

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

УДК 551.345

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-43-51

Тепловое состояние грунтов Енисейской Арктики

П.Н. Скрыбин

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова, Якутск, Россия
vsp@mpi.ysn.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований теплового режима верхних горизонтов криолитозоны в естественных условиях и при освоении региона. Показана структура радиационно-теплового баланса поверхности в различных природных подзонах. Количественно оценено влияние снежного, растительного и напочвенного покровов на формирование теплового режима грунтов слоя годовых теплооборотов. На основе математического моделирования оценено влияние техногенных воздействий на тепловой режим грунтов. Приведены результаты прогноза изменения термического состояния грунтов при освоении территории северной тайги, лесотундры и южной тундры. Предложены основные задачи геотемпературного мониторинга при организации стационаров и полигонов в осваиваемых районах региона.

Ключевые слова: Енисейская Арктика, климат, радиационный баланс, тепловой баланс, криолитозона, температура грунтов, мощность деятельного слоя, прогноз теплового режима.

Благодарности. Работа выполнена в рамках бюджетного проекта ИМЗ СО РАН 1.5.12 «Тепловое поле и криогенная толща Северо-Востока России. Особенности формирования и динамика».

Введение

Енисейская Арктика – один из районов криолитозоны, перспективных для комплексного развития. Но здесь, как и в других регионах криолитозоны, освоение территорий приводит к нарушению растительного и напочвенного слоя, микрорельефа, режима снегоотложения, поверхностного стока и мерзлотных условий. Нарушение теплового режима грунтов сопровождается недопустимыми деформациями сооружений, а иногда и их полным разрушением. На сильнольдистых грунтах начинают развиваться опасные для устойчивости сооружений криогенные процессы – термокараст, солифлюкция, оврагообразование и др. Перечисленные трудности при освоении территорий обусловлены недостаточной изученностью теплового режима грунтов.

Многолетнемерзлые породы Енисейской Арктики распространены от Карского моря до 60° с.ш. Первые сведения о многолетнемерзлых породах были получены при проведении исследований природы высокоширотных регионов. Мерзлотные исследования начали систематически проводиться в советское время в связи с освоением этого региона. Наибольший объем геокриологических исследований выполнен Игар-

ской мерзлотной станцией, основанной в 1930 г. Главсевморпутем и переданной в 1937 г. в систему Академии наук СССР. На участке станции по инициативе М.И. Сумгина в 1936 г. были организованы режимные термические наблюдения. В 1940–1960 гг. геокриологические условия в долине Енисея на участке Игарка–Усть-Порт охарактеризовали сотрудники мерзлотной станции. Многолетние экспериментальные исследования криогенных процессов, физико-механических свойств мерзлых пород проведены А.М. Пчелинцевым [1]. С 1964 г. Игарская НИМС начала изучение геокриологических условий вдоль магистрального газопровода Игарка–Талнах, а также в районах месторождений природного газа. Температура, морфология и распространение многолетнемерзлых пород равнинных территорий Енисейско-Пясинского Севера детально рассматриваются в работах Г.С. Константиновой, А.П. Тыртикова, Н.Ф. Григорьева, Е.Г. Карпова [2–9].

По геокриологическому районированию Енисейского Севера [10] подзона южной тундры отнесена к северной геокриологической зоне, лесотундры – к центральной, а северной тайги – к южной. В пределах региона в направлении с се-

вера на юг встречается сплошное, прерывистое и островное распространение мерзлой толщ. Монолитное залегание мерзлых пород на севере сменяется на слоистое к югу. В направлении с запада на восток увеличивается мощность и понижается температура мерзлых пород.

Инженерно-геокриологические условия осваиваемых районов региона освещены в работах научно-исследовательских и проектных организаций: мерзлотной станции Норильского горно-металлургического комбината, Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, ВНИИГаз Министерства газовой промышленности СССР, Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова и других [11–20].

Несмотря на значительный объем исследований, мерзлотные условия региона изучены весьма неравномерно и не в полной мере. Более детально изучены районы Игарки, Дудинки, Норильска. Мало изучены мерзлотные условия левобережья р. Енисей, южнее трассы газопровода Солёное–Норильск, также между речья Енисея и Пясины.

Изучение закономерностей формирования теплового режима грунтов, его пространственно-временных изменений, развития процессов промерзания-протаивания в естественных условиях и при техногенных воздействиях представляет интерес в научно-теоретическом плане и для практических целей: проектирования, строительства и эксплуатации линейных и площадных сооружений, охраны и рационального использования геологической среды. Это свидетельствует об актуальности исследований теплового режима грунтов в осваиваемых районах криолитозоны и в частности Енисейской Арктики. Термическое состояние грунтов является одной из основных характеристик геокриологических условий, определяющих устойчивость природно-технических систем при изменении климата и антропогенных воздействиях.

Материалы и методы исследований

Геокриологические исследования сотрудников Игарской НИМС позволили оценить особенности формирования термического состояния грунтов в различных природных условиях.

