

## Мониторинг температуры почв на многолетнемёрзлых породах в естественных и антропогенно нарушенных условиях Тункинской котловины

© 2019 г. Н.Н. Воропай<sup>1,2\*</sup>, М.В. Киселев<sup>1</sup>, А.А. Черкашина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия;

<sup>2</sup>Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия

\*voropay\_nn@mail.ru

## Monitoring of soil temperature on permafrost in natural and anthropogenic disturbed conditions in the Tunkinskaya Depression

N.N. Voropay<sup>1,2\*</sup>, M.V. Kiselev<sup>1</sup>, A.A. Cherkashina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia;

<sup>2</sup>Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia;

\*voropay\_nn@mail.ru

Received January 9, 2019 / Revised April 3, 2019 / Accepted June 13, 2019

**Keywords:** *anthropogenic influence, coarse-humic cryogenic soils, microclimate monitoring, permafrost soil temperature, the Baikal region, the Tunkinskaya depression.*

### Summary

The territory of the study is the Tunkinsky intermountain basin (South-Western Baikal region, Republic of Buryatia) which belongs to the area of sporadic (island) distribution of permafrost. Soil temperature controls many biotic and abiotic processes in it, so it is important to monitor the freezing and thawing regimes in peat and mineral soils. The object of the study is coarse-humic cryogenic soils on sandy lacustrine-alluvial sediments. The first site was represented by natural coarse-humic cryogenic soils under spruce forest, while the second site was organized on the area where in 1960s the forest had been destroyed and the soils were ploughed. At the end of XX century, the arable lands were abandoned, and now they are covered with steppe grasses (the long fallow). Both sites are located on the permafrost. The atmospheric-soil measuring complex was used to study the state of both the perennial and seasonal permafrost at these two sites. The soil temperatures were measured in automatic mode with a time interval of 1 hour from July 1, 2013 to June 30, 2017 along the soil profile from the surface down to a depth of 320 cm. Anthropogenic interference on one of the sites resulted in changes in vegetation cover, the soil moisture as well as the morphological structure and granulometric composition of the upper part of the soil layer. This caused changes in the temperature regime of the permafrost and its degradation with lowering of its upper limit. The soil on the long fallow is better warmed up and cools down faster than it takes place under the spruce forest. As a result of this, the maximum annual temperature on the surface here is higher by 10 °C, while at a depth of 320 cm – by 5 °C, and the minimum annual temperature on the surface is lower by 7 °C, while at a depth of 320 cm – by 1 °C. On the anthropogenically disturbed area, the warm period (at the soil temperature above 0 °C) on the surface is, on the average, by 22 days longer than on the natural lot. These differences are observed at all depths. As a result, the perennial permafrost is retained under the spruce forest below 130 cm throughout the year (soil temperature  $-0.2 \div -0.9$  °C), while on the fallow the zero isotherm during seasonal thawing falls much deeper 320 cm, and the soil in the layer of 240–320 cm warms up to 2–5 °C.

**Citation:** Voropay N.N., Kiselev M.V., Cherkashina A.A. Monitoring of soil temperature on permafrost in natural and anthropogenic disturbed conditions in the Tunkinskaya Depression. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2019. 59 (4): 517–528. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-4-421>.

Поступила 9 января 2019 г. / После доработки 3 апреля 2019 г. / Принята к печати 13 июня 2019 г.

**Ключевые слова:** *антропогенное воздействие, грубогумусовые криозёмы, микроклиматический мониторинг, многолетняя мерзлота, Прибайкалье, температура почвы, Тункинская котловина.*

По данным автоматического мониторинга с 1 июля 2013 г. по 30 июня 2017 г. на территории Тункинской котловины изучена внутригодовая динамика температуры грубогумусовых криозёмов, оценены последствия сведения леса и агрогенной трансформации гумусового горизонта на режим промерзания и протаивания почв, приведшие к деградации многолетнемёрзлого слоя.

### Введение

Климат почвы принято понимать как многолетний режим температуры и влажности почвы и его географическое распределение, зависящее от

комплекса природных факторов и деятельности человека. К природным условиям формирования и развития почвенного климата относят: атмосферный климат, высоту над уровнем моря, рельеф и экспозицию склонов, геологическое стро-

ение, растительный, снежный и другие покровы, уровень грунтовых вод, близость рек и водоёмов и др. К антропогенным – вырубку леса, распашку, сооружение оросительных или дренажных систем, прокладку дорог, трубопроводов и прочих объектов инфраструктуры и др. [1]. Один из важнейших научных вопросов XX–XXI в. – глобальное потепление [2–4], которое изменяет температурный режим почв, вызывает деградацию многолетнемёрзлых толщ [5–7], смену растительных ассоциаций и почв и, как следствие, изменение ландшафтного облика в целом.

Для достоверных прогнозов и разработки различных сценариев глобального потепления и его экологических последствий необходим мониторинг теплофизического состояния почв на территориях распространения многолетнемёрзлых пород. Особенно актуальны исследования температурного режима почв в зоне островного распространения многолетнемёрзлых пород в связи с высокой чувствительностью формирующихся здесь ландшафтов [8]. Значительные изменения теплофизического состояния почв, в том числе и на многолетнемёрзлых породах, связаны также с антропогенными факторами: вырубкой леса, пожарами, распашкой почв, выпасом скота и другими видами воздействия, которые влияют на биологический, пищевой и водно-воздушный режимы почв.

Формирование температурных полей в почве определяется её теплофизическим состоянием: теплоёмкостью, тепло- и температуропроводностью, которые зависят от целого ряда почвенно-физических факторов: влажности, гранулометрического состава, плотности, порозности, содержания органического вещества, которые обуславливают пространственную неоднородность почв по теплофизическим параметрам. Изучение теплофизического состояния почв во взаимосвязи с их почвенными свойствами необходимо не только для познания генезиса почв, но и для составления прогнозных оценок изменений гидротермических режимов, в том числе деградации многолетней мерзлоты под влиянием антропогенных воздействий. Современные темпы и масштабы изменения климата формируют новые условия существования природной среды [9]. Для их контроля необходима развитая сеть станций климатического мониторинга, покрывающая значительные территории с высоким пространственным разрешением. Наблюдения за температурным режимом почв организованы на

метеорологических станциях, которых в России более 1500, но их плотность уменьшается с запада на восток. Измерения на них начались более ста лет назад [3], однако массовые наблюдения проводятся только с 1930–50-х годов [10].

Цель настоящей работы – оценка внутригодовой динамики температуры почв в зоне островного распространения многолетнемёрзлых пород в естественных и антропогенно нарушенных условиях. Характеристики температурного режима почв представляют собой индикатор наличия/отсутствия многолетней или сезонной мерзлоты и помогают изучать её состояние. Изменение состояния многолетнемёрзлых почв после антропогенного вмешательства оценивается путём сравнения температурного режима на естественном и антропогенно нарушенном участках.

