной Сибири (55°08'59"N, 79°02'59"E). Почвенную температуру фиксировали автономными измерителями профиля температуры на глубинах 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 120, 160, 240 см с шагом в 1 ч. По всему почвенному профилю определены средняя годовая, средняя месячная температуры, годовая амплитуда, суммы положительных и отрицательных средних суточных температур, градиенты температур, длительности безморозных и переходных периодов, динамика глубины сезонномёрзлого слоя. Показано, что температурный режим торфяной олиготрофной почвы определяется ходом температур воздуха, присутствием и уровнем стояния болотных вод, а также наличием и временем установления снежного покрова. По сравнению с аналогичными почвами южной тайги торфяная почва Николаевского рьяма характеризуется более континентальным почвенным климатом.

Ключевые слова: *верховое сосново-кустарничково-сфагновое болото; рям; лесостепь; автономный измеритель профиля температуры.*

Введение

Верховые сосново-кустарничково-сфагновые болота (рямы) в лесостепной зоне Западной Сибири – это уникальные экстразональные экосистемы, которые существуют в условиях недостаточного увлажнения среди засоленных почв и низинных евтрофных болот (займищ) [1]. Данные рьямы имеют вид небольших округлых островков площадью от нескольких единиц до нескольких десятков квадратных километров, в центральной части которых часто образуются вторичные озёра. Рьямы являются очагами произрастания арктобореальных и бореальных растений на южной границе их распространения [2], чувствительных к климатическим изменениям. Поэтому необходимы мониторинговые наблюдения за динамикой климатических пара-

метров окружающей среды. Однако до сих пор не проводилось режимных метеорологических наблюдений, в частности, изучения температурного режима торфяной залежи на территории таких болот.

Температурный режим почв зависит от радиационного баланса и интенсивности теплообмена между атмосферой и подстилающими грунтами. Исследования, проведённые в различных регионах Сибири, показывают, что высота снежного покрова в зимний период имеет большее влияние на температуру почвы, чем температура воздуха [3–5]. Начиная с середины XX в. наблюдается тенденция к повышению температуры почв Сибири [6, 7], причём преимущественно в холодный период года [8]. В летнее время быстрый прогрев верхнего слоя торфяной залежи может осуществляться потоком дождевой влаги [9].

Характер растительности оказывает влияние на температурный режим почвы, в частности, время её промерзания и оттаивания [10]. В южной тайге Западной Сибири многолетний мониторинг температурного режима торфяной залежи сосново-кустарничково-сфагнового верхового болота показал, что теплоизолирующая способность мохового очёса и насыщенность водой являются причиной тепловой инерции, что выражается в уменьшении температурных колебаний, снижении прогрева в тёплое время года и остывания – в холодное, а также падении глубины промерзания в три раза по сравнению с минеральными почвами [11, 12]. Теплопроводность мхов и объёмная теплоёмкость не зависят от толщины мохового мата и линейно зависят от содержания в нём воды, но эти зависимости не видоспецифичны; мхи снижают амплитуду почвенной температуры и частоту замерзания-оттаивания в течение вегетационного сезона, но не среднюю температуру почвы [13]. В течение года торфяная залежь открытых травяно-сфагновых верховых болот теплее по сравнению с рьями [14].

Цель данной работы – выявление особенностей температурного режима торфяной олиготрофной почвы сосново-кустарничково-сфагнового верхового болота в Барабинской лесостепи Западной Сибири.

Материалы и методики исследования

Исследование проведено на территории Николаевского рья (также называемого «урочище Ипатиха»), который расположен в Убинском районе Новосибирской области в пределах Барабинской лесостепи (55°08'59"N, 79°02'59"E). Почвы рья торфяные олиготрофные [15]. Залежь сложена главным образом верховым фускум-торфом слабой степени разложения, глубина залежи в центре рья 4,3 м [16]. Болотные воды весной стояли на глубине 5–20 см (от уровня межкочечных понижений) и опускались к концу лета до 40–70 см. Фитоценоз в центральной части рья представлял собой сосново-кустарничково-сфагновое сообщество, а по периферии – берёзово-кустарничково-сфагновое. Древесный ярус сформирован болотной формой

сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. f. *uliginosa* Abolin и берёзой пушистой *Betula pubescens* Ehrh. Среди кустарничков преобладали *Ledum palustre* L. и *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench, присутствовали *Vaccinium vitis-idaea* L., *Охосoccus microcarpus* Turcz. ex Rupr. Травяной покров не развит, редко встречался *Rubus chamaemorus* L. В моховом покрове доминировали *Sphagnum fuscum* (Schimp.) Klinggr. и *S. angustifolium* (Russ. ex Russ.) C.Jens., на низких кочках росли *S. magellanicum* Brid. и *S. capillifolium* (Ehrh.) Hedw.

Климатические характеристики района исследования, полученные по данным метеостанции Барабинск [17], приведены в табл. 1. Средняя годовая температура воздуха в течение 4 лет менялась от $-0,1$ до $2,8^{\circ}\text{C}$, при этом среднее многолетнее значение для данной территории за последние 30 лет (1981–2010 гг.) составило $1,2^{\circ}\text{C}$ [18]. Самым тёплым месяцем года являлся не только июль (2013 и 2016 гг.), но также июнь (2015 г.), а в 2014 г. близкие средние месячные температуры ($17,2$ – $17,9^{\circ}\text{C}$) наблюдались в течение трёх летних месяцев с максимумом в августе.

Таблица 1 [Table 1]

**Климатическая характеристика района исследования
по данным метеостанции Барабинск [17]
[Climatic characteristics of the study area according to Barabinsk meteorological station]**

Параметры [Parameters]	Годы [Years]			
	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16
Средняя годовая температура [Average annual temperature], $^{\circ}\text{C}$	$-0,1$	$2,0$	$2,0$	$2,8$
Средняя температура самого тёплого месяца [Average temperature of the warmest month], $^{\circ}\text{C}$	$18,7$	$17,9$	$19,6$	$19,8$
Средняя температура самого холодного месяца [Average temperature of the coldest month], $^{\circ}\text{C}$	$-25,5$	$-21,0$	$-15,2$	$-22,1$
Сумма положительных температур воздуха [Sum of positive temperatures], $^{\circ}\text{C}$	$2\ 324$	$2\ 378$	$2\ 595$	$2\ 717$
Сумма отрицательных температур воздуха [Sum of negative temperatures], $^{\circ}\text{C}$	$-2\ 365$	$-1\ 666$	$-1\ 808$	$-1\ 660$
Годовая сумма осадков, мм [Annual precipitations, mm]	513	330	429	417

Примечание. Здесь и далее началом года считается 1 октября предыдущего года, а окончанием – 30 сентября текущего года (так называемый «гидрологический год»), поскольку в календарном году холодный период разбивается летним периодом на два несвязанных временных отрезка, обобщённая метеорологическая характеристика которых не имеет смысла для возможной интерпретации биологических и биохимических процессов в летнее время, обусловленных текущими и предшествующими погодными условиями.

[Note. Hereinafter, the beginning of the year is considered October 1 of the previous year, and the end is September 30 of the current year (the so-called “Hydrological Year”), since in the calendar year, the cold period is broken by the summer into two unconnected time intervals, the generalized meteorological characteristics of which are purposeless for possible interpretation of biological and biochemical processes in the summer time which are due to current and previous weather conditions].

Минимальная средняя месячная температура воздуха в Барабе $-17,1^{\circ}\text{C}$ [18]. В течение изучаемого периода разброс средних месячных минимумов составил от -15 до -26°C , которые приходились не только на январь, но и на февраль (в 2014 г.), а также на декабрь зимой 2012/13 г. Средние месячные максимумы изменялись значительно меньше, наибольшая разница между годами не превысила 2°C . Годовая сумма средних суточных положительных температур воздуха увеличивалась из года в год, причём разница между 2013 и 2016 гг. составила почти 400°C . Сумма средних суточных отрицательных температур в течение периода наблюдений не отличалась постоянством, наименьшие абсолютные значения (по модулю) получены в 2014 и 2016 гг., а наибольшее – в 2013 г., максимальная разница между годами оказалась около 700°C .