В северной зоне многолетние мерзлые породы имеют сплошное распространение, талики встречаются под глубокими реками и водоемами шириной более 1 км. Мощность мерзлых пород на пойменной террасе составляет от 50–70 до

170–350 м. Температура грунтов на подошве слоя ее годовых колебаний равна $-1 \div -3$ °С. На первой надпойменной террасе температура понижается до $-4 \div -5$ °С, а мощность увеличивается от 100–150 на юге до 180–450 м на севере. На озерно-аллювиальной равнине и на водораздельном плато температура мерзлых грунтов равна $-5 \div -8$ °С, а мощность достигает 200–550 м.

Центральная геокриологическая зона характеризуется почти сплошным распространением многолетнемерзлых пород. Температура пород на глубине нулевых ее амплитуд в пределах поймы изменяется от -1 до -2 °С, надпойменной террасы – от -2 до -4 , водораздельное плато – от -3 до -6 °С. Мощность многолетнемерзлых пород на пойменной террасе равна 40–75, на надпойменной террасе 75–100, на водораздельных пространствах 100–250 м.

В южной геокриологической зоне многолетнемерзлые породы термически малоустойчивы. Под руслами рек, озер, на участках со снежным покровом мощностью 1,5–2 м встречаются сквозные талики. Мощность мерзлых отложений на пойме составляет около 20 м, температура на подошве нулевых амплитуд равна $-0,5 \div -0,6$ °С. Мощность мерзлых толщ на надпойменной террасе превышает 30 м. На подошве слоя годовых колебаний температуры изменяются от $-0,1$ до $-0,5$ °С.

Во всех подзонах повсеместно распространены подземные льды. Полигонально-жильные льды залегают в торфяниках под слоем сезонного протаивания на глубине всего лишь 0,5–0,6 м. Мощность льдов по высоте достигает 4–5 м. В глинистых грунтах развиты сегрегационные льды. На контакте суглинков и отложений с валунными материалами встречаются пластовые льды мощностью до 2 м. В озерно-ледниковых глинах обнаружены уникальные залежи пластовых льдов, мощность которых превышает 20–30 м.

Начиная с 1950-х гг. геокриологи стали организовывать круглогодичные стационарные исследования теплового режима грунтов слоя годовых теплооборотов. Эти работы особенно расширились с 1970-х гг., когда началось планомерное освоение криолитозоны Европейского Севера, Западной и Восточной Сибири, также Дальнего Востока.

Стационарные теплосбалансовые исследования, выполненные впервые в подзонах северной тайги и южной тундры на Енисейской Арктике в 1971–1978 гг., и математическое моде-

лирование охватывают широкий круг вопросов, связанных с изучением теплового режима грунтов в естественных условиях и при освоении территории (рис. 1).

В основу исследований был положен метод теплофизики ландшафтов. Экспериментальные исследования включали микрометеорологические, актинометрические, теплофизические, гидротермические режимные наблюдения и геокриологический прогноз. Стационары были организованы в наиболее типичных мерзлотно-климатических условиях на участках местности, различающихся наземными покровами, составом грунтов и видами техногенного воздействия. В 1971–1974 гг. на Игарском теплобалансовом стационаре в подзоне северной тайги режимные исследования были проведены на пяти площадках: разнотравный луг, березовый лес, оголенный участок, торфяник, с пленочным покрытием. Работы в подзоне южной тундры на Соленинском стационаре в 1974–1976 гг. охватили мохово-лишайниковую и сфагново-ерниковую тундровые участки, осоково-сфагновое болото, площадки с удаленным и нарушенным напочвенным покровами, с пенопластовым и бревенчатым покрытиями. В 1977–1978 гг. в подзоне южной тундры сезонный стационар в районе пос. Геологический включал следующие площадки: мохово-лишайниковая, мохово-ерниковая, тундровые участки, с удаленным напочвенным покровом, с естественным зарастанием, с посевами различных трав [21].

Принятая для условий Заполярья рациональная методика режимных стационарных наблюдений характеризуется достаточной простотой, точностью и надежностью.

Результаты и обсуждения

Тепловой режим грунтов формируется в результате теплообмена с приземным слоем атмосферы. Развитие теплофизических процессов в атмосфере и верхних слоях литосферы обусловлено солнечной радиацией – практически единственным внешним источником энергии на Земле. Основные уравнения радиационного и теплового баланса открытого участка местности обычно представляются в виде

$$Q_c(1 - A) - J_{эф} = R, \quad (1)$$

$$R = P + LE + B, \quad (2)$$

где Q_c – суммарная солнечная радиация; A – отражательная способность (альbedo) поверхности; $J_{эф}$ – эффективное излучение, представля-

