

Особенности промерзания болот при климатических изменениях на севере и северо-западе Европейской территории России

© 2019 г. В.И. Батуев, И.Л. Калюжный*

Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

*hfl@mail.ru

Specifics of boglands freezing in the north and northwest of the European part of Russia under climate change

V.I. Batuev, I.L. Kalyuzhny*

State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

*hfl@mail.ru

Received May 15, 2018 / Revised October 27, 2018 / Accepted March 22, 2019

Keywords: *bogs, depth of freezing, impact of climate change, spatial-temporal variability.*

Summary

Long-term complex observations covering the period of 1949–2018 made possible to determine the average annual characteristics of the depth of freezing of wetlands in the North and Northwest of the European territory of Russia together with main factors of its formation, and spatial and temporal variability. The main factors that determine the depth of freezing of wetlands are ambient temperature, snow cover thickness, and a degree of watering of the micro landscape (water reserves of the micro landscape). At the initial stage of freezing, the major factor is the ambient temperature, when intensity of the freezing reaches 0.5–0.8 cm/day. As snow falls, the freezing rate becomes smaller, and when the snow cover thickness reaches 25–30 cm the depth amounts to 0.2–0.3 cm/day and smaller. It was found that the spatial variability of the freezing depth decreases from large values of the coefficient of variation (0.3–0.4) at the depth of 20–30 cm to less than 0.1 when the depth exceeds 60 cm. The largest values of the depth are recorded in the North of the Kola Peninsula, where sometimes they reach from 84 to 97 cm with the average values of 48–66. In large hummocky bogs, when the seasonal freezing comes down to 63–65 cm it links with the permafrost layer. On average, swamps of these bogs freeze down to a depth of 68 cm. The average climatic depth of freezing of oligotrophic bogs of the North-West is 21–24 cm; in some years, freezing of them reaches 32–40 cm. It has been shown that the relative warming of the climate resulted in decreasing in the depth of freezing of wetlands in the North and North-West of the European territory of Russia. Relative to the previous climatic period, the depth of frost penetration in the northern Ilaskoye bog decreased by 32%, and in north-western Lammin-Suo bog – by 31%.

Citation: Batuev V.I., Kalyuzhny I.L. Specifics of boglands freezing in the north and northwest of the European part of Russia under climate change. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2019. 59 (2): 233–244. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-390>.

Поступила 15 мая 2018 г. / После доработки 27 октября 2018 г. / Принята к печати 22 марта 2019 г.

Ключевые слова: *болота, влияние изменений климата, глубина промерзания, пространственная и временная изменчивость.*

Приведены данные об основных факторах, определяющих глубину промерзания болот: температуре воздуха, толщине снежного покрова и степени увлажнения микроландшафта. Относительное потепление климата привело к уменьшению глубины промерзания болот рассмотренной территории на 31–32% по отношению к предшествующему климатическому периоду.

Введение

Строительство линейных сооружений (трубопроводов, дорог, зимников и др.) и использование болотных массивов как несущего основания для них в условиях севера и северо-запада Европейской территории России (ЕТР) требует учёта формирования и установления глубин промерзания и оттаивания торфяной залежи, особенно при климатических изменениях. В ра-

ботах [1, 2] показано, что изменение климатических характеристик за последний более чем 30-летний период значительно влияет на гидрометеорологический режим речных и болотных систем. В пределах северо-западного и северного регионов России именно период с 1977 по 1980 г. отмечен как переломный, когда начались изменения гидрологического режима болот [2].

По данным гидрометеорологических наблюдений на болоте Ламмин-Суо (северо-западная зона

олиготрофных болот) за период с 1969 по 2013 г. среднегодовая температура воздуха изменилась на 1,3 °С. За этот же период на *Иласском болоте* (северная зона) эти изменения составили 1,2 °С. В обеих зонах возросло число оттепелей. Изменение интенсивности теплообмена в приземном слое болота влияет на процесс его промерзания. При появлении мёрзлого слоя на болоте изменяются водно-физические, тепловые и механические свойства его поверхности. Последнее определяет несущую способность болота и, как следствие, проходимость его транспортными средствами.

Проходимость болотных массивов в талом и мёрзлом состоянии применительно к требованиям ведения боевых действий на территории СССР, а также пространственное и временное распределение глубины промерзания болот изучались в 1941–1943 гг. А.П. Доманицким [3] под руководством Б.В. Проскурякова. В послевоенные годы эти исследования продолжали В.В. Романов [4] (1961 г.), С.А. Чечкин [5] (1970 г.), В.В. Бородулин и др. [6] (1974 г.). Однако достоверных сведений о глубине промерзания болот и влиянии на этот процесс климатических изменений за последний период практически нет. Цель настоящей работы — обобщить данные о глубине промерзания болот на севере и северо-западе Европейской территории России и оценить влияние относительного изменения климатических параметров на процессы промерзания в данных регионах.

Объекты исследований

В настоящее время наблюдения за глубиной промерзания болот проводятся на специализированной сети болотных станций и постов Росгидромета, которая была создана в послевоенные годы. При выполнении исследований мы использовали результаты многолетних комплексных наблюдений за характеристиками промерзания болот в следующих районах:

1) Прибеломорская провинция олиготрофных болот северной тайги (Архангельская область, болотная станция Брусовица, Иласский болотный массив, координаты его центра 64°19' с.ш., 40°35' в.д.);

2) провинция средней тайги и выпуклых болот юго-восточной Финляндии и Карельско-го перешейка (Карельский перешеек, болотная

станция Зеленогорская, болото Ламмин-Суо, 60°14' с.ш., 29°49' в.д.);

3) провинция Финско-Кольской северной тайги и лапландских аапа (Кольский полуостров: болотная станция Пулозеро — Пулозерское болото, 68°21' с.ш., 33°18' в.д.; болотные посты Канозерский — болото Канозерское, 64°04' с.ш., 34°12' в.д.; Краснощелье — болото Краснощельское, 67°21' с.ш., 37°03' в.д.; Ловозеро — болото Ловозерское, 68°00' с.ш., 35°01' в.д.);

4) в Карело-Финской провинции северной тайги и аапа болот (болотный пост Алакурттинское, болото Алакурттинское, 66°57' с.ш., 30°20' в.д.).

Описание болотных массивов, характеристики растительного покрова и торфяной залежи приведены в Материалах наблюдений болотных станций и постов [7].