Осенний устойчивый переход температур воздуха через 0°C происходил в первую декаду ноября, но в 2013 г. он пришёлся на последнюю декаду ноября, а в 2016 г. – на вторую декаду октября. В целом за наблюдаемый период зима наступала позже по сравнению с серединой XX в. [1]. Весенний переход температур через 0°C наблюдался, как правило, в первой декаде апреля, а в 2016 г. – в последней декаде марта.

В течение изучаемого периода сумма осадков оказалась выше по сравнению со среднемноголетней, которая составляет в Барабинском районе 380 мм [1, 18]. Доля осадков в летние месяцы составила 31–48% от годовых. Самым дождливым стало лето 2013 г., когда выпало 210 мм осадков. Наибольшее количество летних осадков выпадало обычно в июле и августе, а в 2016 г. – в июне и июле. В мае и июне осадки, как правило, скудны, от 13 до 27 мм в месяц, но май 2013 г. отличался дождливостью (64 мм). Максимальная мощность снежного покрова достигала к февралю–марту от 32 до 47 см в разные годы.

Для изучения температурного режима торфяной олиготрофной почвы Николаевского рьяма использовали автономный измеритель профиля температуры АИПТ (ИМКЭС СО РАН, г. Томск) [19], установленный в центральной части рьяма в крупной кочке. Температуру фиксировали на глубинах 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 120, 160, 240 и 320 см, частота измерений – один раз в час. Запись температуры с 05 октября 2012 г. до 22 мая 2017 г. с перерывом в период 24 мая – 25 сентября 2013 г. Датчик на глубине 320 см вышел из строя через 1,5 года работы, поэтому данные для этой глубины включены в немногие приводимые оценки.

Построение графиков, гистограмм и расчёт средних арифметических с определением ошибки средней выполнены в программе Microsoft Excel 7.0. Для выяснения тесноты связи параметров рассчитали коэффициент корреляции Пирсона в программе StatSoft STATISTICA 8.0.

Результаты исследования и обсуждение

Средняя месячная и средняя суточная температура почвы. В тёплое время года ход температуры в верхнем моховом слое рьяма совпадал с хо-

дом температур воздуха: коэффициент корреляции (k) между средними суточными значениями воздуха и поверхностного слоя болота составил 0,94 ($p < 0,0001$). В холодное время года температура воздуха значительно ниже, чем торфяной залежи, динамика хода средних месячных температур совпала лишь частично (рис. 1), k для средних суточных зимних значений составил 0,74 ($p < 0,0001$). В холодный период ход средних суточных температур воздуха и торфяной залежи совпадал только в начале ноября, когда снежный покров тонок и отсутствовала теплоизоляция наземного растительного покрова и торфяной залежи. Так, в ноябре 2012 г. при снижении температуры воздуха до -17°C температура мохового покрова на глубине 2 см опустилась до -11°C , а уже в середине декабря этого же года при снижении температуры воздуха до -39°C температура на этой же глубине оказалась выше: около -7°C . С января по март температура в верхнем слое болота оставалась в пределах $-2 \dots -6^{\circ}\text{C}$ во все годы наблюдений.

Наибольшие средние месячные температуры верхнего мохового слоя болота зафиксированы в июне или июле и повышались от $18,4$ до $20,2^{\circ}\text{C}$ в течение 2014–2016 гг. В верхнем 20-сантиметровом слое разница температуры между годами составила $1,5\text{--}1,8^{\circ}\text{C}$, а с глубины 30 см и ниже сократилась до $0,5\text{--}0,7^{\circ}\text{C}$. В течение лета прогревание верхнего 20-сантиметрового слоя, где отсутствовали болотные воды и сосредоточены корневые системы растений и живые мхи, происходило равномерно (средняя месячная температура $17\text{--}20^{\circ}\text{C}$), разница между глубинами 2 и 20 см составляла около $1,5^{\circ}\text{C}$ для каждого летнего периода (см. рис. 1). На глубине 30 и 40 см, где периодически присутствовали болотные воды, температура снижалась более существенно: на $1,5\text{--}2^{\circ}\text{C}$ каждые 10 см. В нижележащих постоянно насыщенных болотными водами слоях дальнейшее уменьшение средней месячной температуры на $1\text{--}1,5^{\circ}\text{C}$ происходило через каждые 10 см до глубины 80 см. Средняя месячная температура летом на протяжении второго метра залежи не превышала 9°C , на глубине 2,4 м – 5°C , а на глубине 3,2 м – 4°C .

Максимальные средние суточные температуры в поверхностном слое болота зафиксированы также в июне и июле, составив $24,7^{\circ}\text{C}$ в 2014–2015 гг. и $23,2^{\circ}\text{C}$ в 2016 г., а температура воздуха в соответствующие дни этих же лет достигала $25,9$; $26,3$ и $24,2^{\circ}\text{C}$.

В зимний период вся торфяная толща обычно охлаждалась до средних месячных температур не ниже -6°C , в то время как средняя месячная температура воздуха опускалась ниже -20°C в феврале 2014 г. и январе 2016 г. и изменялась от -15 до -17°C в январе 2015 и 2017 гг. В то же время самые низкие средние суточные температуры верхней толщи торфяной залежи приходились всегда на ноябрь, опускаясь до $-11 \dots -17^{\circ}\text{C}$, когда ещё не сформирован теплоизолирующий снежный покров и низкие температуры проникают вглубь мохово-торфяной толщи. Так, в 2012 и 2014 гг. минимум температуры на глубине 2 см составил $-10,9$ и $-11,3^{\circ}\text{C}$ при температуре воздуха $-17,3$ и $-18,9^{\circ}\text{C}$ соответственно. В ноябре 2015 и 2016 гг. зафиксированы сильные

морозы со средней суточной температурой воздуха $-22,0$ и $-28,7^{\circ}\text{C}$, температура поверхностного слоя болота оставалась $-15,7$ и $-15,4^{\circ}\text{C}$ соответственно. В 2013 г. ноябрь оказался аномально тёплым, температура воздуха не опускалась ниже -9°C и температура верхнего слоя болота составила $-5,4^{\circ}\text{C}$.

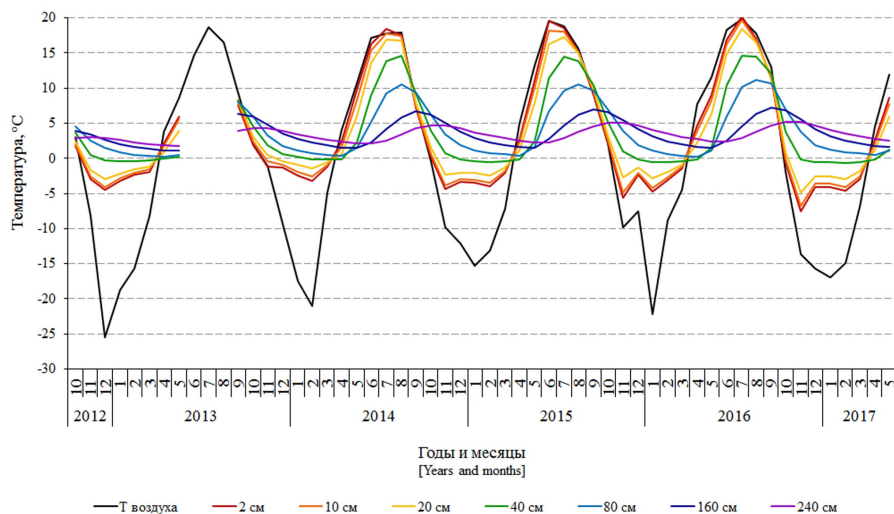


Рис. 1. Динамика хода средних месячных температур воздуха (по данным метеостанции Барабинск) и торфяной залежи на разных глубинах
[Fig. 1. Dynamics of monthly air temperature (according to Barabinsk meteorological station) and peat deposit temperature at different depths.
On the X-axis - Years and months; on the Y-axis - Temperature, $^{\circ}\text{C}$]

