

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 551.58:631.4

DOI: 10.18384/2712-7621-2023-3-6-25

ИЗМЕНЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО И ПОЧВЕННОГО КЛИМАТА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Решоткин О. В.¹, Алябина И. О.², Худяков О. И.³

¹ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения
Российской академии наук, 142290, Московская обл., г. Пущино, ул. Институтская, д. 2,
Российская Федерация; e-mail: reshotkin@rambler.ru

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, Российская Федерация; e-mail: alyabina@yandex.ru

³ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
142290, Московская обл., г. Пущино, ул. Институтская, д. 2, Российская Федерация;
e-mail: oix@rambler.ru

Поступила в редакцию 14.02.2023

После доработки 21.08.2023

Принята к публикации 05.09.2023

Аннотация

Цель. Изучить динамику температур воздуха и почв различных почвенных зон Западной Сибири в связи с современным изменением климата.

Процедура и методы. На основе многолетних данных 259 метеорологических станций, расположенных на территории Западной Сибири, с использованием геоинформационных систем проведён анализ распределения температур воздуха и почвы и их изменения в пределах участков 9 почвенных зон (подзон) за период 1951–2020 гг.

Результаты. В современный период во всех почвенных зонах Западной Сибири наблюдается изменение климата в сторону потепления, которое имеет зональный характер. Наиболее существенный рост температуры воздуха в последнее десятилетие наблюдается на севере Западной Сибири, особенно в подзонах арктической тундры, субарктической тундры и северной тайги, и по мере движения на юг к степной зоне он становится менее заметным. Данное потепление ведёт к изменению температурного режима почв Западной Сибири и, как следствие, смещению почвенно-климатических зон в северном направлении. Созданы картографические модели среднегодовой температуры воздуха для каждого

© СС ВУ Решоткин О. В., Алябина И. О., Худяков О. И., 2023.

десятилетия периода 1951–2020 гг. и климатической нормы 1961–1990 гг., а также картографические модели изменения температуры воздуха (среднегодовой и по сезонам года). **Теоретическая и/или практическая значимость.** Выявленные изменения атмосферного и почвенного климата необходимо учитывать при оценке климатических рисков и разработке агротехнических мероприятий по выращиванию сельскохозяйственных культур, а также мероприятий по защите объектов инфраструктуры в криолитозоне.

Ключевые слова: геоинформационные системы, Западная Сибирь, изменение климата, почвенные зоны, температура воздуха, температура почвы

Благодарности. Работа выполнена по теме государственного задания № 122040500036–9 «Влияние климатических флуктуаций и антропогенной деятельности на эволюцию и современное состояние почв юга России» и теме № 1736–р Аграрного центра МГУ имени М. В. Ломоносова.

CHANGES IN THE ATMOSPHERIC AND SOIL CLIMATE OF WESTERN SIBERIA UNDER CONDITIONS OF GLOBAL WARMING

O. Reshotkin¹, I. Alyabina², O. Khudyakov³

¹ *Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences, ul. Institutskaya 2, Pushchino 142290, Moscow Region, Russian Federation; e-mail: reshotkin@rambler.ru*

² *Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow 119991, Russian Federation; alyabina@yandex.ru*

³ *Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences, ul. Institutskaya 2, Pushchino 142290, Moscow Region, Russian Federation; e-mail: oix@rambler.ru*

Received 14.02.2023

Revised 21.08.2023

Accepted 05.09.2023

Abstract

Aim. The purpose of this work is to study the dynamics of air temperature and soil temperature in different soil zones of Western Siberia in relation to modern climate change.

Methodology. Based on long-term data from 259 weather stations located on the territory of Western Siberia, an analysis of air and soil temperature distribution and their changes within the areas of nine soil zones (subzones) for the period 1951–2020 was carried out using geographic information systems.

Results. It is shown that in the modern period in all soil zones of Western Siberia there is a climate change towards warming, which is characterized by zonality. The most significant increase in air temperature in the last decade is observed in the north of Western Siberia, especially in the arctic tundra, subarctic tundra and northern taiga subzones, and it becomes less noticeable as we move southward to the steppe zone. Modern warming leads to a change in the temperature regime of soils in Western Siberia and, as a result, a shift of soil-climatic zones to the north. Mapping models of the average annual air temperature for each decade of the period

1951–2020 and the climatic norm 1961–1990 were created, as well as mapping models of air temperature change (average annual and by seasons of the year).

Research implications. The revealed changes in the atmospheric and soil climate must be taken into account when assessing climate risks and developing agrotechnical measures for growing crops, as well as measures to protect infrastructure facilities in the cryolithozone.

Keywords: geographic information systems, Western Siberia, climate change, soil zones, air temperature, soil temperature

Acknowledgments. The work was performed within the framework of the state task No. 122040500036–9 “Influence of climatic fluctuations and anthropogenic activities on the evolution and current state of soils in southern Russia” and the theme No. 1736–r of the Lomonosov Moscow State University Agrarian Centre.

Введение

В настоящее время проблема изменения атмосферного и почвенного климата приобрела значительную актуальность, что связано как с масштабом происходящих климатических изменений, так и с их потенциальными последствиями для состояния ландшафтов, сельского и лесного хозяйств, объектов инфраструктуры.

Территория России теплеет существенно быстрее, чем планета Земля в целом. Средняя скорость потепления для поверхности Земли (суши и моря) и суши составила 0,179 и 0,295°C/10 лет соответственно. Скорость роста осреднённой по России среднегодовой температуры воздуха составила 0,51°C/10 лет за период 1976–2020 гг.¹

В разных регионах России потепление происходит неравномерно и отличается по степени воздействия на окружающую среду. Одним из регионов, чувствительных к изменению климата, является Западная Сибирь. Сравнительно однообразный равнинный рельеф обуславливает хорошо выраженную зональность ландшафтов

Западной Сибири, что делает её территорию удобным объектом для изучения зональных особенностей изменения климата.