Методика наблюдений за промерзанием болот

Мониторинг промерзания болот — один из элементов комплекса гидрометеорологических наблюдений, проводимых на специализированной болотной сети Росгидромета. Именно комплексность наблюдений позволяет исследовать процесс промерзания торфяной залежи в неразрывной связи с гидрологическими и метеорологическими характеристиками конкретного болота. Наблюдения за промерзанием ведутся по единой методике, изложенной в Наставлении болотным станциям и постам Росгидромета [8]. Характеристики промерзания определяют во всех основных микроландшафтах на повышенных (гряды, подушки и др.) и пониженных (мочажины, озёрки) элементах микрорельефа. При этом измеряют толщину, плотность снежного покрова и уровень болотных вод.

Контактная зона теплового взаимодействия — поверхность болота, а область фазовых превращений влаги — промерзающий (промёрзший) слой болота, нижняя граница которого устанавливает глубину промерзания. Методом шурфования определяют верхнюю и нижнюю границы мёрзлого слоя, а также содержание твёрдой фазы воды в промёрзшей торфяной залежи (в дальнейшем именуемой *приведённым слоем промерзания*). В тепловом балансе болота приведённый слой промерзания позволяет оценить суммарный отток тепла от границы промёрзшего слоя. Этот слой промерзания определяют визуальным путём по методи-

ке, разработанной В.В. Романовым [9]. Суть её заключается в том, что одновременно учитывают два классификационных признака: степень уплотнения растительного вещества по четырём градициям и степень его увлажнения, если бы лёд растаял.

Факторы, определяющие промерзание болот

Процесс промерзания болотных массивов — результат сложного взаимодействия ряда внешних и внутренних факторов. Внешние факторы, к которым в первую очередь относятся температура воздуха и снежный покров, — определяющие в процессе промерзания болот. Внутренние факторы — степень обводнённости торфяной залежи и теплофизические свойства — также некоторым образом влияют на интенсивность промерзания залежи. Мы сопоставили глубину промерзания на начальном этапе этого процесса с суммой отрицательных температур воздуха и толщиной снежного покрова на болотном массиве *Ламмин-Суо*. Обводнённость микроландшафтов происходит путём поглощения атмосферных осадков и обусловлена расположением их относительно генетического центра болота: наиболее обводнённая — центральная часть (сфагново-кустарничково-пушицевый, облесённый сосной микроландшафт и грядово-мочажинный комплекс), несколько менее обводнены склоны (сфагново-пушицево-кустарничковый, облесённый сосной) и слабообводнённая периферия (сосново-сфагново-кустарничковый микроландшафт).

Материалы наблюдений показывают, что интенсивность промерзания в значительной степени зависит от метеорологических условий начала зимнего периода. При этом возникают следующие ситуации: устойчивый снежный покров устанавливается раньше, позже или одновременно с переходом среднесуточной температуры через 0°C . Если снежный покров устанавливается раньше, то болото промерзает незначительно или совсем не промерзает. Анализ результатов наблюдений на болоте *Ламмин-Суо* за период с 1950 по 2016 г. показал, что в отдельные годы при сумме отрицательных температур -109°C и толщине снежного покрова 58 см центральная часть промерзала всего на 6 см, а периферия несколько больше — 10 см. Это объясняется тем, что рыхлый свежеснеженный снег, имея высокие теплоизоляционные свойства, не позволяет запасам тепла, аккумуля-

рованным в торфяной залежи, расходоваться на теплообмен с атмосферой. Однако при толщине снега 14 см и сумме температур $-88,5^{\circ}\text{C}$ центральная часть промерзает на 14 см, а периферия — на 16 см. Таким образом, на начальном этапе промерзания центральная часть промерзает меньше, чем периферия. Если же снежный покров устанавливается позже, то интенсивность нарастания мёрзлого слоя будет определяться только оттоком тепла от промерзающей поверхности.

На болоте *Ламмин-Суо* при крайне незначительной толщине снега (2 см) и сумме температур $-66,6^{\circ}\text{C}$ центральная часть промерзает на 14 см, а периферия — на 16 см. В этом случае глубина промерзания зависит непосредственно от радиационного баланса или, как следствие, от суммы отрицательных температур воздуха. Такая ситуация характерна для болот северо-запада ЕТР и Прибалтики.

Суточная динамика скорости промерзания и радиационного баланса показывает, что при толщине снежного покрова до 5 см скорость промерзания обратно пропорциональна суточному ходу радиационного баланса. При толщине снега более 5 см роль радиационного баланса начинает понижаться. Если же толщина снега составляет 10 см, то скорость промерзания уменьшается в десятки раз на повышенных элементах микрорельефа и в 7–10 раз на мочажинах и западинах. Результаты наблюдений подтверждают изменения скорости промерзания при толщине снега 5 и 10 см на всех микроландшафтах, имеющих заметное различие в режиме уровней болотных вод [4]. В отдельные мягкие зимы процесс промерзания прекращается. Сроки замерзания залежи практически совпадают со сроками перехода температуры воздуха через 0°C или запаздывают на 1–2 суток. Обводнённость сфагново-пушицево-кустарничкового, облесённого сосной микроландшафта значительно меньше других. Поэтому, при прочих равных условиях, глубина его промерзания в начальный период больше, чем на других микроландшафтах.

Для всех типов болот температура воздуха в начальный период промерзания, когда толщина снежного покрова незначительна, — определяющий фактор. Эта тенденция хорошо проявилась на болоте *Пулозерское* зимой 1983/84 г. при суммах отрицательных температур от $-2,6$ до $-60,6^{\circ}\text{C}$ вне зависимости от типа болотного микроландшафта. Интенсивность промерзания при этом составля-

ла 0,5–0,8 см/сут. и более. При толщине снежного покрова 10–15 см интенсивность промерзания заметно снижалась, а при толщине 25–30 см она уже составляла 0,2–0,3 см/сут. Подобные зависимости наблюдаются на всех типах болот.

По данным наблюдений за период 1970–90-х годов, на грядово-озерковом комплексе *Иласского болота* при полностью сформировавшемся промёрзшем слое зависимость наибольшей глубины промерзания гряд и озерков $h_{г.о}$ (см) от толщины снега H (см) имеет коэффициент корреляции $R = 0,80$ (при среднеквадратическом отклонении $\sigma = 7$ см) и описывается уравнением

$$h_{г.о} = -0,655H + 63,5.$$

Зависимость подтверждает определяющую роль снежного покрова при формировании максимальной глубины промерзания торфяной залежи к окончанию холодного сезона. Подобная зависимость глубины промерзания h (см) от толщины снега на мезоолиготрофном *Пулозерском болоте* для кустарничково-лишайникового микроландшафта практически отсутствует. Даже используя второй определяющий фактор – абсолютную сумму среднемесячных отрицательных температур ($|\Sigma(-\Theta)|$, °C), получаем слабую корреляционную связь:

$$h = 0,16|\Sigma(-\Theta)| - 0,63H + 71,3.$$

Зависимость имеет коэффициент корреляции $R = 0,54$ при $\sigma = 12$ см. Низкий коэффициент корреляции показывает, что не все факторы, определяющие процесс промерзания залежи, были учтены. К ним, в частности, относится содержание влаги в деятельном слое. *Болота Кольского полуострова* в предзимний период характеризуются высокой изменчивостью их обводнения атмосферными осадками. На болотах севера ЕТР уровни болотных вод в этот период всегда располагаются вблизи поверхности.