Средние месячные зимние температуры (с ноября по февраль) поверхностного слоя болота снижались год от года, начиная с $-2,0^{\circ}\text{C}$ в 2013/14 г. до $-5,1^{\circ}\text{C}$ в 2016/17 г., хотя более суровые и более мягкие зимы чередовались в течение времени наблюдений. Отрицательные температуры проникали до глубины 40 см во все годы, а в марте–апреле 2016 г. отмечены на глубине 60 см. Ниже 60 см средняя месячная и средняя суточная температура залежи всегда оставалась в зоне положительных значений. Начиная с глубины 40 см и ниже, разница по годам между минимальными средними месячными температурами составила $0,2\text{--}0,6^{\circ}\text{C}$, в то время как в верхней 20-сантиметровой толще $-3,5\text{--}4,3^{\circ}\text{C}$.

В отличие от такого же болота в южной тайге Западной Сибири [12] в торфяной залежи Николаевского рьяма средние месячные летние температуры выше, а зимние температуры сходны.

Суточные колебания температур имели место в летнее время, и уже на глубине 30 см они составляли около 2°C , а на глубине 40 см – отсутствовали. В то же время в южнотаёжном болоте суточные колебания затухали уже на глубине 15–25 см [9]. Очевидно, более низкое стояние болотных вод Николаевского рьяма определяет большую глубину проникновения суточных колебаний. Изменение температур в связи с кратковременными погодными

флуктуациями длительностью в несколько дней отражалось на динамике температур до глубины 40 см. В нижележащих слоях тепловые волны связаны только с годовой динамикой температур.

Характер запаздывания тепловой волны в верхнем аэрируемом слое торфяной залежи различался в разные годы в зависимости от гидрологических и погодных условий. Так, в 2014 г. запаздывание максимума температуры на месяц отмечено на глубине 30 см, а в 2015 г. – уже на глубине 15 см, и в этом году максимум в поверхностном слое наблюдался в июне, а не в июле, как в другие годы. В 2016 г. во всей толще 2–40 см сдвига температурного максимума, который приходился на июль, по данным средних месячных значений, не наблюдалось. Это можно связать с тем, что в этом году болотные воды стояли высоко, снижаясь от 8 см в конце апреля лишь до 25 см в конце июля, и только осенью они упали ниже 60 см. В залежи ниже 60 см, где постоянно присутствовали болотные воды, динамика запаздывания тепловой волны одинакова из года в год: в слое 60–80 см максимальные месячные температуры зафиксированы в августе, в слое 120–160 см – в сентябре, на глубине 240 см – в октябре, а на глубине 320 см – в декабре, т.е. здесь запаздывание составило 5–6 мес относительно поверхности.

Средние годовые значения температур, годовая амплитуда и сумма температур. Средняя годовая температура составила на глубине 2 см 4,8–5,1°C, почти не изменилась на глубине 20 см (4,7–5,1°C), уменьшилась на глубине 60 см до 4,3–4,6°C и упала на глубине 240 см до 3,3–3,7°C. В каждый год наблюдений отмечено небольшое увеличение средних годовых значений на глубинах 5 и 20 см. Полученные для поверхностного слоя значения на 0,6–0,9°C выше, чем в южной тайге, и снижение температуры с глубиной в Николаевском р-не существеннее, чем в южной тайге, где годовая температура мало менялась ниже 20 см [12].

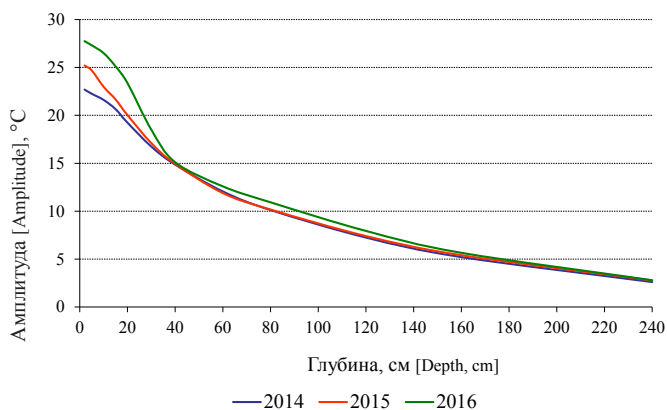


Рис. 2. Годовая амплитуда температур на разных глубинах торфяной залежи
[Fig. 2. Annual amplitude of temperatures at different depths in the peat deposit. On the X-axis - Depth, cm; on the Y-axis - Amplitude, °C]

Годовая амплитуда температуры почвы на глубине 20 см позволяет оценить степень континентальности почв [20]. Амплитуда составила 19,2; 20,0 и 23,4°C с 2014 по 2016 г., что для минеральных почв соответствует умеренному континентальному климату. Годовые амплитуды снижались вниз по профилю (рис. 2). В верхних 30 см разница между годами составила 2–3°C, а в нижележащей торфяной залежи амплитуда оставалась стабильной, разницы между годами не наблюдалось. По сравнению с южно-таёжным болотом [12], амплитуда в лесостепном ряме оказалась выше на глубине 2 см на 4–9°C и на глубине 80 см – на 4°C.

Сумма положительных средних суточных температур характеризует теплообеспеченность биоты. Этот показатель в поверхностном слое болота составил от 2200 до 2400°C, увеличиваясь из года в год (рис. 3). В это же время сумма положительных средних суточных температур воздуха равнялась 2400–2700°C, т.е. поверхность болота весьма эффективно аккумулирует тепло в течение вегетационного периода. До глубины 20 см эта величина снижалась медленно, и составила здесь 2000–2200°C. Между 20 и 30 см сумма температур снижалась быстрее, а глубже снижение опять замедлилось в связи с постоянным присутствием болотных вод. На глубине 2,4 м сумма положительных температур на 1000°C меньше, чем в поверхностном слое.

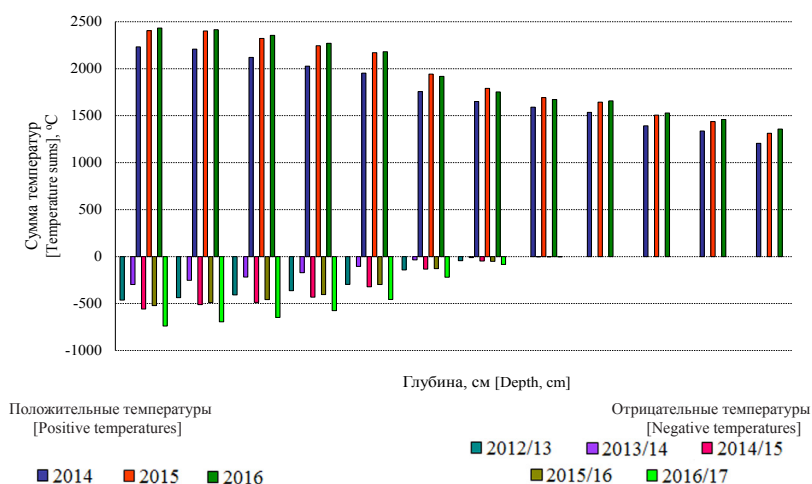


Рис. 3. Сумма положительных и отрицательных температур на разных глубинах торфяной залежи