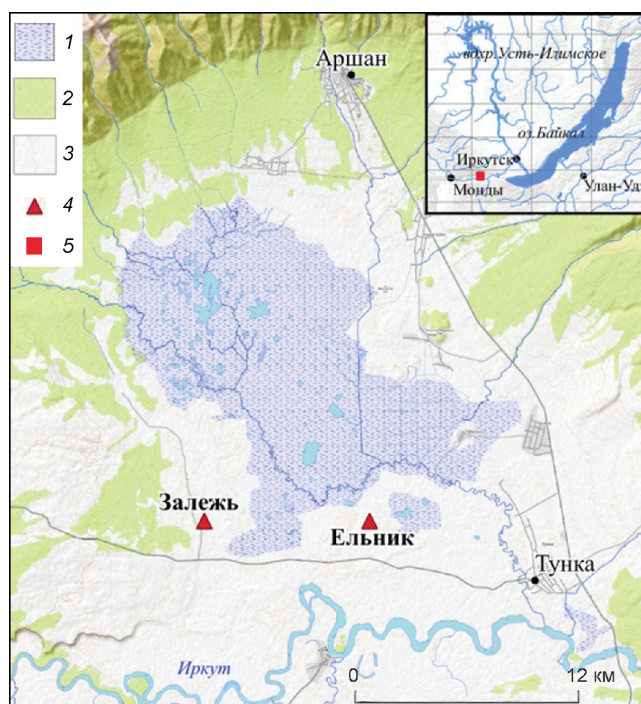
### Характеристика территории исследования

Тункинская межгорная котловина находится на стыке хребтов Тункинские гольцы и Хамар-Дабан (юго-западная часть Байкальской рифтовой зоны в Южно-Сибирской физико-географической области). Территория относится к зоне островного распространения многолетнемёрзлых толщ, характеризуется резко континентальным климатом, а также разнообразием форм рельефа, почвообразующих пород и ландшафтных условий (от степных до горно-таёжных и гольцовых в диапазоне высот 700–3500 м над ур. моря). Средняя годовая температура воздуха по данным метеорологической станции (ГМС) Тунка составляет 0,6 °С. Самый холодный месяц – январь (абсолютный минимум равен –40,1 °С), самые тёплые – июль и август (абсолютный максимум 32,6 °С). Период с отрицательными средними месячными температурами воздуха продолжается с октября по апрель. Переход от тёплого сезона к холодному и обратно довольно резкий. Устойчивые морозы наступают в конце октября [11, 12]. Многолетние изменения климата котловин юго-западного Прибайкалья синхронны глобальным изменениям. За период инструментальных измерений наблюдается статистически значимое повышение температуры воздуха. Средняя годовая температура воздуха на ГМС Тунка с 1976 по 2015 г. увеличилась (0,34 °С/10 лет) за счёт роста температуры в зимние месяцы, в период образо-

вания и развития максимальной мощности Сибирского антициклона [12].

Годовые значения радиационного баланса составляют около 1500 МДж/м<sup>2</sup>, максимум и минимум приходятся на июль и январь соответственно [13]. Режим коротковолновой радиации Байкальского региона в последние 40–50 лет характеризуется понижением прямой и суммарной радиации и увеличением рассеянной (тенденции изменения составляют соответственно –140, –100, +30 МДж/м<sup>2</sup> за 10 лет) [13, 14]. Атмосферные осадки по территории котловины распределяются неравномерно как по сезонам, так и по площади, подчиняясь вертикальной зональности и местной орографии. Годовая сумма осадков на склонах Тункинского хребта – 450–700 мм [15], внутри котловины – до 300 мм. Значительные различия сумм осадков приходятся на тёплый период года, когда выпадает их основная масса (72%); минимальное количество характерно для зимнего периода [14]. В высокогорной части Тункинского хребта в конце августа – начале сентября устанавливается снежный покров, который сохраняется до конца мая – середины июня. В центре котловины продолжительность залегания снежного покрова значительно меньше (146 дней). Запасы снежного покрова становятся больше с увеличением абсолютной высоты в горах. Малоснежностью отличаются впадины по долине р. Иркут, где высота снежного покрова не превышает 30 см. На наветренных склонах и в каровых котловинах она достигает 2–3 м. [16]. Изменения в рядах сумм атмосферных осадков за период инструментальных наблюдений статистически не значимы [14, 15].

По многолетним данным ГМС Тунка (1961–2017 гг.) годовой ход температуры почвы до глубины 120 см характеризуется резким минимумом в конце января – начале февраля и максимумом в начале сентября. Промерзание почвы начинается в конце октября и продолжается до апреля, далее в течение двух–четырёх месяцев почва оттаивает [17]. Анализ долговременных изменений температуры почвы указывает на тенденцию к потеплению, что выражается в повышении средних годовых температур на всех глубинах (0,39–0,51 °С/10 лет). При этом максимальная глубина промерзания (глубина проникновения нулевой изотермы) характерна для февраля–марта. За период наблюдений на ГМС расчётная глубина изменилась с 350 до 300 см [18]. Отметим, однако, что на



**Рис. 1.** Карта-схема расположения площадок исследования:

1 – озёрно-болотный комплекс; 2 – лес; 3 – пашни, луга; 4 – площадки наблюдения; 5 – район работ (на врезке)

**Fig. 1.** Map of the location of the study sites:

1 – wetland; 2 – forest; 3 – cropland, grassland; 4 – observation sites; 5 – study area (on the sidebar)

территории Тункинских впадин широко распространена островная многолетняя мерзлота [19–21].

С 2007 г. на базе Тункинского котловинного стационара Института географии им. В.Б. Соцавы СО РАН проводятся комплексные географические исследования, одна из составляющих которых – мониторинг температуры почвогрунтов в естественных и антропогенно нарушенных условиях. Объект данного исследования – грубогумусовые криозёмы на песчаных озёрно-аллювиальных отложениях. Для анализа выбрано два модельных участка, находящихся на расстоянии около 9 км друг от друга (рис. 1). *Первый участок* представлен *20-летней залежью* на агрозёме светлом окисленно-глеевом (до распашки – криозём глееватый грубогумусовый), *второй участок* – *еловым лесом* на криозёме глееватом грубогумусовом (рис. 2). Дополнительным изолирующим слоем на втором участке служит хвойная подстилка толщиной 5 см. На залежи хвойная подстилка отсутствует, а поверхность почвы покрыта пыреем ползучим. Соглас-

Таблица 1. Характеристика исследуемых участков

| Площадка | Абсолютная высота и координаты             | Антропогенная трансформация геосистем  | Растительность                       | Тип почвы                                       |
|----------|--|--|--------------------------------------|---|
| Залежь   | 729,4 м<br>51°45,5' с.ш.<br>102°21,6' в.д. | Глубокие изменения, которые затронули несколько компонентов геосистем, что не позволяет вернуться в первоначальное состояние | Сообщество пырея ползучего на залежи | Агрозём светлый окисленно-глеевый реградируемый |
| Ельник   | 726,3 м<br>51°45,6' с.ш.<br>102°26,9' в.д. | Незначительные нарушения в структуре выделов, главным образом в растительном покрове; высокий потенциал самовосстановления   | Еловый лес мёртвопокровный           | Криозём глееватый грубогумусовый                |



Рис. 2. Площадки наблюдения (фотография площадки и почвенный разрез):

*a* – залежь; *б* – еловый лес (ельник)

Fig. 2. Research sites (photograph of the site and soil section):

*a* – abandoned cropland; *б* – spruce forest (spruce)

но картографическим данным, в конце XIX в. оба эти участка находились под лесом. С начала XX в. первый участок стали использовать под пашню (табл. 1). Кризис агропроизводственного комплекса в конце XX в. привёл к тому, что

большая часть пахотных угодий на территории Тункинской котловины была заброшена и в данный момент они находятся на различных постагрогенных стадиях восстановления почвенно-растительного покрова [22, 23].