Особенность начальной стадии процесса промерзания грядово-мочажинного и грядово-озеркового комплексов – влияние выноса тепла водной массы из гряд в мочажины и озёрки. Относительно тёплые воды, вытекающие из гряды, замедляют процесс промерзания мочажин, образуя узкую полынью шириной 10–20 см, примыкающую к гряде. В относительно тёплые зимы такая полынья может сохраняться на протяжении всего холодного периода. Обводнённость микроландшафтов выпуклых

олиготрофных болот существенно влияет на глубину их промерзания. На склонах массива уровень болотных вод заметно ниже, чем в центральных частях, что объясняется их высокой дренирующей способностью. Поэтому теплоёмкость деятельного слоя в центральной части больше, чем на периферии. Так, зимой 1975/76 г. в сфагново-кустарничково-пушицевом, облесённом сосной микроландшафте болота *Ламмин-Суо* глубина промерзания в центральной части, на повышениях, составляла 20 см, а в понижениях – 8 см; на периферии в сфагново-кустарничково-сосновом микроландшафте она была равна 40 и 22 см соответственно.

По данным наблюдений за 1951–1991 гг. в этих микроландшафтах сохраняется такая же тенденция: в центральной части средняя глубина промерзания на повышенных элементах микрорельефа составляет 19 см (в понижениях 10 см), а на периферии соответственно 25 и 13 см, т.е. на 32% больше. Экстремальные характеристики (max и min) в центральной части болота также по величине меньше, чем на периферии. Аналогичная закономерность наблюдается и на олиготрофном болоте *Иласское*. Среднеголетняя глубина промерзания повышений на склоне болота в сосново-кустарничково-сфагновом микроландшафте равна 28 см, а на сосново-берёзово-осоково-сфагновом микроландшафте из-за его высокой дренируемости она увеличивается до 35 см, что на 25% больше.

В табл. 1 приведены результаты наблюдений за промерзанием повышенных элементов микрорельефа болот севера и северо-запада ЕТР за период 1949–2018 гг. Наибольшая глубина промерзания наблюдалась на *болотах Кольского полуострова*, где она достигала 84–97 см. Средние многолетние значения изменяются от 48 до 68 см, а наименьшие значения не опускаются ниже 27 см. Болота северо-запада промерзают заметно меньше. Средняя глубина промерзания болота *Ламмин-Суо* не превышает 24 см, но в отдельные годы она может достигать 34–40 см. Наименьшие среднегодовые глубины промерзания повышенных элементов микрорельефа находятся в пределах 2–7 см.

Между глубиной промерзания и приведённым слоем промерзания существует тесная зависимость, обусловленная высоким содержанием капиллярной влаги в деятельном слое болота. Содержание этой влаги формируется за счёт капиллярных сил в пористой структуре слаборазложившегося торфа и не позволяет избыткам влаги

Таблица 1. Глубина промерзания на повышенных элементах микроландшафтов болот севера и северо-запада Европейской территории России

Болото, микроландшафт	Период наблюдений, годы	Глубина, см		
		средняя	max	min
Болота севера				
Пулозерское, кустарничково-лишайниковый грядово-мочажинный комплекс	1956–1993	66	90	48
	1956–1993	67	84	44
Алакүрттинское, сфагново-пушицево-кустарничковый	1966–1993	48	97	27
Краснощельское, осоково-пушицевый	1962–1993	57	84	43
Иласское: грядово-мочажинный комплекс грядово-озерковый комплекс	1956–2016	31	62	11
	1970–2016	24	40	8
Ловозерское, крупнобугристый комплекс, топь	1990–2013	68	82	44
Болота северо-запада				
Ламмин-Суо: грядово-мочажинный комплекс сосново-сфагново-кустарничковый сфагново-кустарничково-пушицевый, облесённый сосной сфагново-кустарничково-пушицево-сосновый	1949–1991	21	34	8
	1949–1991	21	32	9
	1950–2018	24	40	10
	1950–2018	18	32	0

Таблица 2. Величины приведённого слоя промерзания M (см) в зависимости от глубины промерзания h (см) болот севера и северо-запада Европейской территории России

Болото, микроландшафт, форма микрорельефа	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции
<i>Иласское</i> : грядово-мочажинный, гряда грядово-озерковый, гряда	$M = 0,79h - 0,57$	0,94
	$M = 0,81h - 2,98$	0,93
<i>Ламмин-Суо</i> : грядово-мочажинный гряда мочажина сфагново-осоковый повышение понижение	$M = 0,78h - 1,40$	0,92
	$M = 0,95h + 0,06$	0,99
	$M = 0,54h + 0,76$	0,84
	$M = 0,85h - 1,32$	0,94
<i>Пулозерское</i> : грядово-мочажинный гряда мочажина кустарничково-лишайниковый повышение понижение	$M = 0,86h + 2,43$	0,94
	$M = 1,02h - 2,68$	0,99
	$M = 0,94h - 0,04$	0,99
	$M = 0,95h - 0,28$	0,99
<i>Ловозерское</i> : крупнобугристый, бугор слабопроточная топь	$M = 0,72h - 0,01$	0,99
	$M = 0,94h - 0,13$	0,99

накапливаться при выпадении осадков выше равновесного содержания. В результате коэффициент корреляции между указанными характеристиками близок к единице. Для практических целей (например, прокладки зимних дорог по болоту) эти данные необходимы для оценки изменений максимальной вертикальной нагрузки на промёрзший слой по площади болота в зависимости от типа

микроландшафта. В табл. 2 приведены уравнения регрессии этой зависимости для некоторых болот севера и северо-запада ЕТР. Согласно приведённым зависимостям, в частности, гряды грядово-мочажинного комплекса болота *Иласское* при глубине промерзания 50 см имеют приведённый слой промерзания толщиной 38,9 см при наличии сухого вещества торфа не более 22,2% объёма.