[Fig. 3. The sum of positive daily temperatures is shown by hatching, the sum of negative daily temperatures - by solid filling. On the X-axis - Depth, cm; on the Y-axis - Temperature, °C]

Сумма отрицательных средних суточных температур, как и сумма положительных температур, имела тенденцию увеличения (по модулю) в течение пяти зимних периодов. В то же время сумма отрицательных температур воздуха составила ниже –2100°C в 2012/13 и 2016/17 гг.; –1660...–1665°C в

2013/14 и 2015/16 гг.; и около -1880°C в 2014/15 г., т.е. динамика изменения этого параметра для воздуха и мохово-торфяной залежи не совпадает в связи с изменением по годам мощности и времени установления снежного покрова, который оказывает существенную роль в температурном режиме почв в зимний период. Так, в наиболее холодную зиму 2012/13 г. первый снег выпал позже обычного, но его накопление шло интенсивно в начале зимы, так что слой снега мощностью 20 см сформировался к 13 ноября. В такую же суровую зиму 2016/17 г. слой снега той же мощности сформировался к 24 ноября. Зимой 2013/14 г. снежный покров установился только 2 декабря, когда после обильного снегопада его мощность стала 15 см, однако высокое стояние болотных вод осенью и аномально тёплая погода в предыдущий период с суммой отрицательных температур в 3–4 раза меньшей, чем в другие годы за этот же отрезок времени, обусловила минимальную сумму отрицательных температур в эту зиму. С глубиной сумма отрицательных температур плавно уменьшалась: слабо – в верхнем десятисантиметровом слое и резко – в нижележащей толще. С глубины 60 см отрицательные температуры отсутствовали.

Солнечная энергия активно преобразуется и аккумулируется в почве в процессе теплообмена между приземным воздухом, приземным растительным покровом, почвой и почвообразующей породой [21]. Поэтому отношения суммы температур почвы к суммам температур воздуха – это интегральный показатель, который характеризует способность и степень прогреваемости почвы, что имеет важнейшее значение в биологических и физико-химических процессах. Одним из таких показателей являются N-факторы, которые рассчитываются как отношение суммы средних суточных температур поверхности почвы к сумме средних суточных температур воздуха. Они различаются в разных почвенно-растительных типах (биогеоценозах) и могут быть инструментом параметризации при моделировании температурного режима [22, 23]. Мы рассчитали отношение суммы средних суточных температур на глубине 2 см от поверхности мохового покрова к сумме средних суточных температур воздуха, поскольку отсчёт глубины в нашем исследовании вёлся от поверхности болота, а верхние 2 см в таких болотах – это слой живых сфагновых мхов. Ещё один общепринятый термический показатель рассчитывают как отношение суммы средних суточных температур почвы на глубине 20 см к сумме средних суточных температур воздуха [20, 21] (табл. 2). Соотношение положительных температур снизилось с 2014 к 2016 г., что говорит о снижении поглощения тепла поверхностью болота в течение этих лет. Напротив, соотношение отрицательных температур, которое характеризует аккумуляцию холода в залежи, оказалось ниже в течение первых двух зим и возросло в последующие три зимних периода. Низкую аккумуляцию холода в зиму 2012/13 г. мы связываем с интенсивным снегонакоплением в начале зимы, когда уже к 13 ноября мощность снежного покрова достигла 20 см, в то время как в остальные зимние пе-

риоды в это же время мощность снежного покрова составляла около 10 см. В следующую зиму 2013/14 г. накопление снега, наоборот, шло медленно, а низкая аккумуляция холода вызвана аномально тёплой погодой в течение октября–ноября, о чём сказано выше, а также нетипично высоким уровнем стояния болотных вод (на глубине около 20 см).

Таблица 2 [Table 2]

Соотношения сумм положительных и отрицательных температур на глубине 2 см (в числителе) и 20 см (в знаменателе) к положительным и отрицательным суммам температуры воздуха
[Ratio of positive and negative temperature sums at a depth of 2 cm (in the numerator) and 20 cm (in the denominator) to positive and negative sums of air temperatures]

Суммы температур [Temperature sums]	Годы [Years]				
	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17
Положительные [Positive]	Нет данных [No data]	0,96 / 0,82	0,93 / 0,84	0,90 / 0,80	Нет данных [No data]
Отрицательные [Negative]	0,20 / 0,13	0,18 / 0,06	0,31 / 0,18	0,31 / 0,18	0,34 / 0,21

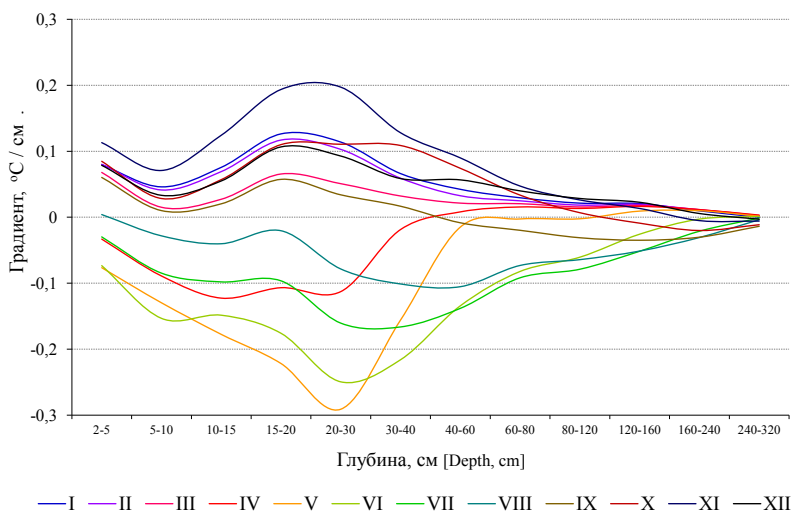


Рис. 4. Усреднённые по годам градиенты температуры ($^{\circ}\text{C} / \text{cm}$) на разных глубинах, распределённые по месяцам

[Fig. 4. Temperature gradients averaged over the years ($^{\circ}\text{C} / \text{cm}$) at different depths and distributed by months. On the X-axis - Depth, cm; on the Y-axis - Gradient, $^{\circ}\text{C} / \text{cm}$]

Увеличение суровости климата в течение наблюдаемых лет не противоречит концепции о глобальном климатическом потеплении, поскольку есть модели, предсказывающие при потеплении климата увеличение зимних осадков и, в многоснежных районах, понижение минимальной температуры почвы, что показано для северных регионов США [24].

Градиенты температуры. Градиенты температуры залежи оказались схожи в одни и те же месяцы разных лет. Поэтому на рис. 4 приведены усреднённые по годам изменения градиентов с глубиной для каждого месяца. Градиенты температуры являются положительными, когда поток тепла направлен из почвы в атмосферу, т.е. происходит остывание торфяной залежи, и отрицательными, когда поток тепла направлен в обратном направлении, т.е. происходит прогревание почвы.

В зимние месяцы, с декабря по февраль, изменения градиентов с глубиной идентичны, и градиенты имеют невысокие положительные значения с максимальными значениями от 0,107 до 0,126 °C/см на глубине 15–30 см, где постепенно затухает проникновение волны холода. Самые высокие положительные градиенты получены для ноября, когда происходит интенсивное остывание и наибольшее промерзание почвы. Почти одинаковые и минимальные положительные градиенты (до 0,065 °C/см на глубине 15–20 см) отмечены в марте и сентябре с той разницей, что в марте градиенты всегда положительны, а в сентябре становятся отрицательными в слое ниже 40 см, когда запаздывающая тепловая волна достигает глубоких слоёв.