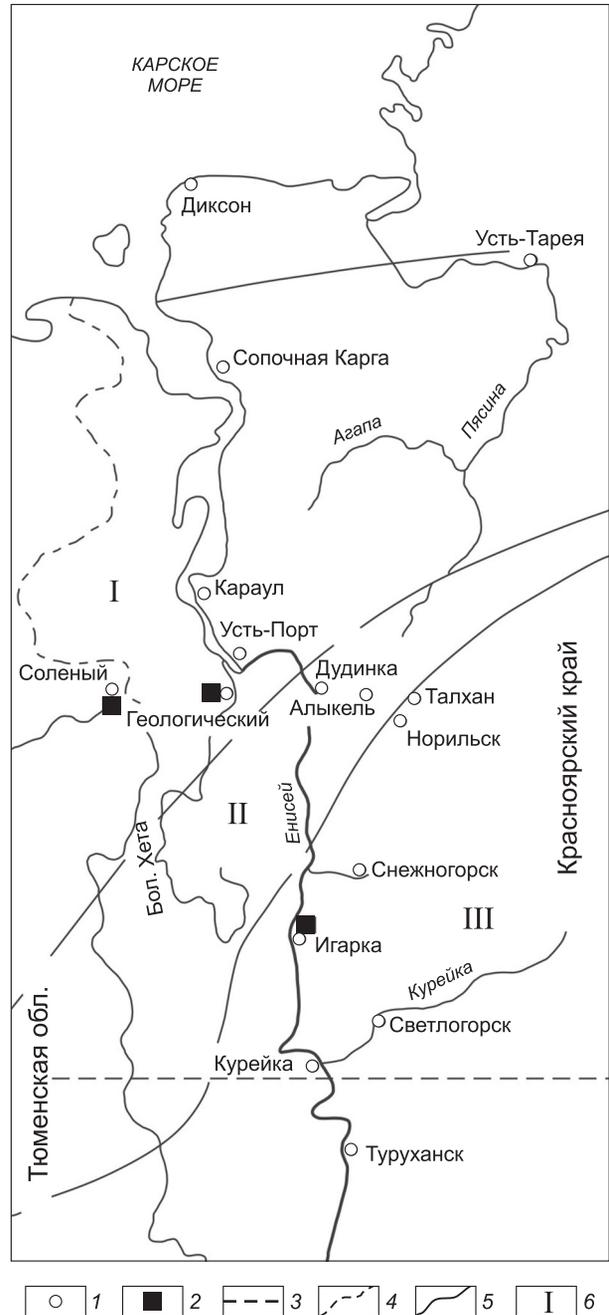


Рис. 1. Обзорная карта районов исследований
1 – метеостанции, 2 – теплобалансовые стационары, 3 – северный полярный круг, 4 – границы административных областей, 5 – границы и 6 – номера природных подзон (I – южно-тундровая, II – лесотундровая, III – северотайга).

Fig. 1. Overview map of research areas.
1 – meteorological stations, 2 – heat balance stations, 3 – the Arctic circle, 4 – boundaries of administrative regions, 5 – boundaries and 6 – numbers of natural subzones (I – Southern tundra, II – Forest Tundra, III – Northern Taiga).

ющее собой разность между излучением поверхности Земли $J_{п}$ и встречным излучением

Составляющие теплового баланса на открытом участке местности

Table 1

Components of energy exchange between soil and atmosphere in an open area

Игарка (1971–1974 гг.)/ Igarka (1971–1974)						Пос. Соленый (1974–1976 гг.)/ Solenyi Village (1974–1976)					
Составляющие/ Constituents						Составляющие/ Constituents					
	МДж/м ² MJ/m ²			%			МДж/м ² MJ/m ²			%	
	Теплый период/ Warm Period	Холодный период/ Cold Period	Год/ Year	Теплый период/ Warm Period	Год/ Year		Теплый период/ Warm Period	Холодный период/ Cold Period	Год/ Year	Теплый период/ Warm Period	Год/ Year
Q	1848	1360	3208	100,0	100,0	Q	1672	1403	3075	100,0	100,0
S	424	885	1309	22,9	40,7	S	381	1230	1611	22,9	52,5
$I_{эф}$	540	324	864	29,4	27,4	$I_{эф}$	406	357	763	24,4	24,7
R	884	151	1035	47,8	32,2	R	885	-184	701	52,7	22,8
P	307	154	461	16,5	14,3	P	37,8	-	-	22,6	-
LE	473	41	514	25,6	16,0	LE	348	-	-	20,8	-
B	104	-96	8	5,7	0,3	B	109	-113	-4	6,5	-0,1

атмосферы J_a ($J_{эф} = J_n - J_a$); R – результирующая лучистого теплообмена (радиационный баланс); P – турбулентный теплообмен; LE – затраты тепла на испарение (E – значение испарения, L – тепло испарения воды); B – поток тепла в грунт.

В подзоне северной тайги экспериментально оценено влияние снежного, травяного, мохового и лесного покровов на теплообмен между грунтом и атмосферой. Под пологом леса в 3 раза снижается радиационный баланс, в 2 раза – затраты тепла на испарение. Охлаждающее влияние лесного покрова на температурный режим грунтов составляет в среднем за год 0,7, а мохового – 2 °С [22].