Таблица 3. Зависимость наибольших сезонных глубин промерзания пониженных $h_{\text{пон}}$ и повышенных $h_{\text{пов}}$ элементов микрорельефа и их соотношение в микроландшафтах болот севера и северо-запада Европейской территории России

Микроландшафт	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Соотношение глубин $h_{\text{пон}}/h_{\text{пов}}$
Болото Ламмин-Суо			
Сфагново-кустарничково-пушицевый, облесённый сосной	$h_{\text{пон}} = 0,55h_{\text{пов}} + 1,4$	0,68	0,61
	$h_{\text{пон}} = 0,77h_{\text{пов}} - 2,1$	0,82	0,67
Грядово-мочажинный комплекс	$h_{\text{пон}} = 1,11h_{\text{пов}} - 4,1$	0,83	0,92
Сосново-сфагново-кустарничковый	$h_{\text{пон}} = 0,89h_{\text{пов}} - 6,9$	0,89	0,56
Болото Иласское			
Грядово-озерковый комплекс	$h_{\text{пон}} = 0,99h_{\text{гр}} + 13,7$	0,64	1,67
Слабовыраженный грядово-мочажинный комплекс с обводненными мочажинами	$h_{\text{пон}} = 1,28h_{\text{гр}} + 4,4$	0,82	1,46
Болото Пулозерское			
Кустарничково-лишайниковый	$h_{\text{пон}} = 0,95h_{\text{гр}} - 1,9$	0,93	0,68
Грядово-мочажинный комплекс	$h_{\text{пон}} = 0,31h_{\text{гр}} + 22,0$	0,51	0,64
Болото Краснощельское			
Грядово-мочажинный комплекс	$h_{\text{пон}} = 0,77h_{\text{гр}} + 6,8$	0,92	0,89
Болото Канозерское			
Осоково-сфагновый	$h_{\text{пон}} = 0,95h_{\text{пов}} + 0,3$	0,98	0,95
Грядово-мочажинный комплекс	$h_{\text{пон}} = 0,94h_{\text{гр}} + 0,99$	0,51	0,99
Болото Алакерттинское			
Сфагново-пушицево-кустарничковый	$h_{\text{пон}} = 0,95h_{\text{пов}} - 3,1$	0,88	0,88
Сфагново-кустарничково-пушицевый, облесённый сосной и берёзой	$h_{\text{пон}} = 0,95h_{\text{пов}} - 3,1$	0,93	0,88

Пространственная изменчивость глубины промерзания болот севера и северо-запада Европейской территории России

Пространственная изменчивость глубины промерзания болота выражается в разности величин промерзания как элементов микрорельефа отдельного микроландшафта, так и между микроландшафтами. Соотношение наибольших глубин промерзания пониженных (мочажины, западины, озёрки) и повышенных (гряды, подушки) элементов микрорельефа ($h_{\text{пон}}/h_{\text{пов}}$) в конкретных микроландшафтах находится в пределах от 0,56 до 1,67. Соотношение возрастает с увеличением глубины промерзания до 1,0 в обводнённых микроландшафтах (грядово-мочажинных комплексах) и до 1,67 в грядово-озерковых комплексах. В табл. 3 приведены зависимости наибольших глубин промерзания пониженных и повышенных элементов микрорельефа болот севера и северо-запада ЕТР. Анализ данных таблицы показывает, что на олиготрофных болотах с неориентированным микрорельефом промерзание мочажин всегда меньше, чем

на повышенных элементах. Промерзание мочажин составляет 0,56–0,67 от промерзания повышений. В микроландшафтах с ориентированным микрорельефом (грядово-мочажинные и грядово-озерковые комплексы) мочажины промерзают в 1,5 раза сильнее, чем гряды.

На мезоолиготрофных болотах (*Пулозерское*, *Краснощельское*, *Канозерское* и *Алакерттинское*) повышенные элементы микрорельефа промерзают глубже, чем понижения. Соотношение $h_{\text{пон}}/h_{\text{пов}}$ составляет от 0,64 до 0,99. Установлено, что на олиготрофных и мезоолиготрофных болотах имеются устойчивые связи между глубинами промерзания отдельных микроландшафтов. На олиготрофном болоте *Ламмин-Суо* теснота связи выражается коэффициентами корреляции от 0,75 до 0,81 (табл. 4).

Факторы, влияющие на глубину промерзания, среди которых – микрорельеф, растительный покров, степень увлажнения, неравномерность залегания снега и др., обуславливают и пространственную изменчивость промерзания в пределах болотного массива. Эти закономерности определены путём полевых исследований

Таблица 4. Корреляционные уравнения наибольшей сезонной глубины промерзания между отдельными микроландшафтами болот севера и северо-запада Европейской территории России

Микроландшафт	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции
Болото Ламмин-Суо. Промерзание сфагново-кустарничково-пушицевого, облесённого сосной ($h_{сф.к.п.}$) по отношению к другим микроландшафтам		
Сфагново-кустарничково-сосновый	$h_{сф.к.с} = 0,55h_{сф.к.п} + 5,3$	0,75
Грядово-мочажинный комплекс	$h_{гр.моч} = 0,74h_{сф.к.п} - 0,4$	0,77
Сосново-сфагново-пушицево-кустарничковый	$h_{с.сф.п.к} = 0,82h_{сф.к.п} - 2,8$	0,81
Болото Канозерское. Промерзание мочажин грядово-мочажинного комплекса ($h_{гр.моч.м.}$)		
Осоково-сфагновая западина	$h_{ос.сф.з} = 0,95h_{гр.моч.м} + 2,1$	0,96
То же, для повышений	$h_{ос.сф.п} = 0,96h_{гр.моч.п} + 2,7$	0,96
Болото Алаккуртинское. Промерзание кочек сфагново-пушицево-кустарничкового микроландшафта		
Сфагново-кустарничково-пушицевый	$h_{сф.п.к.к} = 0,90h_{сф.к.п.к} + 4,9$	0,95
То же, для понижений	$h_{сф.п.к.з} = 0,86h_{сф.к.п.з} + 4,9$	0,96
Болото Иласское. Промерзание гряд грядово-мочажинного комплекса ($h_{гр.моч.}$)		
Грядово-озерковый комплекс, гряда	$h_{гр.оз} = 0,69h_{гр.моч} + 4,6$	0,82

на олиготрофных и мезоолиготрофных болотах. Установлено, что пространственная изменчивость уменьшается от значений коэффициента вариации 0,3–0,4 при глубинах промерзания 20–30 см до величины менее 0,1 при глубинах промерзания более 60 см. Наибольшая её изменчивость наблюдается в начальный период промерзания, и далее она уменьшается по мере увеличения глубины промерзания.

Для оценки пространственной изменчивости на мезоолиготрофном *Пулозерском болоте* проводились измерения наибольших глубин промерзания в господствующих микроландшафтах с учётом форм микрорельефа. Зависимость коэффициента вариации C_v от глубины промерзания h (см) для этого болота определяется выражением

$$C_v = 1,602e^{-0,045h}$$

при $R = 0,99$ и $\sigma = 0,02$. Аналогичные зависимости получены и на других типах болотных массивов. Для олиготрофного *болота Ширинское* эта зависимость имеет следующий вид:

$$C_v = 5,89h^{-0,94},$$

при $R = 0,98$. Для евтрофного *болота Тарманское* аналогичная зависимость выражена так:

$$C_v = 5,12h^{-0,78}$$

при $R = 0,99$.