Специфика дифференциации территории Западно-Сибирской равнины по климатическим условиям рассмотрена в работе И. Е. Трофимовой и А. С. Балыбиной [7]. При анализе изменений климата наряду с температурой воздуха большое значение имеет температура почвы. По мнению ряда авторов, тренды температуры почвы более стабильны и объективны, чем тренды температуры воздуха для оценки эффекта глобального потепления [3]. Исследователи отмечают тенденцию к повышению температуры почвы в различных частях России [13; 14; 17; 18], включая территорию Западной Сибири [9].

С колебаниями климата связана современная тенденция развития криогенных процессов, одного из ведущих факторов формирования ландшафтов в криолитозоне, которая занимает северную часть Западной Сибири. Индикаторами климатических изменений в криолитозоне являются глубина сезонного протаивания и температура верхних горизонтов мёрзлых пород. Эти параметры формируются,

¹ Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научно-технологические технологии, 2022. 124 с.

в первую очередь, под воздействием температуры воздуха, характера растительности и снежного покрова [2].

Данные мониторинга криолитозоны свидетельствуют о хорошо выраженной тенденции деградации мерзлоты на севере России, что вызывает активное развитие растительного покрова и смещение границ биоклиматических зон к северу [1]. Однако реакция глубины сезонного протаивания и температуры мёрзлых пород на потепление не всегда однозначна [4; 6]. В южных районах криолитозоны Западной Сибири с хорошо развитой растительностью, напротив, может отмечаться уменьшение глубины сезонного протаивания и новообразование мерзлоты, что связано с нарастанием при потеплении климата мохового покрова, соответственно и торфа, оказывающих охлаждающее воздействие ввиду усиления теплоизолирующего эффекта [12]. Локальная агградация мерзлоты наблюдается и в других частях южной криолитозоны, что также связано с динамикой растительности [5].

Деградация мерзлоты ведёт к увеличению эмиссии углекислого газа и метана из почвы и водно-болотных угодий, что способствует ещё большему потеплению. Возникают риски для зданий, объектов транспортной и нефтегазовой инфраструктуры, которые строились без учёта современных климатических изменений. По некоторым оценкам, к середине нынешнего столетия из-за глобального потепления может быть повреждено почти 70% существующей арктической инфраструктуры [16].

В южной части Западной Сибири вне области распространения многолетнемёрзлых пород неблагоприят-

ным следствием потепления является повышение засушливости климата, что приводит к возникновению рисков для сельского хозяйства – одной из наиболее чувствительных отраслей экономики к изменениям климата¹.

Настоящая работа посвящена изучению многолетней динамики температуры воздуха и почв различных почвенных зон Западной Сибири в связи с современной тенденцией потепления.

В работе использованы данные наблюдений за температурой воздуха на 259 метеорологических станциях сети Росгидромета, расположенных на территории Западной Сибири за период 1951–2020 гг.². Дополнительно к ним для правильного построения изолиний использованы данные 34 станций, расположенных в 50-километровой зоне вокруг Западной Сибири. По температуре почв проанализированы данные наблюдений на 124 метеорологических станциях за период 1961–2015 гг. На Ямале и Гыданском полуострове станции с длительными рядами наблюдений за температурой почвы отсутствуют, поэтому данная территория не рассматривалась при анализе температуры почвы.

Почвенные зоны (подзоны) показаны в соответствии с картой почвенно-экологического районирования Российской Федерации масштаба

¹ Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. Санкт-Петербург, 2017. 106 с.;

² Метеорологический ежемесячник СССР. М., 1966–1990 гг. Вып. 17, 20. Ч. II.; Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – мировой центр данных [сайт]. URL: www.meteo.ru (дата обращения: 11.02.2023).

1:8 000 000¹. В системе почвенно-экологического районирования на территории Западной Сибири выделено 9 почвенных зон (подзон), для каждой из которых характерен свой зональный почвенный тип (подтип) и сопутствующие ему интразональные почвы (рис. 1).

Для каждой почвенной зоны были рассчитаны средние параметры климатических данных. Период 1961–1990 гг. взят в качестве климатической нормы, относительно которой проанализировано изменение температуры воздуха и почвы, осреднённой за каждое десятилетие. Климатическая норма рассматривается как количественная характеристика условий почвообразования и как критерий изменчивости климата во времени.

Создание исходной геоинформационной базы данных температурных параметров атмосферного и почвенного климатов проходит в несколько этапов. Вначале осуществляется подготовка данных в формате *xlsx* в виде нескольких реляционных таблиц для дальнейшего использования в геоинформационной системе. Для каждого объекта (метеостанции) в таблицы, наряду с данными о температуре воздуха или почвы, заносятся координаты местоположения, по которым затем в ГИС создаются точечные объекты (метеостанции). Далее нужные для создания тех или иных карт данные импортируются в ГИС из реляционных таблиц MS Excel.

Для построения карт и проведения расчётов в нашей работе исполь-

зованы геоинформационные системы Аксиома версия 4.2 и MapInfo Professional v.17.0.4. В ГИС Аксиома версия 4.2 (Модуль «Работа с поверхностями и растрами» v.012) построены изолинии температуры воздуха по статистическим поверхностям, созданным, в свою очередь, на нерегулярной сети точек (293 метеостанции) с рядами данных методом обратных взвешенных расстояний (IDW).