Изучены основные свойства снежного покрова в северной тайге и южной тундре. Так, в структуре снежного покрова северной тайги отмечена многослойность; наблюдается уменьшение плотности снега в нижних горизонтах за счет диффузионного переноса пара; тонкие ледяные корки толщиной 3–5 см уменьшают поток водяного пара из почвы в снежный покров всего на 14–24 %; испарение снега под пологом березового леса в 1,4 раза меньше открытого участка; тепляющее влияние снега в южной тундре более чем в 3 раза меньше, чем в северной тайге [23].

Особенностью структуры теплового баланса в южной тундре по сравнению с северной тайгой

является снижение затрат тепла на испарение и увеличение теплового потока в грунт (табл. 1). Выявлено влияние напочвенных покровов, заболоченности на теплообмен грунтов с атмосферой. Установлена ведущая роль локальных факторов по сравнению с зональными в закономерностях формирования теплового режима грунтов.

Экспериментальное изучение коэффициента теплопроводности напочвенных покровов, заторфованных грунтов выявило его значительные изменения в течение года и установило их расчетные значения.

Количественные оценки влияния техногенных воздействий выявили, что годовые теплообороты и глубина протаивания могут изменяться в 1,5–2,5 раза, а средняя годовая температура грунтов – на 1–8 °С и более. Исследования теплофизических аспектов биологической рекультивации показали, что посевы злаковых трав способны стабилизировать изменения теплового режима грунтов на нарушенных участках тундры. Осуществлено схематическое картирование радиационного баланса поверхности и предложена упрощенная энергетическая классификация ландшафтных комплексов.

С помощью моделирования составлен прогноз изменения глубины сезонного протаивания и средней годовой температуры грунтов при тех-

Прогноз изменений температуры и глубины сезонного протаивания грунтов

Table 2

Forecast of the change and the depth of seasonal thawing of soils

Тип местности/ Terrain Type	Естественные условия/ Natural Conditions	Уплотнение снега/ Snow Settlement	Удаление снега/ Snow Removal	Удаление растительного покрова/ Vegetation Removal	Удаление снега и растительного покрова/ Snow & Vegetation Removal
	$t_0, ^\circ\text{C}$ $\xi, \text{м}$	$t_0, ^\circ\text{C}$ $\xi, \text{м}$	$t_0, ^\circ\text{C}$ $\xi, \text{м}$	$t_0, ^\circ\text{C}$ $\xi, \text{м}$	$t_0, ^\circ\text{C}$ $\xi, \text{м}$
Южная тундра/Southern Taiga					
Пойменный/ Floodplain	$-0,6 \dots -0,8$ $1,2 \dots 1,3$	$-6,6 \dots -6,9$ $0,8 \dots 1,0$	$-9,7 \dots -10,7$ $0,8 \dots 0,9$	$-0,4 \dots -0,5$ $1,0 \dots 1,6$	$-9,9 \dots -10,6$ $0,9 \dots 1,2$
Водораздельный/ Dividing	$-5,0 \dots -7,3$ $0,4 \dots 0,6$	$-8,1 \dots -10,3$ $0,3 \dots 0,5$	$-9,9 \dots -11,7$ $0,3 \dots 0,5$	$-4,0 \dots -6,5$ $0,6 \dots 1,2$	$-10,0 \dots -11,6$ $0,5 \dots 1,0$
Лесотундра/Forest Tundra					
Пойменный/ Floodplain	$-0,4 \dots -0,6$ $0,7 \dots 1,5$	$-6,3 \dots -6,5$ $0,8 \dots 1,0$	$-8,9 \dots -9,8$ $0,8 \dots 0,9$	$-0,4 \dots -0,5$ $1,1 \dots 1,5$	$-8,8 \dots -9,8$ $0,9 \dots 1,2$
Водораздельный/ Dividing	$-3,8 \dots -5,0$ $0,7 \dots 1,3$	$-8,3 \dots -8,9$ $0,7 \dots 1,2$	$-9,6 \dots -10,8$ $0,7 \dots 1,1$	$-1,9 \dots -4,2$ $1,0 \dots 1,8$	$-9,4 \dots -10,5$ $0,9 \dots 1,4$
Северная тайга/Northern Taiga					
Пойменный/ Floodplain	$-0,1 \dots -0,4$ $1,0 \dots 1,6$	$-6,0 \dots -6,3$ $0,9 \dots 1,1$	$-8,5 \dots -8,6$ $0,9 \dots 1,0$	$-0,1 \dots -0,4$ $1,5 \dots 1,6$	$-8,6 \dots -8,7$ $1,0 \dots 1,3$
Водораздельный/ Dividing	$-0,4 \dots -0,5$ $0,9 \dots 1,5$	$-4,9 \dots -6,9$ $0,9 \dots 1,4$	$-8,8 \dots -9,6$ $0,8 \dots 1,3$	$0,0 \dots -0,7$ $1,0 \dots 2,3$	$-8,2 \dots -8,7$ $1,0 \dots 1,8$

ногенных воздействиях. Изменения теплового режима грунтов за многолетний период и при освоении возрастают с севера на юг (табл. 2).