Таким образом, эмпирически установленная закономерность уменьшения изменчивости глубины промерзания с увеличением средней глубины промерзания слоя свойственна всем типам болот.

Временная изменчивость глубины промерзания болот севера и северо-запада Европейской территории России

Промерзание болот северной части Кольского полуострова (*болота Пулозерское, Краснощельское, Ловозерское*) начинается в конце сентября – начале октября и продолжается до первой половины апреля (рис. 1). В 1960-е годы эти болота промерзали со средней интенсивностью 0,49 см/сут. При достижении наибольшей глубины промерзания, которая составляла порядка 90 см, интенсивность промерзания незначительно менялась на протяжении до двух месяцев. Далее начиналось оттаивание мёрзлого слоя как с поверхности болота, так и, с некоторой задержкой, со стороны нижней границы промерзания. Инфильтрация талых вод в деятельный горизонт торфяной залежи способствует началу оттаивания с поверхности болота ещё до полного схода снега. Слой оттаивания от поверхности болота составлял 78 см, или около 87% общей глубины промерзания. Интенсивность оттаивания – 0,65 см/сут. Оттаивание от нижней поверхности промерзания составляло 12 см, или 13% толщины промерзшего слоя. В отдельные годы локальные прослойки мёрзлого слоя (перелетки) наблюдались весь тёплый период года. В более южных районах (*болота Алаккуртинское, Канозерское*) промерзание болот начинается в третьей декаде октября. В конце марта прирост мёрзлого слоя заканчивается. Полное оттаивание происходит в последних числах июля. В отдельные годы прослойка мёрзлого торфа также может сохраняться весь тёплый период.

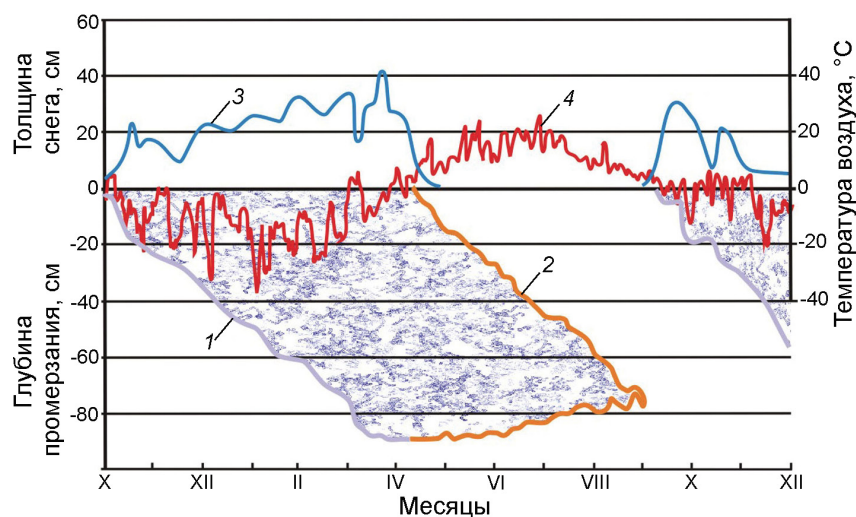


Рис. 1. Ход промерзания и оттаивания кустарничково-лишайникового микроландшафта Пулозерского болота в зимний период 1965/66 г.

1 – промерзание торфяной залежи; 2 – оттаивание торфяной залежи; 3 – толщина снежного покрова, 4 – среднесуточная температура воздуха

Fig. 1. Changes in shrubby-lichen micro landscape freezing and thawing for Pulozerskoye bog during a winter season of 1965/66.

1 – peat bed freezing; 2 – peat bed thawing; 3 – snow depth; 4 – daily mean air temperature

На бугристом *Ловозерском болоте* начало промерзания бугров приходится на первую половину октября (рис. 2), топей (рис. 3) – на 5–8 суток позже. Бугры промерзают в среднем на глубину 63 см и смыкаются с многолетней мерзлотой, т.е. промерзает слой сезонного оттаивания, который для многолетнемёрзлых болот и представляет собой деятельный слой. Тем временем топи ещё продолжают промерзать, в среднем до глубины 68 см, поскольку многолетняя мерзлота здесь находится значительно ниже. Сопоставимые по датам глубины промерзания бугров (до смыкания их с многолетней мерзлотой) и проточных топей определяются выражением вида:

$$h_{\text{топи}} = 0,97h_{\text{буг}} + 0,64$$

при коэффициенте корреляции $R = 0,98$ и $\sigma = 4$ см. Из этого следует, что значения интенсивности про-

мерзания бугров и топей сопоставимы. Наибольшая глубина промерзания топей – 82–87 см. На промерзание бугристых болот в значительной степени влияет снежный покров; толщина его на тоях в два раза больше, чем на буграх. Метелевым переносом снег с бугров частично сносится на топи. Оттаивают бугры на глубину 59–63 см к концу сентября. Разрушается мёрзлый слой на тоях в конце июля – начале августа. Интенсивность промерзания сезонно-талого слоя многолетнемёрзлых бугров составляет около 0,46 см/сут. Глубина сезонного оттаивания бугров зависит от суммы положительных температур воздуха за тёплый период и в среднем составляет 76 см. Оттаивают бугры со средней интенсивностью 0,51 см/сут.

В кустарничково-лишайниковом микроландшафте на *Пулозерском болоте* средняя многолетняя сезонная глубина промерзания составляет

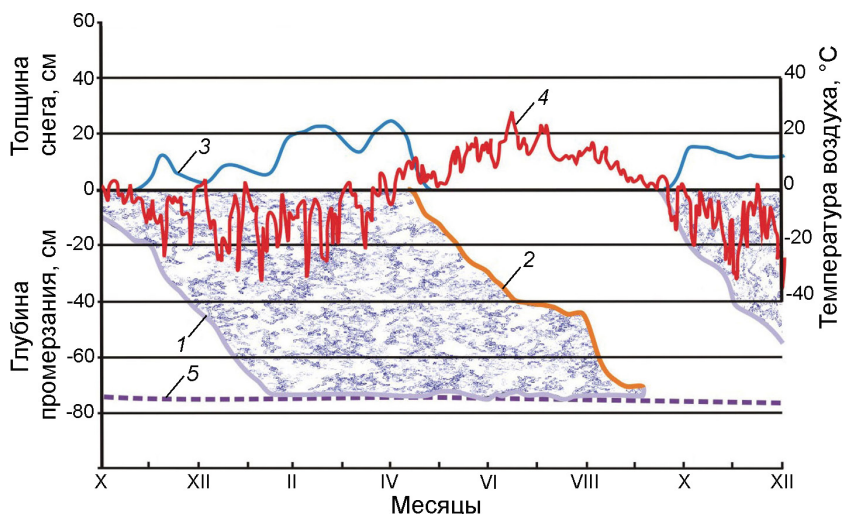


Рис. 2. Ход промерзания и оттаивания бугра Ловозерского бугристого болота в 2001/02 г.