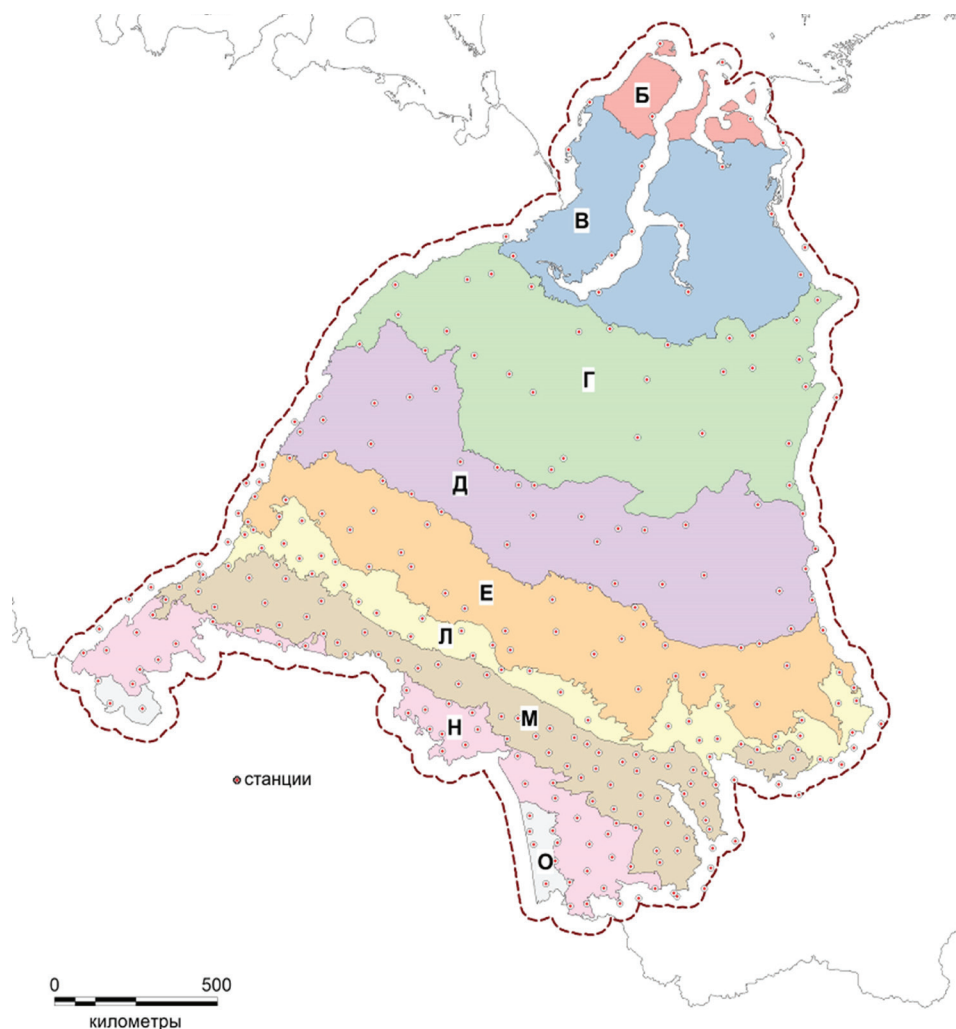
Изменение климата Западной Сибири: динамика температуры воздуха

Средняя годовая температура воздуха в Западной Сибири имеет зональное распределение и увеличивается от $-11,4^{\circ}\text{C}$ в подзоне арктической тундры до $+2,7^{\circ}\text{C}$ в зоне сухой степи (климатическая норма 1961–1990 гг.). Наблюдается увеличение среднегодовой температуры воздуха каждое последующее десятилетие от минимальных значений в 1951–1960 гг. в зоне южной тайги и во всех зонах к югу от неё до максимальных значений в последнее десятилетие. В степной и сухостепной зонах наблюдается одинаковая среднегодовая температура в течение двух последних десятилетий (рис. 2).

В северной части Западной Сибири в подзонах от арктической тундры до средней тайги минимальные значения среднегодовой температуры воздуха наблюдаются в 1961–1980 гг. Потепление здесь началось позднее на 1–2 десятилетия. В 1950-е гг. ещё ощущалось влияние потепления 1930-х – 1940-х гг., известного в климатической литературе как «потепление Арктики» [6].

При общей тенденции потепления различные почвенные зоны и подзоны

¹ Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации. Масштаб 1:8 000 000 / под ред. И. С. Урусовой. М., 2019.



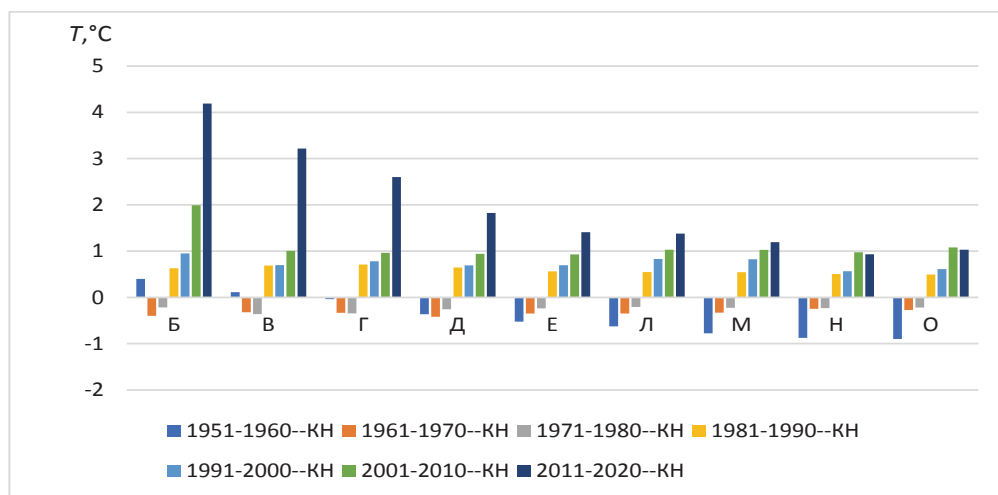
Почвенно-экологическое районирование Западной Сибири:

- Б – подзона арктотундровых почв арктической тундры;
- В – подзона тундровых глеевых почв и подбуров субарктической тундры;
- Г – подзона глееподзолистых почв, глеезёмов и подзолов северной тайги;
- Д – подзона подзолистых почв средней тайги;
- Е – зона дерново-подзолистых почв южной тайги;
- Л – зона серых лесных почв лиственных лесов;
- М – зона оподзоленных, выщелоченных и типичных чернозёмов и серых лесных почв лесостепи;
- Н – зона обыкновенных и южных чернозёмов степи;
- О – зона тёмно-каштановых и каштановых почв сухой степи.