В 1974–1977 гг. Институт мерзлотоведения СО АН СССР проводил инженерно-геокриологические исследования на Соленинском и Мессояхских газовых месторождениях и на трассе газопровода Мессояха–Норильск. На основе данных натуральных наблюдений была оценена эффективность методов инженерной и биологической рекультивации, рассмотрен комплекс мероприятий и средств, способствующих защите мерзлотных ландшафтов от разрушения. Совместно с институтом ВНИИГаз, ВСЕГИНГЕО и объединением Норильскгазпром были составлены рекомендации и руководство, предназначенные для специалистов по проектированию, строительству и эксплуатации площадных и линейных сооружений в районах Севера [24, 25].

В 2020 г. принята государственная программа «Стратегия развития Российской Арктики до 2035 г.». Программа предусматривает разработку проекта системы «Вечная мерзлота АЗРФ». Целью

проекта является создание государственного мониторинга вечной мерзлоты, для обеспечения экологического пользования криогенных ресурсов и устойчивого развития арктических территорий.

Исследования состояния криолитозоны включают организацию геотемпературного мониторинга – эффективной системы изучения, оценки состояния и прогноза эволюции теплового режима грунтов при изменении климата и антропогенных воздействий.

В первоочередные задачи исследований закономерностей формирования термического состояния грунтов входит: 1) выбор объектов режимных наблюдений на основе ландшафтной дифференциации; 2) организация наблюдательной сети, охватывающей естественные, нарушенные ландшафты и природно-технические системы; 3) совершенствование методики, автоматизации экспериментов и обработки информации; 4) прогноз эволюции термического состояния верхних горизонтов криолитозоны; 5) разработка технологических решений по защите ландшафтов при деградации криолитозоны.

Выводы

1. Систематизированы данные региональных геокриологических исследований об особенностях термического состояния грунтов под влиянием природно-климатических условий в подзонах северной тайги, лесотундры и южной тундры.

2. Экспериментальные данные круглогодичных стационарных теплобалансовых наблюдений послужили основой количественной оценки влияния лесного, снежного и напочвенного покровов на тепловой режим грунтов в естественных и нарушенных условиях.

3. На основе математического моделирования приведен результаты прогноза изменения глубины протаивания и средней годовой температуры грунтов при антропогенных воздействиях.

4. Сформулированы основные задачи организации геотемпературного мониторинга в осваиваемых территориях региона.

Литература

1. Пчелинцев А.М. Строение и физико-механические свойства мерзлых грунтов. М.: Наука, 1964. 260 с.

2. Константинова Г.С. Многолетнемерзлые горные породы Енисейско-Пясинского Севера // Вопросы региональной геокриологии Средней Сибири. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 114–139. (Тр. Игарской НИМС, вып. 2).

3. Тыртиков А.П. Мощность сезонно-талого слоя почвы в районе Игарки // Труды Игарской НИМС. М., 1961. Вып. 2. С. 91–96.

4. Григорьев Н.Ф. О современном промерзании пород в процессе обмеления рек в районах Енисейского Севера // Гидрогеология Енисейского Севера. Л., 1969. С. 106–108.

5. Карнов Е.Г. О температуре мерзлой зоны Таймырской депрессии // Гидрогеология Енисейского Севера. Л., 1969. Вып. 1. С. 75–77.

6. Тыртиков А.П. Развитие растительности как фактор формирования и динамики многолетнемерзлых пород // Проблемы Севера. М.: Изд-во АН СССР, 1963. Вып. 7. С. 227–231.

7. Бакулин Ф.Г., Ермаков В.Ф. Новые данные о температуре многолетнемерзлых пород в Западной Сибири // Геокриологические исследования. Якутск: Кн. изд-во, 1971. С. 83–85.

8. Григорьев Н.Ф. Изменение мерзлотных условий при создании водохранилищ в Заполярье (на примере Хантайского водохранилища) // Вопросы развития и освоения мерзлых толщ. Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1990. С. 85–90.

9. Казанский О.А. Влияние мохово-торфяных покровов на температурный режим грунтов (на примере района нижнего течения р. Курейки) // Термика

почв и горных пород в холодных регионах. Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1982. С. 80–89.

10. Швелева Н.С., Хомичевская Л.С. Геокриологические условия Енисейского Севера. М.: Наука, 1967. 128 с.

11. Чжан Р.В. Участие Института мерзловедения им. П.И. Мельникова СО РАН в научном сопровождении мегапроектов в Восточной Сибири // Проблемы инженерного мерзловедения: материалы IX Международного симпозиума, 3–7 сентября 2011 г., г. Мирный, Россия. Якутск: Издательство Института мерзловедения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2011. С. 14–17.