1 – промерзание сезонно-талого слоя на бугре; 2 – оттаивание сезонно-мёрзлого слоя на бугре; 3 – толщина снежного покрова на бугре; 4 – среднесуточная температура воздуха; 5 – граница многолетней мерзлоты

Fig. 2. Changes in palsa freezing and thawing for Lovozerkoye frost mound bog during 2001/02.

1 – freezing of palsa seasonal thawed layer; 2 – thawing of palsa seasonal frozen layer; 3 – snow depth at palsa; 4 – daily mean air temperature; 5 – permafrost line

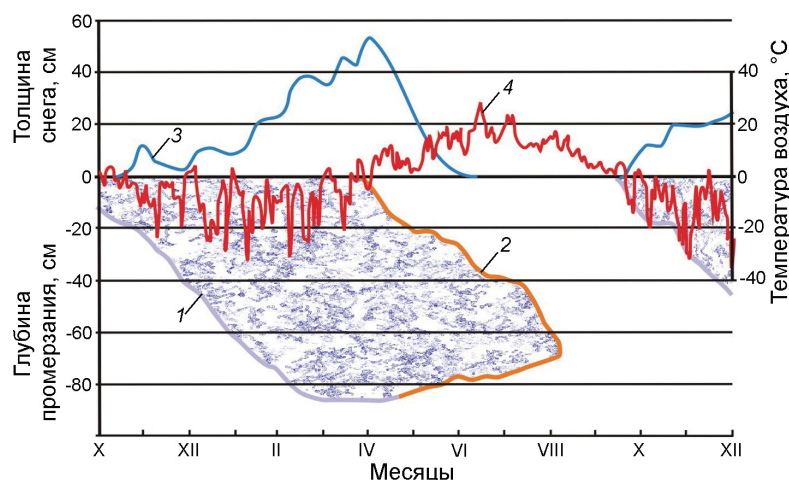


Рис. 3. Ход промерзания и оттаивания топи Ловозерского бугристого болота в 2001/02 г. 1 – промерзание торфяной залежи топи; 2 – оттаивание торфяной залежи топи; 3 – толщина снежного покрова в топи; 4 – среднесуточная температура воздуха

Fig. 3. Changes in fen freezing and thawing for Lovozerskoye frost mound bog during 2001/02.

1 – fen peat bed freezing; 2 – fen peat bed thawing; 3 – fen snow depth; 4 – daily mean air temperature

58 см. Несколько меньше промерзает осоково-пушицевый микроландшафт *Краснощельского болота* – 51 см. Более южные болота (*Алакерттинское* и *Канозерское*) промерзают заметно меньше: соответственно на 45 и 36 см. Наибольшие глубины промерзания, порядка 80–90 см, наблюдаются в экстремальные годы на всех болотах, исключая *Канозерское*, где они не превышают 54 см.

На северо-западе, в провинции средней тайги и выпуклых болот юго-восточной Финляндии и Карельского перешейка, начальный период промерзания из-за частых оттепелей становится всё более продолжительным по времени: от начала ноября до середины декабря. Нарастание мёрзлого слоя заканчивается во второй декаде марта, а его полное разрушение наблюдается уже к концу апреля. Наибольшая средняя многолетняя глубина промерзания (23 см) установлена на повышениях сфагново-пушицево-кустарничкового, облесённого сосной микроландшафта. В отдельные годы при обильном выпадении снега болото не замерзает и покрывается на повышенных элементах микро рельефа промёрзшим тонким слоем в 1–3 см.

В нашей работе [10] показано, что изменение климата последнего 30-летнего периода существенно влияет на температурный режим торфяной залежи северо-западной и северной зон олиготрофных болот. Рост среднегодовых температур приземного слоя обуславливает большее прогревание торфяной залежи в вегетационный период с последующей аккумуляцией тепла и замедленной его теплоотдачей по глубине торфяной залежи. По отношению к предшествующему периоду за последнее 30-летие в северо-западной части зоны олиготрофных болот среднегодовая темпе-

ратура торфяной залежи увеличилась на 0,6 °C, а в северной части – на 0,8 °C. Динамика температур определяется положительными статистически значимыми линейными трендами [10].

На северо-западе *ЕТР* в период относительной стабильности климатических параметров (1951–1980 гг.) начало промерзания болота *Ламмин-Суо* в 40% случаев наблюдалось с середины октября до середины ноября. При изменении климатических характеристик (1981–2017 гг.) эти даты сдвигаются: в 57% случаев начало промерзания происходит в первой половине ноября. Полное оттаивание мёрзлого слоя для первого периода наблюдалось в апреле (56%) и начале мая (34%). Для второго периода с 25 по 30 апреля мёрзлый слой не наблюдался в 60% случаев. В северной части *ЕТР* для первого периода начало промерзания (*болото Иласское*) в 45% случаев наблюдалось во второй половине октября. При изменении климатических характеристик (1981–2010 гг.) начало промерзания в 70% случаев наблюдается в конце октября – начале ноября. Полное оттаивание мёрзлого слоя для первого случая происходило в июне – начале июля (45% случаев). В период изменения климатических характеристик средняя дата полного оттаивания болота приходится уже на середину мая.

На рис. 4 представлен ход изменения максимальной сезонной глубины промерзания отдельных микроландшафтов за период наблюдений на болоте *Ламмин-Суо*. На облесённых болотных микроландшафтах (кривые 1, 3, 4) с сомкнутостью крон сосны до 0,4 глубина промерзания постепенно уменьшалась весь период наблюдений (аппроксимирующая кривая II). В то же время на сравнительно открытых микроландшафтах (кривая 2)

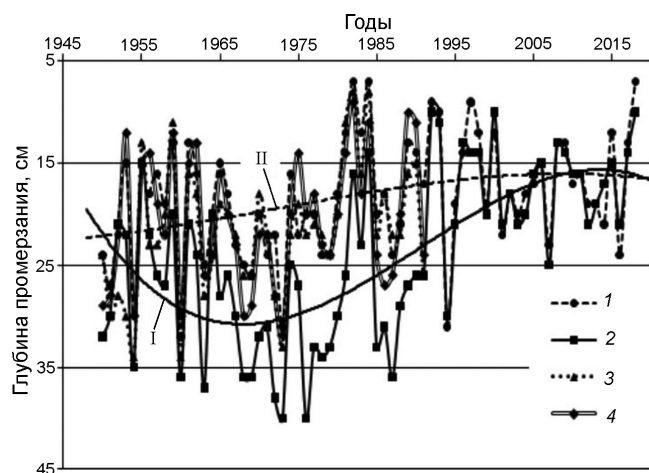


Рис. 4. Изменение величины сезонного промерзания микрорельефов болота Ламмин-Суо в период 1951–2017 г.:

комплекс: 1 – сфагново-кустарничково-пушицевый; 2 – сфагново-пушицево-кустарничковый; 3 – сосново-сфагново-кустарничковый; 4 – грядово-мочажинный; I – аппроксимирующая кривая открытого микрорельефа (2); II – аппроксимирующая кривая облесённых микрорельефов (1, 3, 4)

Fig. 4. Seasonal freezing depth changes for micro landscapes of Lammin-Suo bog during the period of 1951–2017: 1 – sphagnum-shrubs-cotton grass; 2 – sphagnum-cotton grass-shrubs; 3 – pines with sphagnum and shrubs; 4 – ridge-pool complex; I – fitted curve for an open micro landscape (2); II – fitted curve for afforested micro landscapes (1, 3, 4)

с сомкнутостью крон 0,1–0,2 такие изменения носили более выраженный характер (аппроксимирующая кривая I). Относительное потепление климата уменьшает максимальную глубину промерзания торфяной залежи до средних значений – 16–18 см. В последнее десятилетие величина промерзания торфяной залежи стабилизировалась с имеющимся незначительным трендом на её рост в перспективе. При этом мощность мёрзлого слоя нивелируется по площади болотного массива, содержащего как открытые, так и лесные группы болотных микрорельефов. Этому способствуют даже незначительные оттепели, уменьшающие перераспределение снега по площади болота из-за снижения метелевого переноса снега.

На северном *болотном массиве Иласское* (рис. 5) многолетние изменения глубин промерзания грядово-мочажинного и грядово-озеркового комплексов близки (аппроксимирующие кривые I и II). Здесь, как и на южных болотах, большими изменениями по глубине промерзания характеризуются более открытые, сла-

бооблесённые или необлесённые микрорельефы, в данном случае грядово-мочажинный комплекс. И хотя их многолетние нелинейные тренды к настоящему времени пересекаются на значении по глубине промерзания равной 30 см, повышенные элементы микрорельефа последнего (аппроксимирующая кривая II) промерзают сильнее, поскольку в этом микрорельефе происходит значительный перенос снега с гряд на озёрки и мочажины.

С начала наблюдений до 1980 г. (табл. 5) средняя глубина промерзания на повышениях в сфагново-кустарничково-пушицевом, облесённом сосновой микрорельефе на *болоте Ламмин-Суо* была равна 29 см. В 1981–2018 гг., периоде с относительно быстрым изменением климатических характеристик, она уменьшилась до 16 см, т.е. на 45% первоначальной величины. На гряде грядово-мочажинного комплекса *Иласского болота* (см. табл. 5) среднее значение глубины промерзания за период с 1955 по 1980 г. составило 38 см, а в последующий период оно снизилось до 27 см, что даёт различие в 29% первоначальной величины. Продолжительность существования мёрзлого слоя на болотах различных болотных провинций рассматриваемой территории изменяется от 194–

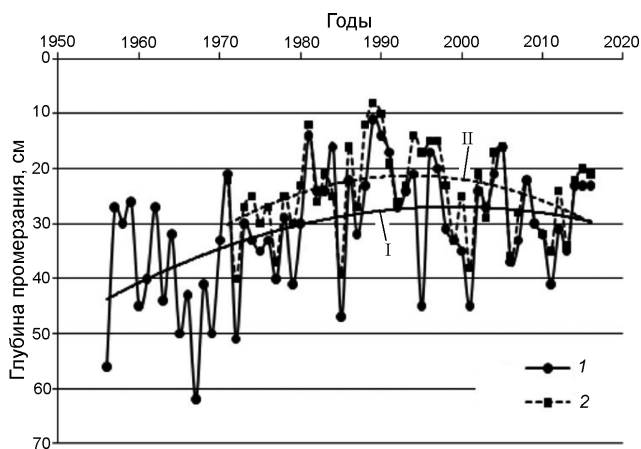


Рис. 5. Изменение величины сезонного промерзания комплексных микрорельефов болота Иласское в 1955–2017 г.:

комплекс: 1 – грядово-мочажинный; 2 – грядово-озерковый; I – аппроксимирующая кривая грядово-мочажинного комплекса; II – то же, грядово-озеркового комплекса

Fig. 5. Seasonal freezing depth changes for micro landscapes of Ilaskoye bog during the period of 1955–2017: 1 – ridge-pool complex; 2 – ridge-small lakes complex; I – fitted curve for a ridge-pool complex; II – fitted curve for ridge-small lakes complex

Таблица 5. Изменение характеристик глубины промерзания олиготрофных болот за различные климатические периоды

Микроландшафт, период наблюдений	Глубина промерзания форм микрорельефа, см					
	повышения (гряды, кочки, подушки)			понижения (озерки, мочажины)		
	средняя	max	min	средняя	max	min
Болото Иласское						
Грядово-мочажинный комплекс						
1955–1980	38	62	21	52	80	26
1981–2016	27	47	11	40	87	17
<i>изменение промерзания</i>	–11	–15	–10	–12	+7	–9
Грядово-озерковый комплекс						
1970–1980	29	40	22	49	63	36
1981–2016	23	39	8	38	54	13
<i>изменение промерзания</i>	–6	–1	–14	–11	–9	–23
Болото Ламмин-Суо						
Сфагново-кустарничково-пушицевый, облесённый сосной						
1950–1980	29	40	15	15	30	2
1981–2018	16	31	7	12	28	2
<i>изменение промерзания</i>	–13	–9	–8	–3	–2	0
Сфагново-кустарничково-пушицево-сосновый						
1950–1980	–21	–32	–13	–12	–24	–4
1981–2018	16	31	7	12	28	1
<i>изменение промерзания</i>	–5	–1	–6	0	+4	–3
Грядово-мочажинный комплекс						
1949–1980	23	34	11	21	42	8
1981–1991	16	26	8	16	22	6
<i>изменение промерзания</i>	–7	–8	–3	–5	–20	–2

200 сут. на северных и до 100–135 сут. на южных границах олиготрофной зоны. В отдельные годы на северных болотах мёрзлый слой может локально наблюдаться весь год. Отметим, что на этих болотах влияние относительного потепления климата на глубину промерзания торфяной залежи в значительной степени компенсируется уменьшением толщины снежного покрова.