Рис. 1 / Fig. 1. Территория исследования / Study area

Источник: составлено авторами на основе Карты почвенно-экологического районирования Российской Федерации¹

¹ Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации. Масштаб 1:8 000 000 / под ред. И. С. Урусевской. М., 2019.



Буквенные индексы обозначают почвенные зоны и подзоны, выделенные на рис. 1

Рис. 2 / Fig. 2. Изменение среднегодовой температуры воздуха относительно климатической нормы (КН), °C / Change in the average annual air temperature relative to the climatic norm (CN), °C

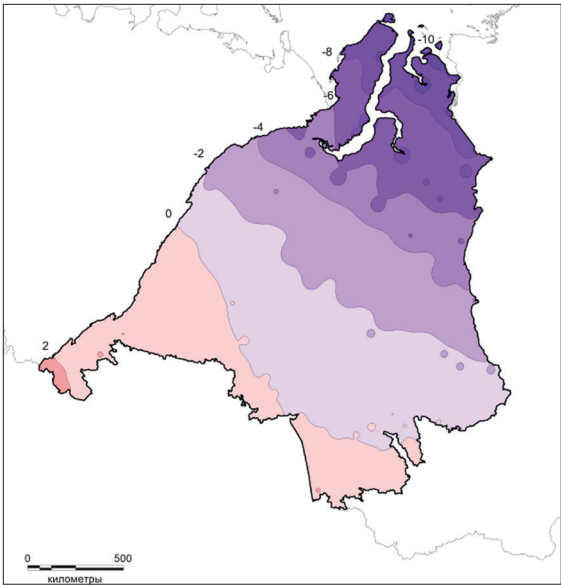
Источник: составлено авторами

Западной Сибири по-разному реагируют на изменения климата. Наиболее существенный рост температуры воздуха в последнее десятилетие наблюдается на севере Западной Сибири, особенно в подзонах арктической тундры, субарктической тундры и северной тайги, и по мере движения на юг к степной зоне он становится менее заметным. В 2011–2020 гг. среднегодовая температура воздуха превысила климатическую норму от 0,9 и 1,1°C в степной и сухостепной зонах до 3,2 и 4,2°C в подзонах арктической тундры и субарктической тундры соответственно.

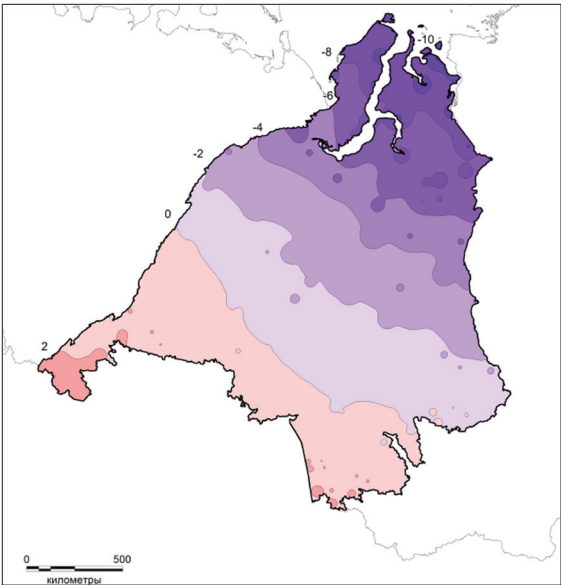
На созданных нами картографических моделях среднегодовой температуры воздуха видно смещение изотерм в северном направлении в каждое последующее десятилетие после 1951–1960 гг., которые были самыми холодными в исследуемый период. Особенно хорошо это заметно по движению изотерм 0 и +2°C (рис. 3).

Наблюдается уменьшение площади с отрицательными среднегодовыми температурами воздуха. При этом период 1961–1970 гг. был относительно стабильным.

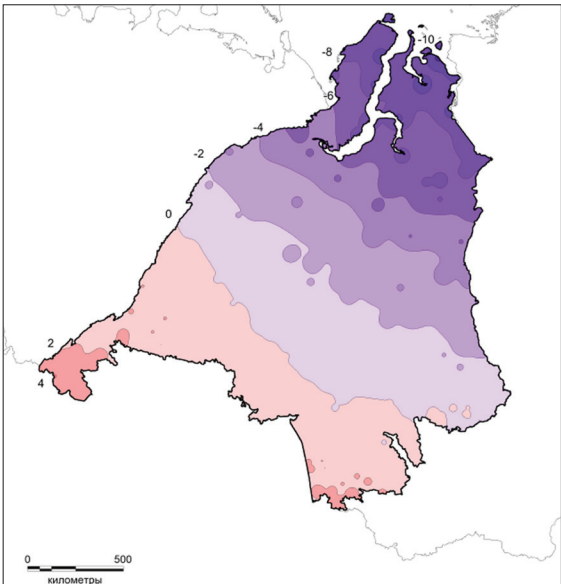
Период 2011–2020 гг. стал самым тёплым за всю историю инструментальных наблюдений. Нулевая изотерма в этот период сместилась к северу относительно климатической нормы 1961–1990 гг. на 250–400 км. Площадь с отрицательной среднегодовой температурой воздуха, составлявшая в пределах территории Западной Сибири в 1961–1990 гг. 1 914 тыс. км², уменьшилась в 2011–2020 гг. на 660 тыс. км² или на 34%. Площадь с температурой ниже –2°C уменьшилась примерно на 44% с 1 152 тыс. до 651 тыс. км². Таким образом, в современный период наблюдаются условия для таяния многолетней мерзлоты и сокращения её площади – в первую очередь, островной и прерывистой мерзлоты.