Отрицательные градиенты температуры характерны для тёплого времени года – с апреля по август. Наибольшие значения (по модулю) получены для мая во время интенсивного прогревания. В течение лета, с насыщением торфяной залежи теплом, они постепенно уменьшались, а также происходил сдвиг максимальных значений с глубины 20–30 см на глубину 40–60 см вслед за падением уровня болотных вод, которые, по-видимому, ограничивают максимальные абсолютные значения градиентов, поскольку здесь проходит граница аэрируемого и насыщенного водой слоёв торфа. В отличие от Николаевского яма, в южнотаёжном верховом болоте более высокое стояние болотных вод обусловило наибольшие абсолютные значения летних градиентов в слое от 10 до 20 см [9].

Динамика промерзания и оттаивания. Осенью и весной, перед установлением стабильных отрицательных или положительных температур в почве, всегда присутствовал переходный период, в течение которого температура колебалась вокруг нулевой отметки в течение суток или нескольких дней. Осенью в поверхностном слое болота он наступал с 30 сентября (в 2014 г.) по 15 октября (в 2012 г.) и заканчивался между 18 октября (в 2016 г.) и 7 ноября (в 2013 г.), так что его длительность составляла от 12 до 25 дней в слое 2–15 см (рис. 5). Наибольшая длительность этого периода отмечена в 2013 и 2014 гг. С глубиной происходило его смещение на более поздние сроки и сокращение длительности. Так, на глубине 15–20 см он наступал в период 4 октября – 21 ноября и продолжался 8–17 дней. На глубине 30–40 см переходного периода не наблюдалось, температура в течение одного дня опускалась до минусовых значений, за исключением осени 2012 г.

Весной такой же период температур, колеблющихся выше и ниже нулевой отметки, начинался и заканчивался между 2 апреля и 21 мая и очень

быстро охватывал весь сезонномёрзлый слой. Из-за постоянных ночных заморозков в 2014 г. его длительность достигла 49 дней, в 2015 и 2017 гг. составила 21–25 дней, а в 2013 и 2016 гг. – 12–17 дней. С глубиной длительность этого периода также снижалась, обычно пропорционально длительности в поверхностном слое. В то же время в 2014 г., когда положительные и отрицательные температуры в верхнем слое сменялись на протяжении 2,5 мес, сезонная мерзлота на глубине 40 см исчезла в течение двух дней, а в 2016 г., когда для установления постоянных положительных температур в верхнем слое понадобилось менее двух недель, на глубине 40 см этот период растянулся почти на месяц.

Таблица 3 [Table 3]

Длительность безморозного периода (в числителе) и длительность периода с положительными средними суточными температурами (в знаменателе)
[The duration of the frost-free period (in the numerator) and the duration of the period with positive average daily temperatures (in the denominator)]

Глубина, см [Depths, cm]	Годы [Years]				Максимальная разни- ца между годами, дни [Maximum difference between years, days]
	2013	2014	2015	2016	
2	168 / 202	132 / 196	133 / 193	170 / 194	38 / 9
5	173 / 207	132 / 200	133 / 202	170 / 195	41 / 12
10	181 / 206	132 / 197	133 / 205	170 / 192	49 / 14
15	182 / 207	152 / 196	187 / 204	170 / 192	35 / 15
20	201 / 218	161 / 197	187 / 209	172 / 196	40 / 22
30	245 / 251	153 / 201	191 / 208	191 / 203	92 / 50
40	282 / 286	182 / 212	198 / 202	179 / 194	103 / 92

Длительность безморозного периода рассчитывают по числу дней между последней зафиксированной отрицательной температурой в весенний период и первой отрицательной температурой в осенний период [25]. Мы рассчитали этот показатель для мохово-торфяной залежи рьяма, поскольку с ним связано функционирование почвенной биоты, включая корневые системы растений. Разница в длительности безморозного периода между годами достигала 1–1,5 мес в верхнем аэрируемом 20-сантиметровом слое (табл. 3). В слое 30–40 см, который непостоянно находится в зоне влияния болотных вод, длительность периода увеличивалась и достигала около 100 дней. В отличие от предыдущего параметра, продолжительность периода с температурой выше 0°C учитывает число дней с положительной средней суточной температурой, которые могут перемежаться с днями, когда средняя суточная температура отрицательна. Этот показатель оставался более стабильным в течение изучаемого периода, составив 196 ± 2 дня в поверхностном слое (см. табл. 3). До глубины 20 см разница по годам увеличивалась до трёх недель, а на глубине 30 и 40 см составила 50 и 92 дня соответственно.

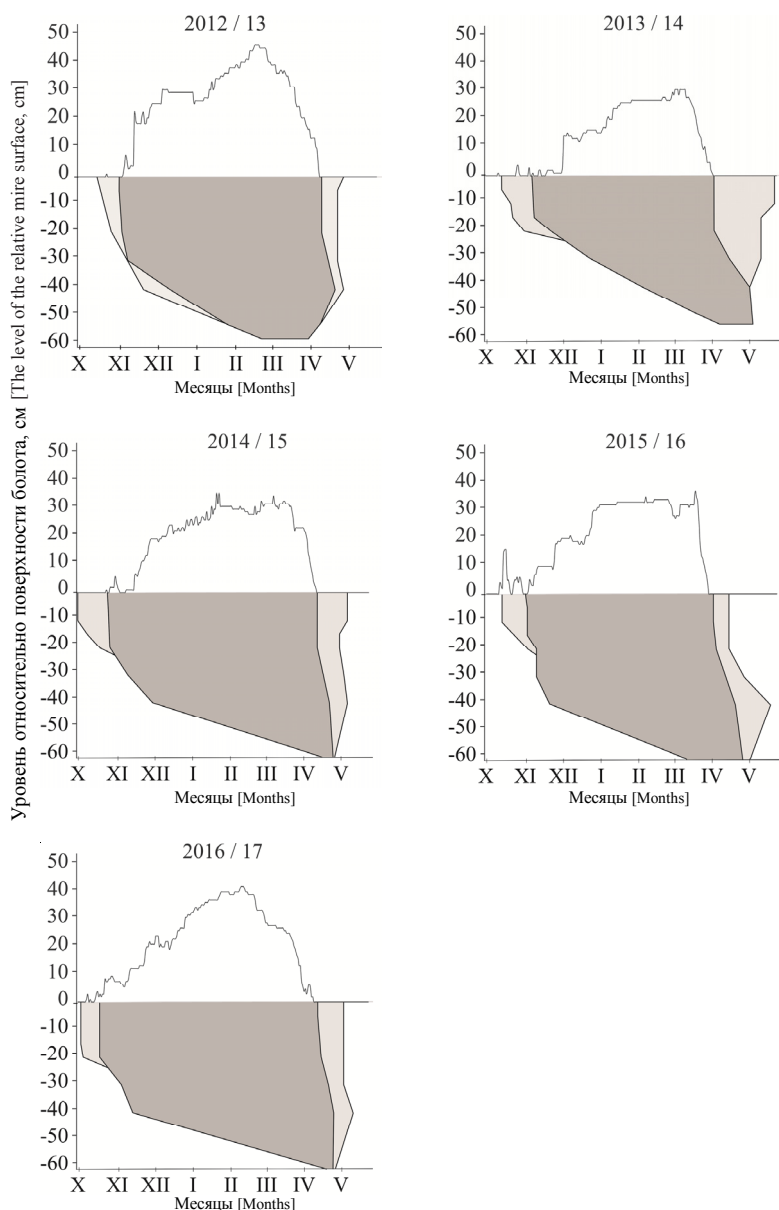


Рис. 5. Динамика высоты снежного покрова (по данным метеостанции Барабинск [17]) и глубины сезонномерзлого слоя в разные годы наблюдений. Тёмной заливкой показан слой с постоянными отрицательными температурами, светлой – период чередующегося промерзания-оттаивания. Расчёт глубины промерзания зимой 2012/13 и 2013/14 гг. проведён стандартным методом [25]