12. Гончаров Ю.М., Попович А.П. Опыт строительства и эксплуатации производственного здания на пространственном вентилируемом фундаменте в г. Норильске // Проблемы инженерного мерзловедения: материалы IX Международного симпозиума, 3–7 сентября 2011 г., г. Мирный, Россия. Якутск: Издательство Института мерзловедения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2011. С. 516–518.

13. Дроздов Д.Г., Малкова Г.В., Украинцева Н.Г., Коростелев Ю.В. Мониторинг геокриологических условий южнотундровых ландшафтов Европейского Севера и Западной Сибири // Труды Десятой Международной конференции по мерзловедению, г. Салехард, Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО), Россия, 25–29 июня 2012 г. Т. 3. Салехард, 2012. С. 159–164.

14. Круподеров В.С., Дубровин В.А. Проблемные аспекты изучения и освоения Арктической криолитозоны // Труды Десятой Международной конференции по мерзловедению, г. Салехард, Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО), Россия, 25–29 июня 2012 г. Т. 3. Салехард, 2012. С. 275–279.

15. Оберман Н.Г. Многолетний режим температуры криолитозоны европейского Северо-Востока в течение современного потепления климата // Труды Десятой Международной конференции по мерзловедению, г. Салехард, Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО), Россия, 25–29 июня 2012 г. Т. 3. Салехард, 2012. С. 359–364.

16. Рыкова В.В., Шевцова Э.Ю. Особенности возведения инженерных сооружений в криолитозоне: анализ информационного массива из БД «Проблемы Севера» // Труды Десятой Международной конференции по мерзловедению, г. Салехард, Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО), Россия, 25–29 июня 2012 г. Т. 3. С. 519–523.

17. Шполянская Н.А. Особенности плейстоценово-голоценовой истории криолитозоны западного и восточного секторов Российской Арктики и Субарктики // Труды Десятой Международной конференции по мерзловедению, г. Салехард, Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО), Россия, 25–29 июня 2012 г. Т. 3. Салехард, 2012. С. 591–596.

18. Мельников Н.И., Власов В.П. Инженерно-геологическая изученность Северо-Востока России // Материалы XI Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения: Тезисы докладов, г. Магадан (Россия), 5–8 сентября 2017 г. Магадан, 2017 С. 276–277.
19. Serikov S.I. Monitoring of the dynamics of rocks thermal regime in Eastern Siberia / S.I. Serikov [et al.] // Tenth International Conference on Permafrost (TICOP): Resources and Risks of Permafrost Areas in a Changing World (Salekhard, Yamal-Nenets Autonomous District, Russia, June 25–29, 2012). Volume 4 (Extended Abstracts in English). Tyumen, Russia: Pechatnik, 2012. P. 516–517.
20. Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G., Malkova G.V., Kholodov A.L., Marchenko S.S., Moskalenko N.G., Sergeev D.O., Ukraintseva N.G., Abramov A.A., Gilichinsky D.A., Vasiliev A.A. Thermal state of permafrost in Russia // Permafrost and Periglacial Processes. 2010. Vol. 21. P. 136–155.
21. Скрябин П.Н., Сергеев Б.П. Тепловой режим грунтов Енисейского Севера. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1989. 176 с.
22. Скрябин П.Н. Тепловой режим грунтов в районе Игарки // Вопросы геокриологии в трудах молодых ученых и специалистов. Якутск, 1976. С. 87–95.
23. Сергеев Б.П., Скрябин П.Н. Радиационный режим различных видов деятельной поверхности на севере Красноярского края и Тюменской области // Геотеплофизические исследования в Сибири. Новосибирск, 1978. С. 73–85.
24. Рекомендации по выбору и подготовке строительных площадок, инженерной и биологической рекультивации тундровых массивов, нарушенных в результате строительства газопроводов. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1978. 25 с.
25. Временное руководство по защите ландшафтов при прокладке газопроводов на Крайнем Севере. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1980. 44 с.

Поступила в редакцию 16.06.2021
Принята к публикации 20.07.2021

Об авторе

СКРЯБИН Павел Николаевич, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, Россия, ул. Мерзлотная 36, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-8155-378X>, ResearcherID: V-9373-2018, Scopus ID: 6508006475, vsp@mpi.ysn.ru.

Информация для цитирования

Скрябин П.Н. Тепловое состояние грунтов Енисейской Арктики // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26, № 3. С. 43–51. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-43-51>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-26-3-43-51

Thermal state of soils in the Yenisei Arctic

P.N. Skryabin

Melnikov Permafrost Institute, Yakutsk, Russia
vsp@mpi.ysn.ru

Abstract. Results of the experimental studies of the thermal regime in the upper horizons of the cryolithozone under natural conditions and during the development of the region are presented. The structure of radiation-thermal balance over the surface in different natural sub-zones is demonstrated. The effect of snow, vegetation and ground covers on the formation of thermal regime of the soils of annual heat turnover is evaluated quantitatively. The effect of technogenic impact on the thermal regime of soils is estimated on the basis of mathematical modeling. Results of the prediction of changes in the thermal state of soils caused by the development of the northern taiga, forest-tundra and southern tundra territories are described. The major tasks of geothermal monitoring related to the arrangement of observation stations and testing areas in the regions under development are proposed.