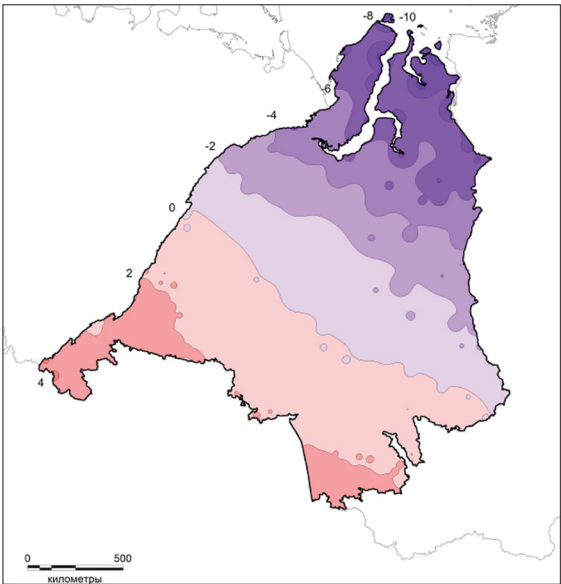
1951–1960



1961–1970



1971–1980



1981–1990

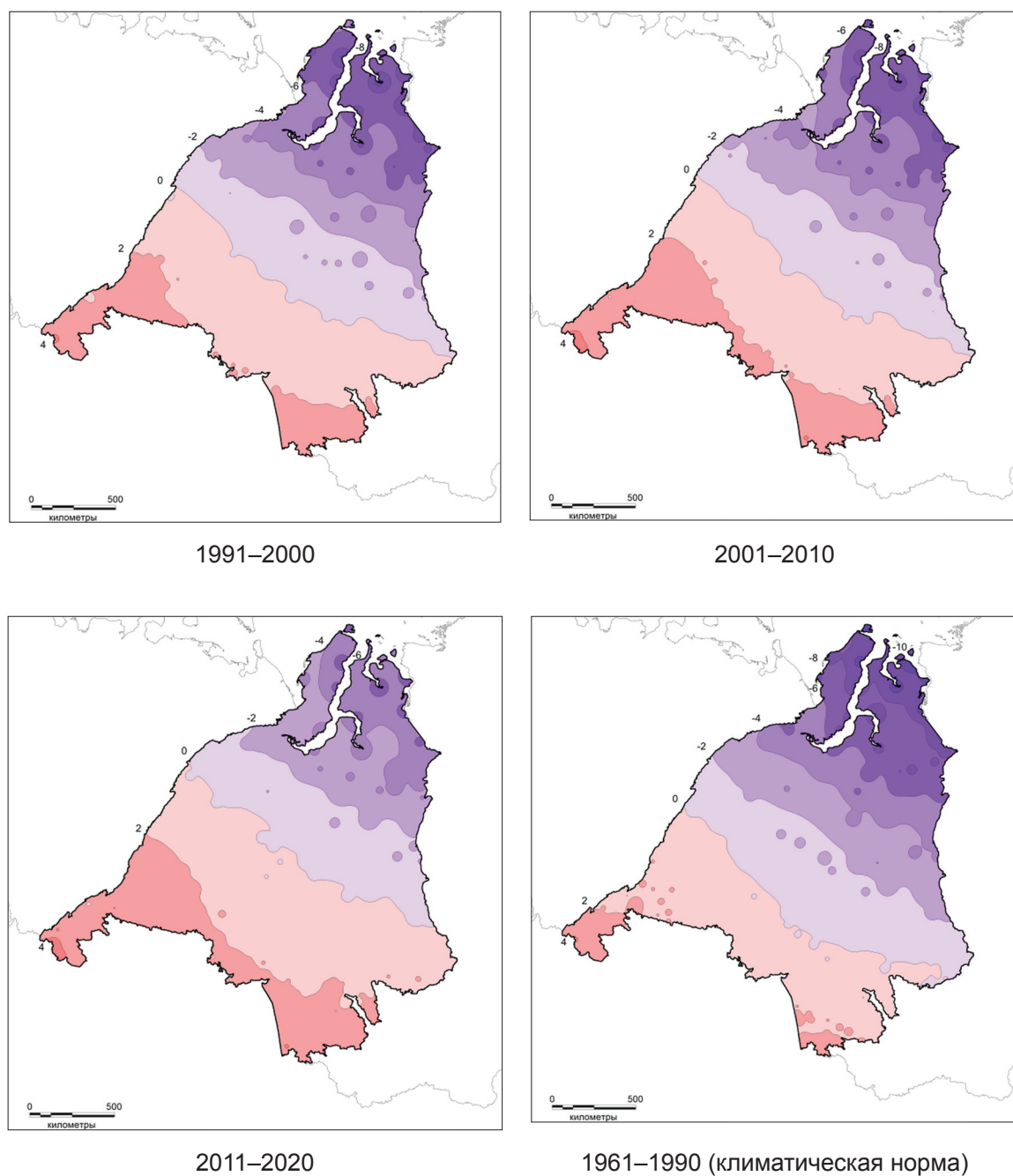


Рис. 3 / Fig. 3. Средняя годовая температура воздуха, °C / Average annual air temperature, °C

Источник: составлено авторами

В южной части Западной Сибири хорошо заметно смещение на север изотермы $+2^{\circ}\text{C}$. Площадь со средней годовой температурой выше $+2^{\circ}\text{C}$, составлявшая в пределах рассматриваемой территории в 1961–1990 гг. 114 тыс. км², увеличилась на 453 тыс. км². Потепление в подтаёжной зоне, лесостепи и степи, являющихся важными сельскохозяйственными регионами России, имеет как благоприятные, так и неблагоприятные последствия. С одной стороны, оно выгодно для сельского хозяйства, т. к. наблюдается увеличение теплообеспеченности сельскохозяйственных культур и увеличение продолжительности вегетационного периода. С другой стороны, при недостатке влаги увеличивается вероятность образования атмосферных и почвенных засух. Повышение температуры и неравномерное распределение осадков в течение года (их дефицит в отдельные периоды) могут способствовать возникновению лесных пожаров, частота которых в последнее время увеличилась.