## Методы исследования

Внутригодовая динамика температуры, режима промерзания и протаивания криозёмов грубогумусовых под еловым лесом и на залежи изучалась на основе данных измерения за 2013–2017 гг., полученных при помощи атмосферно-почвенных измерительных комплексов (АПИК) [24]. Датчики температуры АПИК (DS18B20) располагают на поверхности почвы и на следующих глубинах: 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 80, 120, 160, 240 и 320 см. Датчик влажности почвы (TRIME-PCO32) устанавливается на глубине 15 см. Погрешность измерения температуры составляет  $\pm 0,1$  °С, влажности почвы  $\pm 2\%$ ; периодичность измерений – 1 час. Для мониторинга используется «антивандальный» логгер, который размещается там, где невозможно применять демаскирующие конструкции: антенны, солнечные батареи и дополнительные датчики. В результате этих ограничений получается контроллер, имеющий: ультрамалое энергопотребление (питание от батарей); большую внутреннюю энергонезависимую память измерений; интерфейс USB, используется специальный кабель с герметичным разъёмом для подключения к логгеру; максимальную степень защиты оболочки прибора IP68 (вероятна работа ниже уровня грунтовых вод); возможность использования только датчиков параметров грунта (температуры, влажности, проводимости), а также уровня воды, в отдельных случаях датчиков толщины снега и температуры воздуха.

В регистраторе применяют микроконтроллер, который через цифровой интерфейс (1-Wire) опрашивает температурные датчики, датчик влажности, а также аналоговые входы и сохраняет данные в энергонезависимой памяти с привязкой ко времени измерения с помощью часов. В памяти логгера фиксируется также напряжение питания. Интерфейс USB обеспечивает связь регистратора с компьютером для конфигурирования его работы и считывания данных [25]. На ГМС Росгидромета России температуру почв измеряют с помощью стандартных метеорологических приборов: вытяжных почвенно-глубинных термометров и коленчатых термометров Савинова [26].

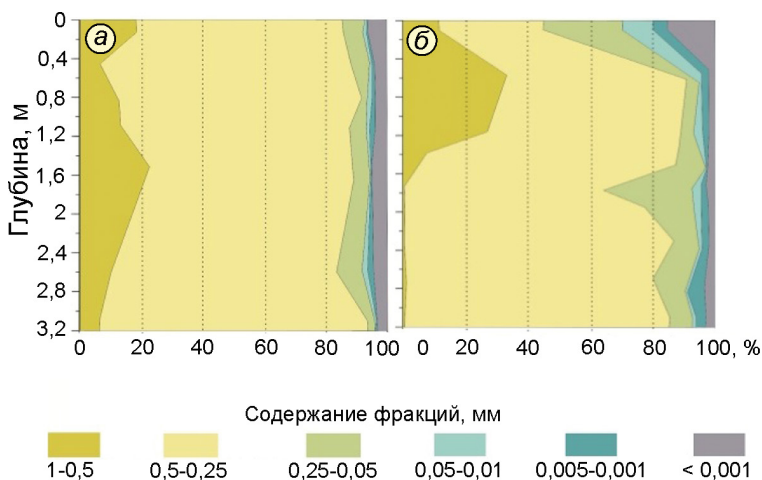
Для оценки корректности использования АПИК с целью мониторинга температурно-го режима почвогрунтов выполнено сравнение

данных стандартных метеорологических приборов с данными АПИК. Коэффициенты корреляции составили 0,9 и более для всех глубин. Наибольшие ошибки как в верхних, так и в нижних почвенных слоях характерны для холодного периода [25, 27]. На глубине 20 см наблюдаются наибольшие отклонения температуры почвы, измеренной АПИК, от стандартных измерений, в холодное время года они положительные – 1,8–2,0 °С. Уменьшаются отклонения с переходом от холодного периода к тёплому. Летом отклонения меняют знак и в среднем составляют  $-0,5 \div -0,8$  °С. С увеличением глубины отклонения между температурой почвы, измеренной АПИК и стандартными вытяжными почвенно-глубинными термометрами, падают. Например, на глубине 160 см измеренная температура почвы с помощью АПИК в весенний и летний периоды выше на 1,0–1,5 °С, в осенний и зимний периоды – ниже на 0,1–0,3 °С. На глубине 320 см разность температур составляет 0,1–0,2 °С. Такие различия находятся в рамках погрешности измерений (0,2 °С) приборов. Полученные сравнительные оценки показывают, что атмосферно-почвенный измерительный комплекс пригоден для мониторинга температурного режима почвогрунтов. При этом большие погрешности, возникающие в зимний период, могут быть связаны с конструктивным различием приборов измерения температуры.

Физико-химические свойства почв и подстилающих грунтов изучены общепринятыми в почвоведении методами. Гранулометрический состав определялся методом пипетки с диспергацией пиррофосфатом натрия по Качинскому [28], определение влажности велось гравиметрическим способом [29]. Экспериментальные данные обрабатывали с использованием программ АПИК и Microsoft Excel, а графическое представление велось при помощи Grapher и Surfer.

## Результаты исследования и их обсуждение

Рассчитаны средние суточные, средние месячные и годовые значения температуры почвы в профиле 0–320 см и влажности почвы на глубине 15 см. Объёмная влажность в среднем за период с температурой выше 0 °С на залежи составила 18%, в ельнике, где почвы заторфованные [30], –



**Рис. 3.** Изменение гранулометрического состава с глубиной:

*a* – залежь; *б* – еловый лес (ельник)

**Fig. 3.** The change in granulometric composition with depth:

*a* – abandoned cropland; *b* – spruce forest (spruce)

37%. По данным измерений на ГМС Тунка максимальная толщина снега за зиму в период 1932–2017 гг. редко превышала 20–25 см [18]. Микроклиматические измерения на площадках исследования в 2013–2017 гг. предусматривали снегосъёмку в период максимального снегонакопления (март). Толщина снега на залежи в разные годы составляла от 17 до 22 см, а в еловом лесу была на 2–3 см меньше. При этом на открытом участке плотность снега больше, чем на облесённом (170–180 и 120–125 кг/м<sup>3</sup> соответственно).