Keywords: Yenisei Arctic, climate, radiation balance, thermal balance, cryolithozone, soil temperature, thickness of the active layer, forecast of thermal regime.

Acknowledgements. *The research was carried out within the framework of fundamental prospecting research 1.5.12 (Project No. 4 Thermal field and cryogenic layer in the North-East of Russia. Features of formation and dynamics).*

References

1. *Pchelintsev A.M.* Stroenie i fiziko-mekhanicheskie svoystva merzlykh gruntov. M.: Nauka, 1964. 260 p.
2. *Konstantinova G.S.* Mnogoletnemerzlye gornye porodny Enisejsko-Pyasin'skogo Severa // *Voprosy regional'noi geokriologii Srednei Sibiri*. M.: Izd-vo AN SSSR, 1961. P. 114–139. (Tr. Igarskoi NIMS, vyp. 2).
3. *Tyrtikov A.P.* Moshchnost' sezonno-talogo sloya pochvy v raione Igarki // *Trudy Igarskoi NIMS*. M., 1961. Iss. 2. P. 91–96.
4. *Grigor'ev N.F.* O sovremennom promerzanii porod v protsesse obmelenii rek v raionakh Enisejskogo Severa // *Gidrogeologiya Enisejskogo Severa*. L., 1969. P. 106–108.
5. *Karpov E.G.* O temperature merzloi zony Taimyrskoi depressii // *Gidrogeologiya Enisejskogo Severa*. L., 1969. Iss. 1. P. 75–77.
6. *Tyrtikov A.P.* Razvitiye rastitel'nosti kak faktor formirovaniya i dinamiki mnogoletnemerzlykh porod // *Problemy Severa*. M.: Izd-vo AN SSSR, 1963. Iss. 7. P. 227–231.
7. *Bakulin F.G., Ermakov V.F.* Novye dannye o temperature mnogoletnemerzlykh porod v Zapadnoi Sibiri // *Geokriologicheskie issledovaniya*. Yakutsk: Kn. izd-vo, 1971. P. 83–85.
8. *Grigor'ev N.F.* Izmeneniye merzlotnykh uslovii pri sozdaniii vodokhranilishch v Zapolyar'e (na primere Khantaiskogo vodokhranilishcha) // *Voprosy razvitiya i osvoeniya merzlykh tolshch*. Yakutsk: IMZ SO AN SSSR, 1990. P. 85–90.
9. *Kazanskii O.A.* Vliyanie mokhovo-torfyanikh pokrovov na temperaturnyi rezhim gruntov (na primere raiona nizhnego techeniya r. Kureiki) // *Termika pochv i gornykh porod v kholodnykh regionakh*. Yakutsk: IMZ SO AN SSSR, 1982. P. 80–89.
10. *Sheveleva N.S., Khomichevskaya L.S.* Geokriologicheskie usloviya Enisejskogo Severa. M.: Nauka, 1967. 128 p.
11. *Chzhan R.V.* Uchastie Instituta merzlotovedeniya im. P.I. Mel'nikova SO RAN v nauchnom soprovozhdenii megaproektov v Vostochnoi Sibiri // *Problemy inzhenernogo merzlotovedeniya: materialy IX Mezhdunarodnogo simpoziuma, 3–7 sentyabrya 2011 g.*, g. Mirnyi, Rossiya. Yakutsk: Izdatel'stvo Instituta merzlotovedeniya im. P.I. Mel'nikova SO RAN, 2011. P. 14–17.
12. *Goncharov Yu.M., Popovich A.P.* Opyt stroitel'stva i ekspluatatsii proizvodstvennogo zdaniya na prostranstvennom ventiliruemom fundamente v g. Noril'ske // *Problemy inzhenernogo merzlotovedeniya: materialy IX Mezhdunarodnogo simpoziuma, 3–7 sentyabrya 2011 g.*, g. Mirnyi, Rossiya. Yakutsk: Izdatel'stvo Instituta merzlotovedeniya im. P.I. Mel'nikova SO RAN, 2011. P. 14–17.
13. *Drozdov D.G., Malkova G.V., Ukrainseva N.G., Korostelev Yu.V.* Monitoring geokriologicheskikh uslovii yuzhnootdrovykh landshaftov Evropejskogo Severa i Zapadnoi Sibiri // *Trudy Desyatoi Mezhdunarodnoi konferentsii po merzlotovedeniyu*, g. Salekhard, Yamalo-Nenetskii avtonomnyi okrug (YaNAO), Rossiya, 25–29 iyunya 2012 g. Vol. 3. Salechard, 2012. P. 159–164.
14. *Krupoderov V.S., Dubrovin V.A.* Problemy aspektov izucheniya i osvoeniya Arkticheskoi kriolitozony // *Trudy Desyatoi Mezhdunarodnoi konferentsii po merzlotovedeniyu*, g. Salekhard, Yamalo-Nenetskii avtonomnyi okrug (YaNAO), Rossiya, 25–29 iyunya 2012 g. Vol. 3. Salechard, 2012. P. 275–279.
15. *Oberman N.G.* Mnogoletnii rezhim temperatury kriolitozony evropejskogo Severo-Vostoka v techenie sovremennogo potepeniya klimata // *Trudy Desyatoi Mezhdunarodnoi konferentsii po merzlotovedeniyu*, g. Salekhard, Yamalo-Nenetskii avtonomnyi okrug (YaNAO), Rossiya, 25–29 iyunya 2012 g. Vol. 3. Salechard, 2012. P. 359–364.
16. *Rykova V.V., Shevtsova E.Yu.* Osobennosti vozvedeniya inzhenernykh sooruzhenii v kriolitozone: analiz informatsionnogo massiva iz BD «Problemy Severa» // *Trudy Desyatoi Mezhdunarodnoi konferentsii po merzlotovedeniyu*, g. Salekhard, Yamalo-Nenetskii avtonomnyi okrug (YaNAO), Rossiya, 25–29 iyunya 2012 g. Vol. 3. Salechard, 2012. P. 519–523.
17. *Shpolyanskaya N.A.* Osobennosti pleistotsenovogo sektora Rossijskoi Arktiki i Subarktiki // *Trudy Desyatoi Mezhdunarodnoi konferentsii po merzlotovedeniyu*, g. Salekhard, Yamalo-Nenetskii avtonomnyi okrug (YaNAO), Rossiya, 25–29 iyunya 2012 g. Vol. 3. Salechard, 2012. P. 591–596.
18. *Mel'nikov N.I., Vlasov V.P.* Inzhenerno-geologicheskaya izuchennost' Severo-Vostoka Rossii // *Materialy XI Mezhdunarodnogo simpoziuma po problemam inzhenernogo merzlotovedeniya: Tezisy dokladov*, g. Magadan (Rossiya), 5–8 sentyabrya 2017 g. Magadan, 2017. P. 276–277.
19. *Serikov S.I.* Monitoring of the dynamics of rocks thermal regime in Eastern Siberia / S.I. Serikov [et al.] // *Tenth International Conference on Permafrost (TICOP): Resources and Risks of Permafrost Areas in a Changing World* (Salekhard, Yamalo-Nenets Autonomous District, Russia, June 25–29, 2012). Volume 4 (Extended Ab-