Увеличение температуры воздуха наблюдается во все сезоны года, но особенно оно выражено в весенний и зимний периоды (рис. 4). В весенний сезон в подзонах арктической и субарктической тундры и северной тайги температура воздуха в 2011–2020 гг. увеличилась относительно климатической нормы на $4\text{--}4,9^{\circ}\text{C}$, а в остальных зонах (подзонах) – на $1,9\text{--}2,8^{\circ}\text{C}$. Зимний сезон отличается наибольшей дифференциацией и особенно выраженной зональностью потепления. Если в подзонах субарктической тундры и северной тайги температура увеличилась на $3,1\text{--}3,4^{\circ}\text{C}$, а в подзоне арктической тундры – на целых $6,0^{\circ}\text{C}$,

то в степной и сухостепной зонах – всего на $0,5\text{--}0,6^{\circ}\text{C}$. В летний и осенний сезоны потепление менее выражено. К югу от среднетаёжной подзоны температура увеличилась на $0,5\text{--}0,9^{\circ}\text{C}$. Более значительный рост осенних и летних температур воздуха отмечается в подзонах арктической и субарктической тундры. Температура здесь выросла на $2,1\text{--}3,7^{\circ}\text{C}$.

Динамика температуры почв

Характер изменения среднегодовой температуры почв в целом соответствует изменению температуры воздуха, но осложняется высотой снежного покрова в зимний период, гранулометрическим составом, влажностью почв, уровнем грунтовых вод, наличием мерзлоты и другими факторами.

Среднегодовая температура почвы на глубине 20 см в 2001–2015 гг. увеличилась относительно климатической нормы на $0,6\text{--}1,1^{\circ}\text{C}$. Наибольшее повышение температуры почвы в отличие от температуры воздуха наблюдается в почвах лесостепной и степной зон, что связано с меньшей влажностью этих почв и более слабым влиянием снежного покрова. Аналогично температуре воздуха увеличение температуры почвы наблюдается во все сезоны года и во всех почвенных зонах и подзонах (рис. 5).

Сумма температур почвы ниже 0°C на глубине 20 см уменьшилась на $111\text{--}224^{\circ}\text{C}$, а сумма температур почвы выше 10°C увеличилась на $66\text{--}235^{\circ}\text{C}$ (рис. 6). В зимний сезон наименьшие суммы температур почвы ниже 0°C и самая высокая зимняя температура почвы наблюдаются в зоне южной тайги. К северу и югу от неё температура почвы зимой уменьшается.