[Fig. 5.] Dynamics of snow cover depth (according to Barabinsk meteorological station [17]) and the depth of the seasonally frozen layer in different years of the study. Dark fill shows a layer with constant negative temperatures, light fill shows a period of alternate freezing-thawing. Calculation of the freezing depth in winter 2012/13 and 2013/14 was carried out by the standard method [25]

Поскольку у основных продуцентов верховых болот, сфагновых мхов, фотосинтез начинается при температуре воздуха чуть выше нулевой, когда снег полностью ещё не сошёл [26], данный показатель может оказаться более информативным при рассмотрении условий функционирования болотных экосистем по сравнению с параметром «длительность безморозного периода». Интересно, что число дней с непрерывными отрицательными температурами на глубине 2 см в Николаевском ряме составило 161 ± 5 , а в более северном болоте южной тайги – 151 ± 20 [12], что можно связать как с более мягким почвенным климатом в условиях большей обводнённости и принадлежности к огромному болотному массиву южнотаёжного болота, так и с многолетними климатическими флуктуациями, так как в южной тайге исследования проводились раньше. Глубина промерзания торфяной залежи достигала в апреле 60 см в последние три года наблюдений (рис. 5). При этом в южной тайге в те же годы наблюдений максимальные глубины промерзания менялись в двух рядах от 31 до 52 см, составив в среднем 38 см [27]. Медленное промерзание зимой 2013/14 г. объясняется как тёплой осенней погодой, так и необычно высоким уровнем стояния болотных вод (около 20 см) при наступлении зимы. Весной оттаивание наступало почти сразу по всей глубине после схода снежного покрова. На нашем болоте мерзлота полностью исчезала в начале мая, в то время как в южной тайге исчезновение мёрзлого слоя происходило в мае–июне [12].

Весенний реверс температур в верхней метровой толще торфяной залежи происходил почти синхронно на разных глубинах в апреле, а осенний реверс продолжался с сентября по октябрь.

Температурный режим торфяных олиготрофных почв в лесостепной зоне Западной Сибири определяется рядом факторов: ходом температуры воздуха; степенью обводнённости и уровнем стояния болотных вод; для зимнего периода – мощностью и временем установления снежного покрова. По сравнению с такими же почвами южной тайги, которые характеризуются сходным ботаническим составом торфа и аналогичным фитоценозом, произрастающим на них, торфяные олиготрофные почвы лесостепи отличаются увеличением мощности деятельного слоя и возрастанием континентальности почвенного климата, что обусловлено более низким стоянием болотных вод.

Выводы

1. В тёплый период года температурный режим мохово-торфяной толщи верховых болот Западно-Сибирской лесостепи определяется ходом летних температур и уровнем стояния болотных вод. В зимний период температурный режим торфяной залежи в меньшей степени определяется ходом температур воздуха и зависит от наличия и времени установления снежного покрова и уровня стояния болотных вод в осенний период. Критическим периодом являются октябрь и ноябрь, когда снежный покров ещё не обе-

спечивает теплоизоляцию. Самые низкие средние суточные температуры почвы приходится на ноябрь.

2. В течение изучаемого периода наблюдалось усиление континентальности почвенного климата, которое проявлялось в увеличении абсолютных значений сумм положительных и отрицательных температур, понижении глубины промерзания торфяной толщи, а также увеличении годовой амплитуды верхнего 40-сантиметрового слоя.

3. Температурный режим в моховом покрове и торфяной почве в поверхностном слое до 40 см зависит от многолетней динамики болотных вод, характеризуется максимальной контрастностью температурных условий, является изменчивым по годам, что должно оказывать влияние на различия в режиме функционирования биоценоза по годам.

4. Температурный режим торфяной залежи ниже 40 см консервативен в связи с постоянным присутствием болотных вод, что определяет одинаковые годовую амплитуду и ход тепловой волны вглубь, отсутствие отрицательных температур, наиболее низкие градиенты температур.

5. По сравнению с такими же почвами в южной тайге торфяные олиготрофные почвы лесостепной зоны отличаются более высокими средними значениями летних температур, большей глубиной затухания суточных колебаний температуры, более существенным снижением средних годовых температур с глубиной, большей годовой амплитудой по профилю, большей глубиной распространения максимальных температурных градиентов, более ранними сроками исчезновения сезонной мерзлоты, а также большей длительностью периода с отрицательными температурами и большей глубиной промерзания, что в целом указывает на более континентальные условия в торфяной почве лесостепи по сравнению с южной тайгой в связи с низким стоянием болотных вод.

Литература

1. Ступина Н.М. Зона лесостепи // Западная Сибирь / под ред. Г.Д. Рихтера. М. : Изд-во АН СССР, 1963. С. 376–390.
2. Валуцкий В.И. Растительность лесостепных рямов в Восточной Барабе // Turczaninowia. 2011. № 14(1). С. 109–119.
3. Васильев И.С. О связи температуры почвогрунтов с индексом замерзания и высотой снежного покрова в Якутии в конце XX столетия // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII, № 1. С. 17–23.
4. Дюкарев Е.А. Влияние температуры воздуха и снежного покрова на характеристики сезонномёрзлого слоя почвогрунтов // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX, № 3. С. 45–51.
5. Шерстюков А.Б. Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова на территории России // Криосфера Земли. 2008. Т. XII, № 1. С. 89–87.
6. Скрябин П.Н., Варламов С.П. Термический режим грунтов нарушенных ландшафтов центральной Якутии // Криосфера Земли. 2013. Т. XVII, № 3. С. 44–49.
7. Park H., Sherstiukov A.B., Fedorov A.N., Polyakov I.V., Walsh J.E. An observation-based assessment of the influences of air temperature and snow depth on soil temperature in

- Russia // Environmental Research Letters. 2014. Vol. 9. 064026 (7pp). doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/6/064026>
8. Дюкарев Е.А. Прогноз глубины промерзания почвы с помощью простейшей регрессионной модели // Вестник Томского государственного университета. 2014. № 387. С. 266–270.
 9. Дюкарев Е.А., Головацкая Е.А., Дучков А.Д., Казанцев С.А. Экспериментальное исследование температурного режима торфяной залежи Бакчарского болота (Западная Сибирь) // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 6. С. 745–754.
 10. Hu G., Liu H., Anenkhonov O.A., Korolyuk A.Yu., Sandanov D.V., Guo D. Forest buffers soil temperature and postpones soil thaw as indicated by a three-year large-scale soil temperature monitoring in the forest-steppe ecotone in Inner Asia // Global and Planetary Change. 2013. Vol. 104. PP. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.02.002>
 11. Дюкарев Е.А. Амплитуда суточного хода температуры торфяной почвы // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 365. С. 201–205.
 12. Дюкарев Е.А., Головацкая Е.А. Особенности температурного режима торфяной залежи олиготрофного болота в южной тайге Западной Сибири // География и природные ресурсы. 2013. № 1. С. 65–71.
 13. Soudzilovskaia N.A., Bodegom P.M. van, Cornelissen J.H.C. Dominant bryophyte control over high-latitude soil temperature fluctuations predicted by heat transfer traits, field moisture regime and laws of thermal insulation // Functional Ecology. 2013. doi: <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12127>
 14. Киселёв М.В., Воропай Н.Н., Дюкарев Е.А. Температурный режим почв осоково-сфагновой топи верхового болота в южной тайге Западной Сибири // География и природные ресурсы. 2017. № 3. С. 110–117.
 15. Классификация и диагностика почв России / авт. и сост.: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск : Ойкумена, 2004. 342 с.
 16. Степанова В.А., Волкова И.И. Особенности генезиса Николаевского яма в лесостепи Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2017. № 40. С. 202–223.
 17. Расписание погоды: банк гидрометеорологических данных. URL: <http://rp5.ru> (дата обращения: 16.11.2017).
 18. Климат городов мира (1981–2010 гг.): – ежемесячные данные: банк данных Гидрометцентра России. М., 2018. URL: <https://meteoinfo.ru/climatcities> (дата обращения: 16.10.2018).
 19. Кураков С.А., Крутиков В.А., Ушаков В.Г. Автономный измеритель профиля температуры АИПТ // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 5. С. 166–167.
 20. Димо В.Н. Тепловой режим почв СССР. М. : Колос, 1972. 360 с.
 21. Трофимова И.Е., Балыбина А.С. Районирование Западно-Сибирской равнины по термическому режиму почв // География и природные ресурсы. 2015. № 3. С. 27–38.
 22. Klene A.E., Nelson F.E., Shiklomanov N.I. The N-factor in natural landscapes: variability of air and soil-surface temperatures, Kuparuk river basin, Alaska, U.S.A. // Arctic, Antarctic, and Alpin Research. 2001. Vol. 33, № 2. PP. 140–148.
 23. Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Бобрик А.А., Москаленко Н.Г., Пономарева О.Е. Температурные режимы северотаёжных почв Западной Сибири в условиях островного распространения многолетнемерзлотных пород // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1462–1473.
 24. Brown P.J., DeGaetano A.T. A paradox of cooling winter soil surface temperatures in a warming northeastern United States // Agricultural and Forest Meteorology. 2011. Vol. 151, № 7. PP. 947–956. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.02.014>
 25. Методы климатологической обработки метеорологических наблюдений / под общ. ред. О.А. Дроздова. Л. : Гидрометеиздат, 1957. 492 с.