В результате распашки криозёма глееватого грубогумусового произошли гомогенизация верхней части почвенного профиля и облегчение его гранулометрического состава за счёт частичного припахивания нижележащего песчаного горизонта. Разницу в физико-химических характеристиках пахотного горизонта и бывшего естественного горизонта можно оценить, сопоставляя свойства заполнителя криогенных клиньев. Агрогенное использование привело к изменению химических (частичной минерализации органического вещества, обеднению органическим веществом и азотом) и физических (гранулометрический состав, плотность) свойств гумусового горизонта почвы, что стало причиной изменения таких характеристик, как теплопроводность и влагоёмкость. Почвы в ельнике имеют менее однородное распределение фракций гранулометрического состава по профилю: от поверхности до 130 см доля крупного песка (фракция 0,5–1,0 мм) составляет от 10 до 35%, с максимумом (30–35%) в слое 50–110 см. Нижележащая пачка отложений представлена преимущественно средним песком (фракция 0,25–0,5 мм).

На залежи содержание фракции крупного песка изменяется от 8–10 до 20% по всему профилю. При этом основная доля также приходится на средний песок (рис. 3). Таким образом, на залежи отмечается более однородное распределение фракций гранулометрического состава по профилю. В результате почвенно-грунтовая толща при прочих одинаковых условиях может прогреваться более равномерно и на большую глубину, что за время антропогенного использования участка привело к деградации многолетней мерзлоты и опусканию её верхней границы.

Распределение температуры почвы по профилю на изучаемых участках существенно отличается (табл. 2). Для залежи можно выделить два чётко выраженных периода: холодный, когда температура почвы по всему профилю ниже 0 °С, и тёплый, когда температура почвы выше 0 °С. При этом в зимы 2013/14 и 2014/15 гг. нижняя граница сезонно-мёрзлого слоя находилась ниже 320 см, в то время как зимой 2016/17 г. нижняя граница сезонно-мёрзлого слоя отмечалась на глубине около 300 см. В то же время участок, на котором расположен ельник, – сезонно-протаивающий. Максимальная глубина нулевой изотермы в тёплый период составляет 120–130 см (рис. 4), ниже этой отметки наблюдается многолетняя мерзлота с температурой от 0 до –2 °С. В холодный период в течение всех лет наблюдений на глубине около 120–130 см находилась изотерма –2 °С. На этой же глубине утяжеляется гранулометрический состав за счёт резкого снижения фракции среднего песка.

Такие большие различия в особенностях температурного режима при схожем гранулометри-

Таблица 2. Средняя месячная, максимальная, минимальная температура почвы за период измерений (2013–2017 гг.)