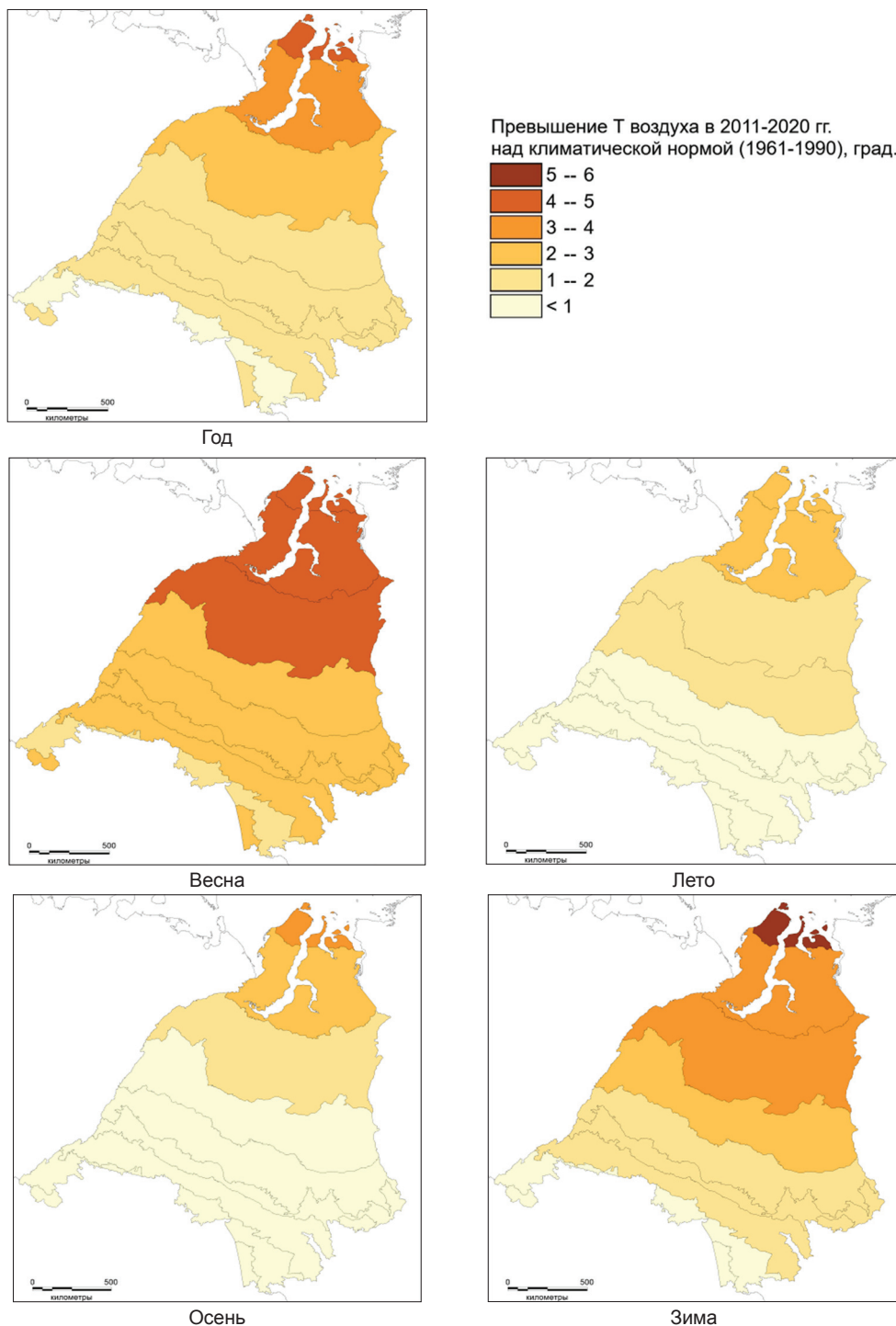


Рис. 4 / Fig. 4. Сезонная динамика увеличения температуры воздуха, °C / Seasonal dynamics of air temperature increase, °C

Источник: составлено авторами

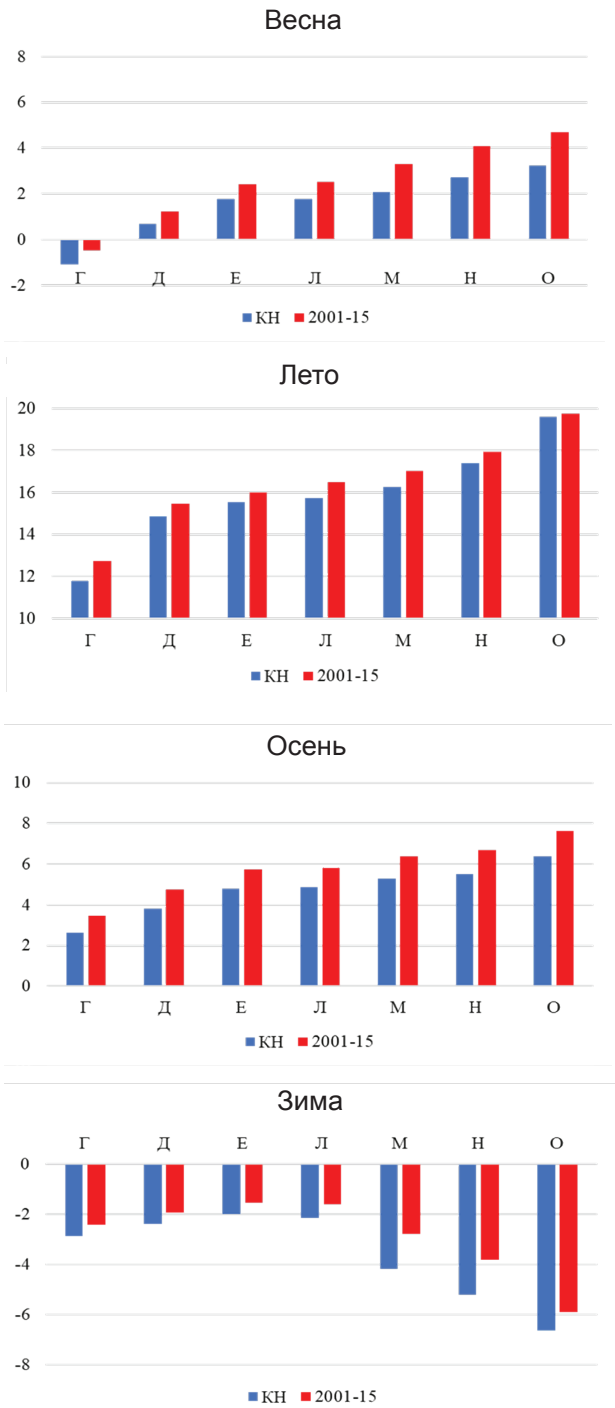


Рис. 5 / Fig. 5. Изменение температуры почвы на глубине 20 см в различные сезоны года, °C / Change in soil temperature at a depth of 20 cm in different seasons of the year, °C