26. Moore T.R., Lafleur P.M., Poon D.M.I., Heumann B.W., Seaquist J.M., Roulet N.T. Spring photosynthesis in a cool temperate bog // *Global Change Biology*. 2006. Vol. 12. PP. 2323–2335. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01247.x>
27. Kiselev M.V., Dyukarev E.A., Voropay N.N. Features of seasonal temperature variations in peat soils of oligotrophic bogs in south taiga of Western Siberia // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 138. 012006. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/138/1/012006>

*Поступила в редакцию 20.06.2018 г.; повторно 04.11.2018 г.;
принята 25.12.2018 г.; опубликована 21.03.2019 г.*

Авторский коллектив:

Коронатова Наталья Геннадьевна – канд. биол. наук, с.н.с. лаборатории биогеоценологии, Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2).

E-mail: coronat@mail.ru

Миронычева-Токарева Нина Петровна – канд. биол. наук, зав. лабораторией биогеоценологии, Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2).

E-mail: mirtok@issa-siberia.ru

For citation: Koronatova NG, Mironycheva-Tokareva NP. Temperature regime of peat deposit of ombrotrophic bogs in the forest-steppe zone of Western Siberia (the example of the Nikolayevsky ryam). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = *Tomsk State University Journal of Biology*. 2019;45:190-209. doi: 10.17223/19988591/44/10 In Russian, English Summary

Nataliya G. Koronatova, Nina P. Mironycheva-Tokareva

*Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation*

Temperature regime of peat deposit of ombrotrophic bogs in the forest-steppe zone of Western Siberia (the example of the Nikolayevsky ryam)

Ombrotrophic raised bogs in the forest-steppe zone of Western Siberia are at the extreme southern limit of their distribution and exist under conditions of insufficient moisture and are surrounded by saline soils. In the changing climate, it is especially important to carry out regime observations of various components of such ecosystems. The aim of this research was to reveal peculiarities of temperature regime of fibrist histosol at a pine - dwarf shrub - *Sphagnum* raised bog in the Baraba forest-steppe of Western Siberia.

We carried out the study at a pine - dwarf shrub - *Sphagnum* raised bog, Nikolaevsky ryam (55°08'59"N, 79°02'59"E). An autonomous soil temperature measurement system (IMCES SB RAS, Tomsk) was used. Temperature was registered at depths of 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 120, 160, 240 and 320 cm once per hour, the duration of the study was 4.5 years (05.10.2012-22.05.2017). We used data of Barabinsk meteorological station on air temperature, precipitations and snow cover depth (*See Table 1*).

Average annual temperature of the fibrist histosol in 2-20 cm layer was 4.7-5.1°C and it decreased at a depth of 240 cm to 3.3-3.7°C. The highest average monthly temperatures of the upper peat layer were 18.4-20.2°C in summer months, and the lowest ones were -2.0...-5.1°C and were recorded from November to February. Simultaneously, monthly air temperatures were -15...-26°C (*See Fig. 1*). Average

daily temperatures of the peat deposit were always minimal in November, reaching $-11...-17^{\circ}\text{C}$ due to the low thickness of thermal insulating snow cover. The annual soil temperature amplitude in the upper 20 cm ranged from 19 to 23°C in different years, and it did not change over the years below 40 cm and decreased from 12°C at a depth of 60 cm to 3°C at a depth of 240 cm (See Fig. 2). Soil temperatures were always positive below 60 cm. The sum of positive average daily temperatures in the surface layer of the bog ranged from 2200 to 2400°C , at a depth of 20 cm it decreased by 200°C , and at a depth of 2.4 m the sum of positive temperatures decreased by 1000°C in comparison with the surface layer. The sum of negative average daily temperatures was $-1660 ... -2100^{\circ}\text{C}$ in different years of observations (See Fig. 3). The dynamics of changes in the sums of negative temperatures for air and for peat soil do not coincide due to the change in thickness and time of establishment of snow cover and the different water table depths that have a significant role in the temperature regime of the soil in winter. The ratio of the sums of positive and negative temperatures at a depth of 2 cm (under a layer of live *Sphagnum* mosses) and 20 cm to the corresponding sums of air temperatures characterizes the soil warm-accumulating ability. During several years, these indicators decreased for positive temperatures and increased for negative ones, indicating an increase in soil climate severity (See Table 2). Temperature gradients are positive when the heat flux flows from the soil to the atmosphere, and the peat deposit cools down; and negative when the heat flows in the opposite direction and the soil is heated. We observed the maximum temperature gradients in the layer of 15–30 cm, it is the largest negative value typical of May when the soil is intensively warmed, and they gradually decrease during the summer (See Fig. 4). Freezing of the soil took place in October–November; at this time the freezing depth reached 40 cm, and then slowly descended during the winter. High water table standing and warm weather in autumn 2013/14 caused a decrease in the depth of freezing to 20 cm at the beginning of winter. In the spring, the thawing of peat deposit began immediately after the snow had melted and for a few days covered the entire freeze layer (See Fig. 5). The duration of the frost-free period in the moss carpet (at a 2 cm depth) varied from 132 to 170 days, while the number of days with positive average daily temperatures was more stable, 161 ± 5 days (See Table 3). During the observation period, average summer temperatures, the sum of average daily positive temperatures and the sums of negative average daily temperatures (absolute values) increased, as well as average winter temperatures decreased and the depth of freezing lowered. The weather conditions of November were crucial for soil temperature regime during the winter due to air temperature and time of onset of snow cover with 15 cm thickness or more as well as the water table depth in autumn. In comparison with the same soils of the southern taiga, fibrist histosols in the forest-steppe were distinguished by an enlargement in acrotelm thickness and an increase in continentality of soil climate, which were due to the deeper water table. This is expressed in higher average values of summer temperatures, a greater depth of attenuation of daily temperature fluctuation, a more substantial decrease in average annual temperatures with the depth, greater annual amplitude along the profile, greater depth of maximum temperature gradients, an earlier seasonal permafrost melting, as well as a longer duration of periods with negative temperatures and a greater depth of freezing.

The paper contains 5 Figures, 3 Tables and 27 References.