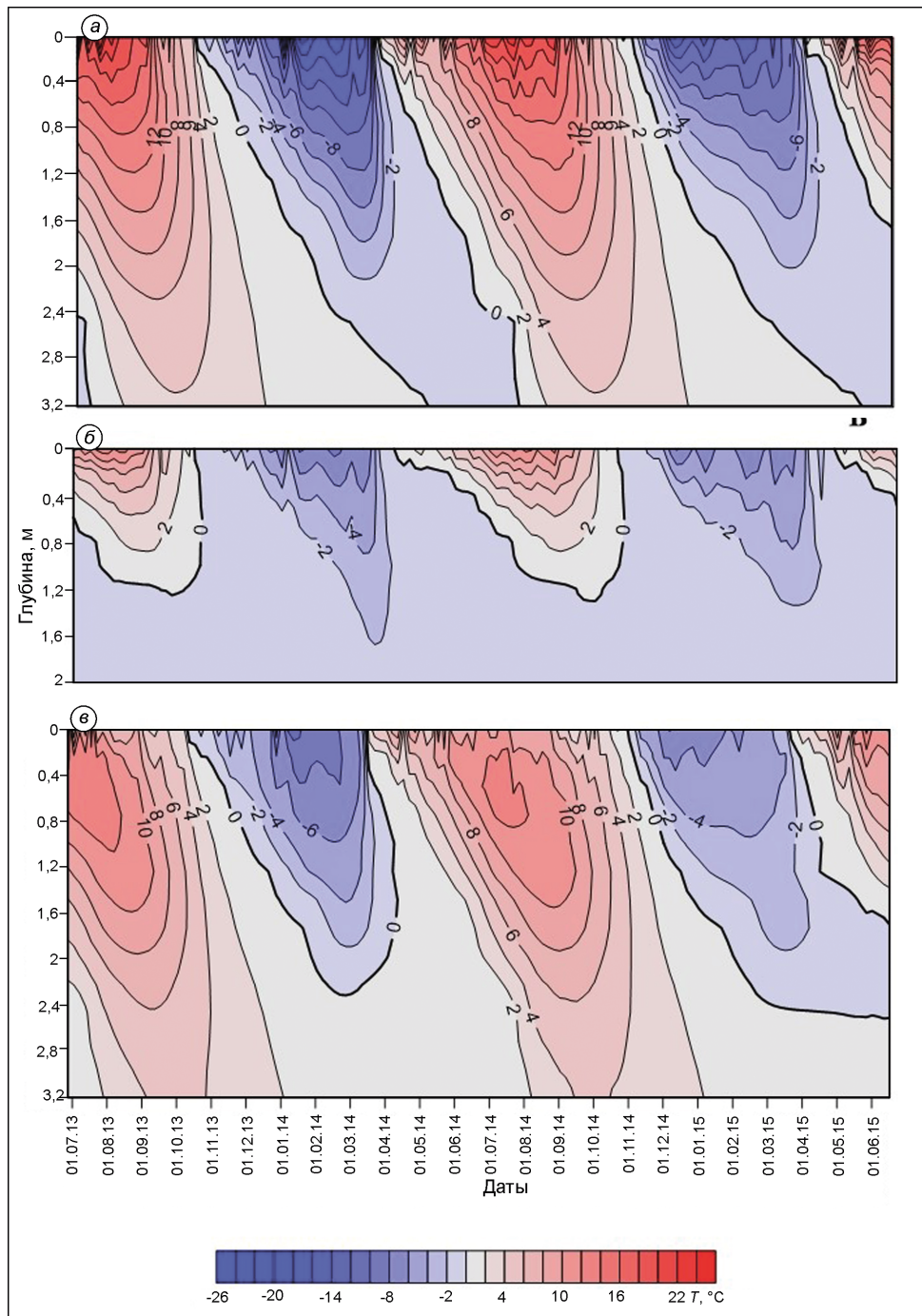
| Глубина,<br>см | Температура почвы, °С |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                       |                      |
|----------------|-----------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------------|----------------------|
|                | средняя месячная      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | максимальная/<br>дата | минимальная/<br>дата |
|                | I                     | II    | III  | IV   | V    | VI   | VII  | VIII | IX   | X    | XI   | XII  |                       |                      |
| <i>Залежь</i>  |                       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                       |                      |
| 0              | -11,2                 | -13,0 | -8,4 | -5,4 | -2,5 | 14,8 | 15,4 | 16,5 | 14,9 | 9,4  | 0,3  | -2,9 | 41,6/26.06.17         | -24,1/20.11.16       |
| 2              | -5,4                  | -8,2  | -6,8 | -4,8 | -1,8 | 8,6  | 12,8 | 14,5 | 13,2 | 9,4  | 1,3  | -1,9 | 28,9/26.06.17         | -17,4/27.04.14       |
| 5              | -4,9                  | -7,7  | -6,7 | -4,8 | -2,0 | 7,6  | 11,9 | 13,7 | 12,8 | 9,2  | 1,5  | -1,6 | 25,6/08.07.16         | -16,7/27.04.14       |
| 10             | -4,5                  | -7,3  | -6,5 | -4,8 | -2,2 | 7,0  | 11,2 | 13,1 | 12,4 | 9,3  | 1,8  | -1,3 | 24,3/08.07.16         | -16,2/28.04.14       |
| 15             | -4,1                  | -7,0  | -6,4 | -4,8 | -2,4 | 6,4  | 10,5 | 12,5 | 12,1 | 9,1  | 1,9  | -1,1 | 23,4/08.07.16         | -15,8/28.04.14       |
| 20             | -3,7                  | -6,6  | -6,1 | -4,7 | -2,5 | 6,0  | 10,0 | 12,1 | 11,9 | 9,0  | 2,1  | -0,9 | 22,3/08.07.16         | -15,3/28.04.14       |
| 40             | -2,5                  | -5,1  | -5,2 | -4,5 | -2,8 | 4,4  | 7,8  | 10,4 | 10,7 | 8,5  | 2,8  | -0,1 | 19,4/01.08.16         | -13,2/28.04.14       |
| 80             | -0,3                  | -1,7  | -1,0 | -0,9 | -1,3 | 2,5  | 3,1  | 4,0  | 5,3  | 5,1  | 2,7  | 1,3  | 16,1/05.08.16         | -8,4/13.02.17        |
| 120            | 0,6                   | -0,6  | -0,5 | -0,1 | 0,3  | 2,1  | 2,5  | 3,2  | 2,4  | 2,8  | 1,9  | 1,6  | 13,6/11.08.16         | -5,8/24.02.17        |
| 160            | 1,2                   | 0,3   | 0,1  | 0,2  | 0,3  | 1,2  | 1,9  | 2,8  | 2,2  | 1,7  | 1,5  | 1,5  | 11,3/14.08.16         | -3,5/26.02.17        |
| 240            | 0,5                   | 0,0   | -0,1 | -0,1 | 0,1  | 0,0  | 2,0  | 2,2  | 1,7  | 1,3  | 1,2  | 1,2  | 6,9/28.08.16          | -0,2/16.06.17        |
| 320            | 0,6                   | 0,3   | 0,1  | 0,0  | 0,2  | 0,1  | 0,5  | 1,8  | 1,2  | 0,9  | 0,7  | 0,7  | 4,7/05.10.16          | -0,1/25.06.17        |
| <i>Ельник</i>  |                       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                       |                      |
| 0              | -7,7                  | -7,8  | -4,0 | 1,1  | 4,8  | 10,1 | 12,8 | 12,4 | 6,7  | -0,1 | -3,8 | -6,2 | 20,4/31.07.16         | -11,3/20.11.16       |
| 2              | -8,8                  | -8,4  | -3,9 | 1,6  | 6,0  | 12,1 | 13,9 | 13,2 | 7,3  | -0,8 | -5,3 | -7,3 | 21,8/26.06.17         | -17,4/19.11.16       |
| 5              | -8,2                  | -7,9  | -4,0 | 0,9  | 5,1  | 10,9 | 12,7 | 12,3 | 6,9  | -0,4 | -4,3 | -6,6 | 21,1/26.06.17         | -13,6/20.11.16       |
| 10             | -7,0                  | -7,1  | -3,8 | 0,2  | 3,5  | 8,9  | 10,9 | 11,0 | 6,5  | 0,3  | -2,9 | -5,5 | 17,2/26.06.17         | -9,2/05.12.16        |
| 15             | -6,5                  | -6,8  | -3,9 | -0,4 | 2,1  | 6,9  | 9,2  | 9,8  | 6,0  | 0,4  | -2,3 | -4,9 | 14,4/01.08.16         | -8,4/31.01.17        |
| 20             | -6,0                  | -6,4  | -3,8 | -0,6 | 1,1  | 5,4  | 7,8  | 8,7  | 5,5  | 0,5  | -1,7 | -4,3 | 12,7/01.08.16         | -7,8/31.01.17        |
| 40             | -4,3                  | -5,2  | -3,6 | -0,9 | -0,3 | 1,8  | 4,4  | 6,0  | 4,3  | 0,5  | -0,6 | -2,5 | 9,0/10.08.16          | -5,9/08.03.14        |
| 80             | -2,0                  | -3,4  | -3,1 | -1,1 | -0,6 | -0,3 | 0,7  | 2,7  | 2,5  | 0,4  | -0,3 | -0,5 | 5,6/22.08.14          | -4,6/09.03.14        |
| 120            | -0,4                  | -1,4  | -2,4 | -1,2 | -0,8 | -0,6 | -0,5 | 0,0  | 0,5  | 0,0  | -0,3 | -0,3 | 0,2/23.09.14          | -3,5/15.03.14        |
| 160            | -0,2                  | -0,3  | -1,0 | -0,6 | -0,4 | -0,4 | -0,6 | -0,5 | -0,3 | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,1/11.12.14         | -2,3/18.03.14        |
| 240            | -0,4                  | -0,3  | -0,6 | -0,6 | -0,5 | -0,5 | -0,7 | -0,6 | -0,5 | -0,3 | -0,4 | -0,3 | -0,2/11.12.14         | -1,3/26.03.14        |
| 320            | -0,5                  | -0,3  | -0,4 | -0,6 | -0,5 | -0,5 | -0,7 | -0,6 | -0,5 | -0,4 | -0,4 | -0,4 | -0,2/11.12.14         | -0,9/03.04.14        |

ческом составе по всему профилю проявились на фоне изменения ландшафтной структуры одного из участков. При этом факторы формирования климата почвы на данных площадках одинаковые: атмосферный климат, форма рельефа, нижележащие многолетнемерзлые породы, близость рек, оросительных или дренажных систем, высота над уровнем моря. Сведение растительности (леса) и распашка верхних горизонтов почвы на залежи не только изменили режим прогрева почвы в тёплый период и промерзания в холодный, но и уменьшили влажность грунта. В летний период участки, закрытые кронами деревьев, получают меньше увлажнения в виде осадков по сравнению с открытыми участками. Однако за счёт меньшего прогрева потери влаги (испарение) на этих участках также значительно ниже. В результате почва в ельнике более влажная, чем на залежи. Увлажнение почвы в свою очередь влияет на её прогрев и промерзание.