Выводы

Комплексные наблюдения на специализированной сети болотных станций Росгидромета, охватывающие период с 1949 г. по настоящее время, позволили установить многолетние характеристики глубины промерзания болотных массивов севера и северо-запада Европейской территории России, основные факторы её формирования, пространственную и временную изменчивость. Наибольшая глубина промерзания в пределах рассматриваемой территории наблюдается на севере Кольского полуострова и составляет 48–66 см. В отдельные годы её экстремальные значения достигают 84–97 см. Болота юга северо-западного региона промерзают за-

метно меньше. Их средняя глубина промерзания – 21–24 см, экстремальные значения равны 32–40 см. При наличии мощного снежного покрова промерзание не превышает 10–15 см.

Главные факторы, определяющие глубину промерзания болот, – температура воздуха, толщина снежного покрова и степень обводнённости болотного микроландшафта. На разных этапах промерзания вклад их в этот процесс неодинаков. На начальном этапе определяющий фактор – температура внешней среды, а далее, по мере выпадения твёрдых атмосферных осадков, нарастает влияние толщины снежного покрова.

Пространственная изменчивость глубины промерзания внутри отдельного болотного микроландшафта или группы микроландшафтов уменьшается с увеличением мощности мёрзлого слоя. Вместе с тем рост глубины промерзания нивелирует мощность мёрзлого слоя по площади болотного массива, содержащего как открытые, так и лесные группы болотных микроландшафтов. Относительное потепление климата способствовало уменьшению глубины промерзания деятельного слоя торфяной залежи на всех болотах рассматриваемой территории, кроме многолетнемёрзлых бугри-

стых болот, где она практически не изменилась. На болотах центральной части олиготрофной зоны среднее многолетнее значение максимальной сезонной глубины промерзания для последнего климатического периода равно 16–18 см. На северных болотах к настоящему времени она составляет в среднем около 30 см. Если в первом случае эта величина относительно стабильна, то во втором случае период аккумуляции тепла торфяной залежью

закончился и наблюдается определённая тенденция к установлению относительной стабилизации средней глубины промерзания.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Л.А. Тимофеевой за помощь в подготовке статьи.

Acknowledgments. Authors gratefully acknowledge L.A. Timofeeva for the help with our paper preparing.

Литература

1. Георгиевский В.Ю., Ежов А.В., Шалыгин А.Л., Шикломанов И.А., Шикломанов А.И. Оценка влияния возможных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек территории бывшего СССР // Метеорология и гидрология. 1996. № 11. С. 89–99.
2. Калюжный И.Л., Романюк К.Д. Изменение водного режима болот севера и северо-запада России под влиянием климатических факторов // Метеорология и гидрология. 2010. № 7. С. 85–98.
3. Доманицкий А.П. Проходимость промерзших болот // Тр. науч.-исслед. учреждений Гидрометслужбы Красной Армии. 1943. Серия VIII. Вып. 4. С. 25–48.
4. Романов В.В. Гидрофизика болот. Л.: Гидрометеоздат, 1961. 359 с.
5. Чечкин С.А. Водно-тепловой режим неосушенных болот и его расчет. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 205 с.
6. Бородулин В.В., Калюжный И.Л., Новиков С.М. К методике измерений и расчетов промерзания болот // Тр. ГГИ. 1974. Вып. 222. С. 205–224.
7. Материалы наблюдений болотных станций за 1990 г.: Вып. 1. Санкт-Петербург, 1993. 548 с.
8. Наставление гидрологическим станциям и постам: Гидрометеорологические наблюдения на болотах. Вып. 8. Л.: Гидрометеоздат, 1990. 360 с.
9. Романов В.В., Рожанская О.Д. Опыт исследования физических свойств промерзшего слоя болот // Тр. ГГИ. 1948. Вып. 7 (62). С. 93–105.
10. Калюжный И.Л., Батыев В.И. Формирование температурного режима торфяной залежи при изменении климатических характеристик в северной и северо-западной зоне олиготрофных болот ЕТР // Тр. ГГО. 2015. Вып. 577. С. 156–168.

References

1. Georgievskiy V.Yu., Ezhov A.V., Shalygin A.L., Shiklomanov I.A., Shiklomanov A.I. Assessment of the effect of possible climate changes on hydrological regime and water resources of rivers in the former USSR. *Meteorologiya i Gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 1996, 11: 89–99. [In Russian].
2. Kalyuzhnyi I.L., Romanyuk K.D. Variations of the water regime of bogs of northern and northwestern Russia under influence of climatic factors. *Meteorologiya i Gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2010, 7: 85–98. [In Russian].
3. Domaniitskiy A.P. Possibility of frozen bogs. *Trudy nauchno-issledovatel'skikh uchrezhdeniy Gidrometsluzhby Krasnoy Armii*. Proc. of Research Institutions of the Hydrometeorological Service of the Red Army. Series VIII. Is. 4. 1943: 25–48. [In Russian].
4. Romanov V.V. *Gidrofizika bolot*. Hydrophysics of bogs. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1961: 359 p. [In Russian].
5. Chechkin S.A. *Vodno-teplovoy rezhim neosushennykh bolot i ego raschet*. Water-heat regime of undrained bogs and its calculation. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1970: 205 p. [In Russian].
6. Borodulin V.V., Kalyuzhnyi I.L., Novikov S.M. On the method of measuring and calculating bogs freezing. *Trudy Gosudarstvennogo Gidrologicheskogo Instituta*. Proc. of State Hydrological Institute. 1974, 222: 205–224. [In Russian].
7. *Materialy nablyudeniya bolotnykh stantsiy, 1990: Vypusk 1*. Observation data from bogs stations, 1990. Is. 1. Saint Petersburg, 1993: 548 p. [In Russian].
8. *Nastavleniye gidrometeorologicheskimi stantsiyam i postam*. Guidelines for hydrometeorological stations. *Gidrometeorologicheskiye nablyudeniya na bolotakh. Vypusk 8*. Hydrometeorological observations at bogs. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1990, 8: 360 p. [In Russian].
9. Romanov V.V., Rozhanskaya O.D. Experience of study the physical properties of a frozen layer of bogs. *Trudy Gosudarstvennogo Gidrologicheskogo Instituta*. Proceedings of the State Hydrological Institute. 1948, 7 (61): 93–105. [In Russian].
10. Kalyuzhnyi I.L., Batuev V.I. Thermal regime forming for peat deposit within the north and northwest zones of oligotrophic bogs at the European Russia Territory under the climate changes. *Trudy Glavnoy Geofizicheskoy Observatorii*. Proc. of the Main Geophysical Observatory. 2015, 577: 156–168 [In Russian].