Keywords: pine-dwarf shrub-*Sphagnum* raised bog; ryam; forest-steppe zone; autonomous soil temperature measurement system.

Funding: This research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Project No 16-55-16007).

Acknowledgments: The authors sincerely thank the anonymous Reviewer, whose careful work has greatly improved the paper.

References

1. Stupina NM. Zona lesostepi [Forest-steppe zone]. In: *Zapadnaya Sibir'* [Western Siberia]. Rikhter GD editor. Moscow: AN SSSR Publ.; 1963. pp. 376-390. In Russian
2. Valutskiy VI. Rastitel'nost' lesostepnykh ryamov v vostochnoy Barabe [Vegetation of forest-steppe rams in the eastern part of Baraba]. *Turczaninowia*. 2011;14(1):109-119. In Russian
3. Vasiliev IS. Relation between soil temperature, freezing index and snow depth in Yakutia at the end of the 20th century. *Earth's Cryosphere*. 2009;13(1):17-23.
4. Dyukarev EA. Influence of air temperature and snow cover on characteristics of seasonally frozen soil layer. *Earth's Cryosphere*. 2015;19(3):45-51.
5. Sherstyukov AB. Correlation of soil temperature with air temperature and snow cover depth in Russia. *Earth's Cryosphere*. 2008;12(1):79-87. In Russian
6. Skryabin PN, Varlamov SP. Ground thermal regime in disturbed landscapes of central Yakutia. *Earth's Cryosphere*. 2013;17(3):44-49. In Russian
7. Park H, Sherstyukov AB, Fedorov AN, Polyakov IV, Walsh JE. An observation-based assessment of the influences of air temperature and snow depth on soil temperature in Russia. *Environmental Research Letters*. 2014;9:064026. doi: [10.1088/1748-9326/9/6/064026](https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/6/064026)
8. Dyukarev EA. Soil freezing depth forecast using simple regression model. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta = Tomsk State University Journal*. 2014;387:266-270. In Russian
9. Dyukarev EA, Golovatskaya EA, Duchkov AD, Kazantsev SA. Temperature monitoring in Bakcharsky bog (Western Siberia). *Russian Geology and Geophysics*. 2009;50(6):579-586. doi: [10.1016/j.rgg.2008.08.010](https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.08.010)
10. Hu G, Liu H, Anenkhonov OA, Korolyuk AY, Sandanov DV, Guo D. Forest buffers soil temperature and postpones soil thaw as indicated by a three-year large-scale soil temperature monitoring in the forest-steppe ecotone in Inner Asia. *Global and Planetary Change*. 2013;104:1-6. doi: [10.1016/j.gloplacha.2013.02.002](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.02.002)
11. Dyukarev YA. Diurnal amplitude of peat soil temperature. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta = Tomsk State University Journal*. 2012;365:201-205. In Russian
12. Dyukarev EA, Golovatskaya EA. Osobennosti temperaturnogo rezhima torfyanoy zalezhi oligotrofnogo bolota v yuzhnoy tayge Zapadnoy Sibiri [Temperature regime characteristics of the peat accumulation of the oligotrophic bog in the southern taiga of Western Siberia]. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2013;1:65-71. In Russian
13. Soudzilovskaia NA, van Bodegom PM, Cornelissen JHC. Dominant bryophyte control over high-latitude soil temperature fluctuations predicted by heat transfer traits, field moisture regime and laws of thermal insulation. *Functional Ecology*. 2013;27:1442-1454. doi: [10.1111/1365-2435.12127](https://doi.org/10.1111/1365-2435.12127)
14. Kiselyov MV, Voropay NN, Dyukarev EA. Temperature regime of the soil in the sedge-sphagnum mire of the raised bog in the southern taiga of Western Siberia. *Geografiya i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2017;3:110-117. doi: [10.21782/GIPR0206-1619-2017-3\(110-117\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-3(110-117)) In Russian
15. Shishov LL, Tonkonogov VD, Lebedeva II, and Gerasimova MI. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* [Classification and diagnostics of soils of Russia]. Smolensk: Oykumena Publ.; 2004. 342 p. In Russian

16. Stepanova VA, Volkova II. Genesis features of the Nikolaevka ryam in the forest-steppe of Western Siberia. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2017;40:202-223. doi: [10.17223/19988591/40/12](https://doi.org/10.17223/19988591/40/12) In Russian, English Summary
17. *Raspisanie pogody: bank gidrometeorologicheskikh dannykh* [Weather forecast: Hydrometeorological data bank] [Electronic resource]. Available at: <http://rp5.ru> (accessed 16.11.2017).
18. *Klimat gorodov mira (1981-2010 gg.) – ezheimesyachnye dannye: bank dannykh Gidromettsentra Rossii* [Climate of cities of the world (1981-2010) - monthly data: data bank of the Hydrometeorological Center of Russia] [Electronic resource]. Available at: <https://meteoinfo.ru/climatecities> (accessed 16.10.2018).
19. Kurakov SA, Krutikov VA, Ushakov VG. Avtonomnyy izmeritel' profilya temperatury AIPT [Autonomous temperature profile meter ATPM]. *Pribory i tekhnika ehksperimenta = Instruments and Experimental Technique*. 2008;5:166-167. In Russian
20. Dimo VN. Teplovoy rezhim pochv SSSR [Thermal regime of soils of the USSR]. Moscow: Kolos Publ.; 1972. 360 p. In Russian
21. Trofimova IE, Balybina AS. Regionalization of the West Siberian Plain from thermal regime of soils. *Geography and Natural Resources*. 2015;3:27-38 .
22. Klene AE, Nelson FE, Shiklomanov NI. The N-factor in natural landscapes: Variability of air and soil-surface temperatures, Kuparuk river basin, Alaska, U.S.A. *Arctic, Antarctic, and Alpin Research*. 2001;33(2):140-148. doi: [10.1080/15230430.2001.12003416](https://doi.org/10.1080/15230430.2001.12003416)
23. Goncharova OY, Matyshak GV, Bobrik AA, Moskalenko NG, Ponomareva OE. Temperature regimes of northern taiga soils in the isolated permafrost zone of Western Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2015;48(12):1329-1340. doi: [10.1134/S1064229315100038](https://doi.org/10.1134/S1064229315100038)
24. Brown PJ, DeGaetano AT. A paradox of cooling winter soil surface temperatures in a warming northeastern United States. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2011;151(7):947-956. doi: [10.1016/j.agrformet.2011.02.014](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.02.014)
25. *Metody klimatologicheskoy obrabotki meteorologicheskikh nablyudeniy* [Methods of climatological processing of meteorological observations]. Drozdov OA editor. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1957. 492 p. In Russian
26. Moore TR, Lafleur PM, Poon DMI, Heumann BW, Seaquist JM, Roulet NT. Spring photosynthesis in a cool temperate bog. *Global Change Biology*. 2006;12:2323-2335. doi: [10.1111/j.1365-2486.2006.01247.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01247.x)
27. Kiselev MV, Dyukarev EA, Voropay NN. Features of seasonal temperature variations in peat soils of oligotrophic bogs in south taiga of Western Siberia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2018;138:012006. doi: [10.1088/1755-1315/138/1/012006](https://doi.org/10.1088/1755-1315/138/1/012006)

Received 20 June 2018; Revised 04 November 2018;
Accepted 25 December 2018; Published 21 March 2019

Author info:

Koronatova Natalya G, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Biogeocenology, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 8/2 Ak. Lavrent'ev Ave., Novosibirsk 630090, Russian Federation. E-mail: coronat@mail.ru

Mironycheva-Tokareva Nina P, Cand. Sci. (Biol.), Head of the Laboratory of Biogeocenology, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 8/2 Ak. Lavrent'ev Ave., Novosibirsk 630090, Russian Federation. E-mail: mirtok@issa-siberia.ru