Каждый из перечисленных здесь факторов вносит относительно небольшой вклад в изменения температурного режима, но при комплексном

воздействии всех факторов эти изменения становятся существенными. В первую очередь это отражается на глубине проникновения в глубь почвы суточных и сезонных колебаний температуры и, как следствие, на скорости прогрева и промерзания почвы, что привело к деградации многолетней мерзлоты в верхнем слое почвогрунтов. Максимальные амплитуды суточных колебаний температуры поверхности почвы на площадках отмечаются с мая по июнь. На залежи максимальная суточная амплитуда температуры поверхности наблюдалась 18 мая 2014 г. и составила 48,1 °С, в ельнике – 30 мая этого же года (8,7 °С). Средняя скорость промерзания почвы от поверхности до 40 см на залежи составляет 2 см/день, глубже процесс замедляется. В ельнике промерзание происходит намного быстрее и средняя скорость составляет 5 см/день. Протаивание почвы на залежи от поверхности до 40 см имеет среднюю скорость 2,3 см/день, а в ельнике – 0,8 см/день.

Самым тёплым за период исследования было лето 2016 г. На залежи максимальная в годовом ходе средняя суточная температура в профиле



**Рис. 4.** Средняя суточная температура почвы (а – залежь, б – ельник), разности средних суточных температур ( $\Delta T = T_{\text{залежь}} - T_{\text{ельник}}$ ) (в) за период 01.07.2013 г. – 30.06.2017 г.

**Fig. 4.** Daily soil temperatures at abandoned cropland (a) and spruce forest (b) sites, and difference in daily temperatures between sites ( $\Delta T = T_{\text{abandoned cropland}} - T_{\text{spruce forest}}$ ) (c) for the period 01.07.2013–30.06.2017

от поверхности до 320 см изменялась от 30,9 до 4,9 °С. В этом же году в ельнике максимальная средняя суточная температура почвы составляла 20,4 и –0,2 °С на аналогичных глубинах. Самой холодной за период исследования была зима

2016/17 г. Минимальная в годовом ходе средняя суточная температура на поверхности на залежи составляла –11,3 °С, в ельнике –4,1 °С. Соответственно на глубине 320 см зафиксированы температуры –1,2 и –0,1 °С.



Переход температуры поверхности почвы через  $0^{\circ}\text{C}$ , который соответствует началу устойчивого её промерзания, на обоих участках происходит в ноябре. Однако в ельнике он в большинстве случаев наблюдается раньше. Так, осенью 2014 г. разница составила 14 дней, 2015 г. — 10 дней, 2016 г. — 3 дня. Исключением стал 2013 г., когда переход температуры почвы через  $0^{\circ}\text{C}$  в ельнике зафиксирован на 2 дня позже, чем на залежи. Устойчивый переход средней суточной температуры поверхности почвы через  $0^{\circ}\text{C}$  в сторону положительных температур, а следовательно, и оттаивание почвы начинаются на залежи в марте, а в ельнике — в апреле (в среднем 25 марта и 18 апреля соответственно). Таким образом, во время наступления метеорологической весны залежь начинает оттаивать значительно раньше: в 2014 г. эта разница составила 15 дней, в 2015 г. — 25 дней, в 2016 г. — 22 дня, в 2017 г. — 6 дней. Разница в датах начала промерзания и оттаивания поверхности почвы возникает в основном из-за различий в растительном покрове. При промерзании суточная амплитуда температуры на поверхности почвы в ельнике меньше, чем на залежи, а прогрев поверхности не такой интенсивный, что способствует активному промерзанию почвы. Весной в ельнике растительность также поглощает часть приходящей солнечной радиации, тем самым уменьшая скорость таяния снега, что увеличивает продолжительность существования мёрзлого слоя.

С глубиной различия температуры почвы между площадками возрастают. Так, на залежи на глубине 120 см переход температуры через  $0^{\circ}\text{C}$  в сторону отрицательных температур наблюдается в декабре, тогда как в ельнике он происходит преимущественно в ноябре. Переход через  $0^{\circ}\text{C}$  в сторону положительных температур на глубине 120 см на залежи фиксируется в мае, а в ельнике в сентябре. На залежи продолжительность периода с положительными температурами почвы на поверхности больше, она изменяется в пределах 198–215 дней, тогда как в ельнике составляет 176–193 дня. На залежи с увеличением глубины продолжительность периода с температурой выше  $0^{\circ}\text{C}$  почти не изменяется и на 120 см в разные годы составляет 204–219 дней. В то время как в ельнике этот период значительно короче — 22–80 дней, что определяют условия конкретного года. Глубже 130 см наблюдается многолетняя мерзлота.

## Заключение

Исследования на двух модельных участках (20-летняя залежь и еловый лес) позволили установить различия почвенно-климатических характеристик. Использование первого исследуемого участка под пашню в начале XX в. и его переход в залежное состояние в конце XX в. привели к изменению температурного режима почвы и грунта, деградации многолетней мерзлоты на этом участке и опусканию верхней её границы. После антропогенного вмешательства незначительно изменился гранулометрический состав верхней части почв на территории, занятой в настоящее время залежью. Однако основная причина изменения климатического режима почв и подстилающих грунтов — сведение растительности (изменение фитоценозов, их проективного покрытия и др.), создающее экранирующий эффект (у лесной подстилки в ельнике — теплоизоляционный).

Полученные данные показывают, что растительность сильно влияет на поглощение части приходящей коротковолновой солнечной радиации и задерживает часть отражённой коротко- и длинноволновой радиации. Это вызывает явные различия в прогреве/охлаждении почв исследуемых участков. Почва на залежи лучше прогревается и быстрее остывает, чем в еловом лесу. Здесь максимальная в годовом ходе средняя суточная температура на поверхности выше на  $10^{\circ}\text{C}$ , на глубине 320 см — на  $5^{\circ}\text{C}$ . Минимальная в годовом ходе температура на поверхности залежи ниже на  $7^{\circ}\text{C}$ , а на глубине 320 см — на  $1^{\circ}\text{C}$ . На антропогенно нарушенном участке тёплый период (при температуре почвы выше  $0^{\circ}\text{C}$ ) на поверхности более продолжительный (в среднем на 22 дня), чем на естественном участке. С увеличением глубины различия сохраняются. В результате в еловом лесу ниже 130 см наблюдается многолетняя мерзлота (температура почвы  $-0,2 \div -0,9^{\circ}\text{C}$  в течение всего года), а на залежи нулевая изотерма при сезонном протаивании опускается значительно глубже 320 см, при этом грунт в слое 240–320 см прогревается до  $2-5^{\circ}\text{C}$ .

**Благодарности.** Исследование выполнено при поддержке РАН (проект 0347-2016-003) и РФФИ (грант № 18-05-00306).

**Acknowledgments.** This study was funded by Russian Academy of Sciences (project 0347-2016-003) and partially by Russian Foundation of Basic Researches (grant 18-05-00306).