stracts in English). Tyumen, Russia: Pechatnik, 2012. P. 516–517.

20. Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G., Malkova G.V., Kholodov A.L., Marchenko S.S., Moskalenko N.G., Sergeev D.O., Ukraintseva N.G., Abramov A.A., Gilichinsky D.A., Vasiliev A.A. Thermal state of permafrost in Russia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2010. Vol. 21. P. 136–155.

21. Skryabin P.N., Sergeev B.P. Teplovoi rezhim gruntov Eniseiskogo Severa. Yakutsk: In-t merzlotovedeniya SO AN SSSR, 1989. 176 p.

22. Skryabin P.N. Teplovoi rezhim gruntov v raione Igarki // *Voprosy geokriologii v trudakh molodykh uchenykh i spetsialistov*. Yakutsk, 1976. P. 87–95.

23. Sergeev B.P., Skryabin P.N. Radiatsionnyi rezhim razlichnykh vidov deyatel'noi poverkhnosti na severe Krasnoyarskogo kraya i Tyumenskoj oblasti // *Geoteplofizicheskie issledovaniya v Sibiri*. Novosibirsk, 1978. P. 73–85.

24. *Rekomendatsii po vyboru i podgotovke stroitel'nykh ploshchadok, inzhenernoi i biologicheskoi rekul'tivatsii tundrovykh massivov, narushennykh v rezul'tate stroitel'stva gazoprovodov*. Yakutsk: In-t merzlotovedeniya SO AN SSSR, 1978. 25 p.

25. *Vremennoe rukovodstvo po zashchite landshaftov pri prokladke gazoprovodov na Krainem Severa*. Yakutsk: In-t merzlotovedeniya SO AN SSSR, 1980. 44 p.

About the author

SKRYABIN, Pavel Nikolayevich, Cand. Sci. (Geography), senior researcher, Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-8155-378X>, ResearcherID: V-9373-2018, Scopus ID: 6508006475, vsp@mpi.ysn.ru.

Citation

Skryabin P.N. Thermal state of soils in the Yenisei Arctic // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021. Vol. 26, No. 3. pp. 43–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-43-51>