## Литература

## References

1. Шульгин А.М. Климат почвы и его регулирование. Л.: Гидрометеоздат, 1967. 300 с.
2. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds.: T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
3. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 605 с.
4. Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В., Смирнов В.Д. Географические и сезонные особенности современного глобального потепления // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. № 2. С. 41–62.
5. Калюжный И.Л., Лавров С.А. Влияние климатических изменений на глубину промерзания почв в бассейне р. Волга. // Лёд и Снег. 2016. № 56 (2). С. 207–220.
6. Малахова В.В., Голубева Е.Н. Оценка устойчивости состояния мерзлоты на шельфе Восточной Арктики при экстремальном сценарии потепления в XXI в. // Лёд и Снег. 2016. № 56 (1). С. 61–72.
7. Осокин Н.И., Сосновский А.В., Накалов П.Р., Чернов Р.А., Лаврентьев И.И. Климатические изменения и возможная динамика многолетнемерзлых грунтов на архипелаге Шпицберген. // Лёд и Снег. 2012. Т. 52. № 2. С. 115–120.
8. Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Бобрик А.А., Москаленко Н.Г., Пономарева О.Е. Температурные режимы северотаежных почв Западной Сибири в условиях островного распространения многолетнемерзлых пород // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1462–1473. doi: 10.1134/S1064229315100038.
9. Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А. Влияние факторов среды на эмиссию CO<sub>2</sub> с поверхности олиготрофных торфяных почв Западной Сибири // Почвоведение. 2012. № 6. С. 658–667. doi: 10.1134/S106422931206004X.
10. Гиличинский Д.А., Быховец С.С., Сороковиков В.А., Федоров-Давыдов Д.Г., Барри Р.Г., Жанг Т., Гаврилова М.К., Алексеева О.И. Использование данных метеорологических станций для оценки тенденций многолетних изменений температуры почв на территории сезонной и многолетней криолитозоны Рос-
1. Shul'gin A.M. *Klimat pochvy i ego regulirovanie*. Soil climate and its regulation. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1967: 300 p. [In Russian].
2. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds.: Stocker T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: 1535 p.
3. *Vtoroy otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii*. The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Moscow: Rosgydromet, 2014: 605 p. [In Russian].
4. *Gruza G.V., Ran'kova E.YA., Rocheva E.V., Smirnov V.D.* Geographical and seasonal features of modern global warming. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*. Fundamental and applied climatology. 2015, 2: 41–62. [In Russian].
5. *Kalyuzhny I.L., Lavrov S.A.* Effect of climate changes on the soil freezing depth in the Volga River basin. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (2): 207–220. [In Russian].
6. *Malakhova V.V., Golubeva E.N.* Estimation of the permafrost stability on the East Arctic shelf under the extreme climate warming scenario for the XXI century. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (1): 61–72. [In Russian].
7. *Osokin N.N., Sosnovskiy A.V., Nakalov P.R., Chernov R.A., Lavrentiev I.I.* Climate change and dynamics of the permafrost on Svalbard. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2012, 52 (2): 115–120. [In Russian].
8. *Goncharova O.YU., Matyshak G.V., Bobrik A.A., Moskalenko N.G., Ponomareva O.Y.* Temperature regimes of northern taiga soils in the isolated permafrost zone of Western Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2015, 12: 1329–1340. doi: 10.1134/S1064229315100038.
9. *Golovatskaya E.A., Dyukarev E.A.* The influence of environmental factors on the CO<sub>2</sub> emission from the surface of oligotrophic peat soils in West Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2012, 45 (6): 588–597. doi: 10.1134/S106422931206004X.
10. *Gilichinskiy D.A., Bykhovets S.S., Sorokovikov V.A., Fedorov-Davydov D.G., Barri R.G., Zhang T., GavriloVA M.K., Alekseyeva O.I.* Using data from meteorological stations to assess trends in perennial changes in soil temperature in the territory of the seasonal and multiyear cryolithozone of Russia. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2000, IV (3): 59–66. [In Russian].
11. *Vasilenko O.V., Voropay N.N.* Peculiarities of climate formation in the basins of the south-western Baikal region. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*. News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series. 2015, 2: 104–111. [In Russian].
12. *Vasilenko O.V., Voropay N.N.* Regional tendencies in air temperature at the southwestern Pribaikalie. IOP Conf. Se-

- сии // Криосфера Земли. 2000. Т. IV. № 3. С. 59–66.
11. *Василенко О.В., Воронай Н.Н.* Особенности формирования климата котловин юго-западного Прибайкалья // Изв. РАН. Сер. геогр. 2015. № 2. С. 104–111.
  12. *Vasilenko O.V., Voropay N.N.* Regional tendencies in air temperature at the southwestern Pribaikalie // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. № 190. 012039. doi: 10.1088/1755-1315/190/1/012039.
  13. *Парежева Т.В., Воронай Н.Н.* Мониторинг составляющих радиационного баланса в коротковолновой части спектра на территории Тункинской котловины // Материалы Всерос. науч.-практич. конф. «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России». Иркутск, 2018. С. 183–187.
  14. *Густокашина Н.Н.* Многолетние изменения основных элементов климата на территории Предбайкалья. Иркутск: Ин-т географии СО РАН, 2003. 108 с.
  15. *Василенко О.В.* Режим осадков Тункинской котловины // Материалы междунар. конф. по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды «ENVIROMIS – 2010». Томск, 2010. С. 27–28.
  16. *Макаров С.А., Черкашина А.А., Атутова Ж.В., Бардаш А.В., Воронай Н.Н., Кичигина Н.В., Мутин Б.Ф., Осипова О.П., Ухова Н.Н.* Катастрофические селевые потоки, произошедшие в поселке Аршан Тункинского района Республики Бурятия 28 июня 2014 г. Иркутск: Ин-т географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2014. 111 с.
  17. *Северюгина М.В., Воронай Н.Н.* Многолетние изменения температуры почвы на метеостанции Тунка // Материалы IX Сибирского совещ. по климатологическому мониторингу. Томск, 2015. С. 71.
  18. *Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М.* Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России (Электронный ресурс) // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549 – Режим доступа: <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных>
  19. *Белусов В.М., Будэ И.Ю., Радзиминович Я.Б.* Физико-географическая характеристика и проблемы экологии юго-западной ветви Байкальской рифтовой зоны: учебное пособие. Иркутск: Иркутский гос. ун-т, 2000. 160 с.
  20. *Солоненко В.П.* Вечная мерзлота // Очерки инженерной геологии Восточной Сибири. Иркутск: Earth and Environmental Science. 2018, 190: 012039. doi: 10.1088/1755-1315/190/1/012039.
  13. *Parezheva T.V., Voropay N.N.* Monitoring of the components of the radiation balance in the shortwave part of the spectrum on the territory of the Tunkinskaya Depression. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Sovremennyye tendentsii i perspektivy razvitiya gidrometeorologii v Rossii»*. Proc. of the All-Russian Scientific and Practical Conf. «Current Trends and Prospects for the Development of Hydrometeorology in Russia». Irkutsk, 2018: 183–187. [In Russian].
  14. *Gustokashina N.N.* *Mноголетnie izmeneniya osnovnykh elementov klimata na territorii Predbaikalia*. Long-term changes of the main climate elements in the territory of the Predbaikalia. Irkutsk: V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the RAS, 2003: 108 p. [In Russian].
  15. *Vasilenko O.V.* Rainfall regime of the Tunkinskaya depression. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii po izmeneniyam, modelirovaniyu i informatsionnym sistemam dlya izucheniya okruzhayushchey sredy «ENVIROMIS–2010»*. Proc. of the intern. Conf. on measurements, modeling and information systems for the study of the environment «ENVIROMIS–2010». Tomsk, 2010: 27–28. [In Russian].
  16. *Makarov S.A., Cherkashina A.A., Atutova J.V., Bardash A.V., Voropay N.N., Kichigina N.V., Mutin B.F., Osipova O.P., Ukhova N.N.* *Katastroficheskiye selevyeye potoki, proizoshedshiye v poselke Arshan Tunkinskogo rayona Respubliki Buryatiya 28 iyunya 2014 g.* Catastrophic mudflows that occurred in the village of Arshan, Tunkinsky district of the Republic of Buryatia on June 28, 2014. Irkutsk: V.B. Sochavy Institute of Geography, Siberian Branch of the RAS, 2014: 111 p. [In Russian].
  17. *Severyugina M.V., Voropay N.N.* Perennial changes in soil temperature at the Tunka meteorological station. *Materialy IX Sibirskogo soveshchaniya po klimato-ekologicheskomu monitoringu*. Proc. of the IX Siberian Conf. on Climate-Ecological Monitoring. 2015: 71 p. [In Russian].
  18. *Bulygina O.N., Veselov V.M., Razuvaev V.N., Aleksandrova T.M.* Description of the array of urgent data on the main meteorological parameters at Russian stations Certificate of state registration of the database 2014620549 [http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#description of the mass-data](http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#description%20of%20the%20mass-data).
  19. *Belousov V.M., Bude I.U., Radziminovich Y.B.* *Fiziko-geograficheskaya kharakteristika i problemy ekologii yugo-zapadnoy vetvi Baykal'skoy riftovoy zony: uchebnoe posobie*. Physico-geographical characteristics and environmental problems of the southwestern branch of the Baikal rift zone: a tutorial. Irkutsk: Irkutsk State University, 2000: 160 p. [In Russian].
  20. *Solonenko V.P.* *Permafrost. Ocherki inzhenernoy geologii Vostochnoy Sibiri*. Essays on engineering geology of Eastern Siberia. Irkutsk: Irkutsk book publishing house, 1960: 37–45. [In Russian].
  21. *Nekrasov I.A., Li G.E.* Permafrost rocks of the Tunkinskaya Depression. *Geokriologicheskiye usloviya Zabaykal'ya i Pribaykal'ya*. Permafrost rocks of the Tunkinskaya Depres-

- Иркутск: Иркутское книжное изд-во, 1960. С. 37–45.
21. Некрасов И.А., Ли Г.Е. Многолетнемерзлые породы Тункинской впадины // Геокриологические условия Забайкалья и Прибайкалья. М.: Наука, 1967. С. 78–90.
  22. Черкашина А.А., Голубцов В.А., Силаев А.В. Постагrogenная трансформация почв Тункинской котловины (Юго-Западное Прибайкалье) // Изв. Иркутского гос. ун-та. Сер. «Науки о Земле». 2015. Т. 11. С. 128–140.
  23. Силаев А.В. Оценка нарушенности территории Тункинской котловины с использованием ГИС-технологий. Экологический риск // Материалы IV Всерос. науч. конф. с международ. участием (Иркутск, 18–21 апреля 2017 г.). Иркутск: Ин-т географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2017. С. 111–113.
  24. Кураков С.А. Система автономного мониторинга состояния окружающей среды // Датчики и системы. 2012. № 4. С. 29–32.
  25. Kiselev M.V., Voropay N.N., Dyukarev E.A., Kurakov S.A., Kurakova P.S., Makeev E.A. Automatic meteorological measuring systems for microclimate monitoring // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. № 190. 012031. doi: 10.1088/1755-1315/190/1/012031.
  26. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Ч. 1. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 300 с.
  27. Киселев М.В., Воронай Н.Н. Сравнительный анализ результатов измерения температуры почвогрунтов с использованием атмосферно-почвенного измерительного комплекса и вытяжных термометров // Материалы Всерос. науч.-практич. конф. «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России». Иркутск, 2018. С. 551–554.
  28. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
  29. ГОСТ 28268–89 Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений. М.: Стандартинформ, 2005. 6 с.
  30. Шейн Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.
  22. Cherkashina A.A., Golubtsov V.A., Silaev A.V. Postagrogenic transformation of soils in the Tunkinskaya depression (South-Western Baikal region). *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemle*. News of the Irkutsk State University. Series: Earth Sciences. 2015, 11: 128–140. [In Russian].
  23. Silaev A.V. Assessment of the disturbance of the territory of the Tunkinskaya depression with the use of GIS technologies. Ecological risk. *Materialy IV Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem (g. Irkutsk, 18–21 aprelya 2017 g.)*. Proce. of the IV All-Russian Scientific Conf. with international participation (Irkutsk, April 18–21, 2017). 2017: 111–113. [In Russian].
  24. Kurakov S.A. System of autonomous monitoring of the state of environment. *Datchiki i sistemy*. Sensors and systems. 2012, 4: 29–32. [In Russian].
  25. Kiselev M.V., Voropay N.N., Dyukarev E.A., Kurakov S.A., Kurakova P.S., Makeev E.A. Automatic meteorological measuring systems for microclimate monitoring. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018, 190: 012031. doi: 10.1088/1755-1315/190/1/012031.
  26. *Nastavleniye gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam*. Manual for hydrometeorological stations and posts. V. 1. Is. 3. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1985: 300 p. [In Russian].
  27. Kiselev M.V., Voropay N.N. Comparative analysis of the results of measuring the temperature of the soil with the use of the atmospheric soil measuring complex and exhaust thermometers. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Sovremennyye tendentsii i perspektivy razvitiya gidrometeorologii v Rossii»*. Materials of the All-Russian scientific-practical conference «Modern trends and prospects for the development of hydrometeorology in Russia». 2018: 551–554. [In Russian].
  28. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. *Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv*. Methods for studying the physical properties of soil. Moscow: Agropromizdat, 1986: 416 p. [In Russian].
  29. *GOST 28268–89 Pochvy. Metody opredeleniya vlazhnosti, maksimal'noy gigroskopicheskoy vlazhnosti i vlazhnosti ustoychivogo zavyadaniya rasteniy*. GOST 28268–89 Soils. Methods for the determination of moisture, maximum hygroscopic moisture and moisture resistant wilting of plants. Moscow: Standardinform, 2005: 6 p. [In Russian].
  30. *Shein E.V. Kurs fiziki pochv*. Course of soil physics: Moscow: Moscow State University, 2005: 432 p. [In Russian].