Источник: составлено авторами

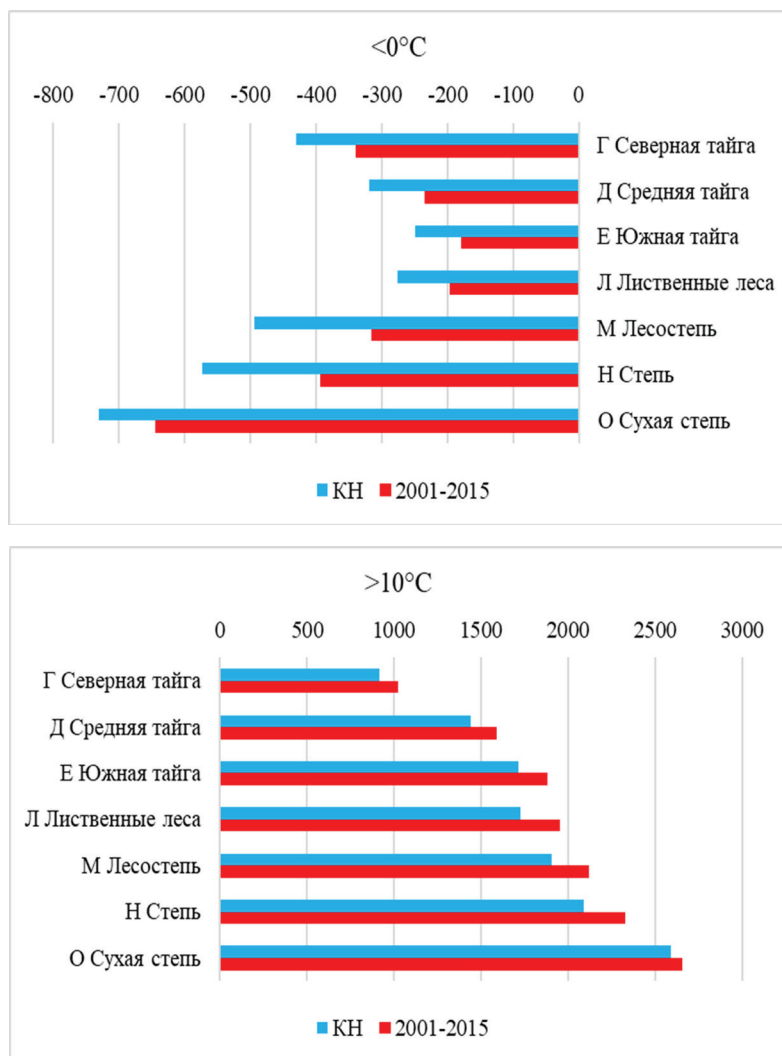


Рис. 6 / Fig. 6. Сумма температур почвы ниже 0 и выше 10°C на глубине 20 см, °C / The sum of soil temperatures below 0 and above 10°C at a depth of 20 cm, °C

Источник: составлено авторами

Такое распределение зимних температур почв связано с особенностями пространственной дифференциации снежного покрова на территории Западной Сибири. Наибольшая высота снежного покрова наблюдается в центральной части Западно-Сибирской равнины, где выпадает больше осадков зимой, что обусловлено особенностями

ми атмосферной циркуляции. К северу и югу его высота заметно уменьшается. Снежный покров обладает теплоизолирующим эффектом и сдерживает в холодный период года выхолаживание почв и накопление в них холода. Ранее нами показано, что промерзание почв и их нахождение в мёрзлом состоянии происходит при температуре,

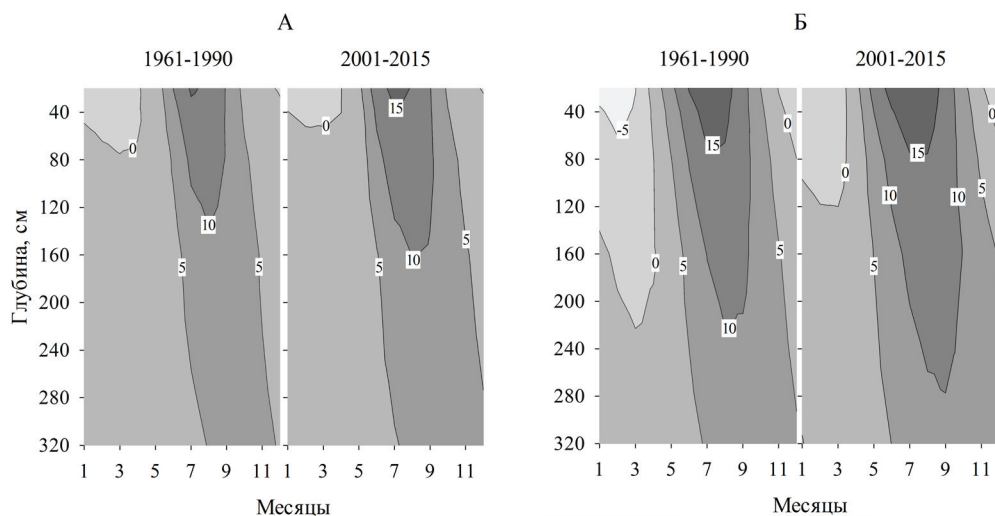
установившейся на контакте снег–почва, которая существенно выше температуры воздуха и поверхности снега [10]. По данным А. Б. Шерстюкова [11], в Сибири, в отличие от Восточно-Европейской равнины, изменения среднегодовой температуры почвы определяются в большей степени изменениями высоты снежного покрова, а не изменениями температуры воздуха. И другие исследователи отмечают решающую роль высоты и продолжительность залегания снежного покрова в формировании почвенного климата в Западной Сибири в холодный период года [8; 15].

Во всех почвенных зонах наблюдается уменьшение глубины проникновения температуры 0°C в почву и увеличение глубины проникновения активных температур выше 10°C в почву, что является характерным при-

знаком потепления почв в холодный и тёплый периоды года.

На рис. 7 на примере двух зональных почв таёжной и степной зон – подзолистой почвы и чернозёма южного – показано изменение среднемесячной температуры почв в 2001–2015 гг. относительно климатической нормы. Почвы отличаются по температурному режиму. В холодный период года подзолистая почва заметно теплее, а в тёплый период, наоборот, заметно холоднее, чем чернозём южный.

Глубина проникновения температуры 0°C в почву в 2001–2015 гг. уменьшилась до 52 см в подзолистой почве и до 120 см – в чернозёме южном, что меньше климатической нормы на 23 и 103 см соответственно. Глубина проникновения температур выше 10°C в почву, наоборот, увеличилась до 165 см в подзолистой почве и до 278 см



А – подзолистая почва подзоны средней тайги (Александровское, Томская область),
Б – чернозём южный зоны степи (Полтавка, Омская область)

Рис. 7 / Fig. 7. Среднемесячная динамика температуры зональных почв, $^{\circ}\text{C}$. / Monthly average temperature dynamics of zonal soils, $^{\circ}\text{C}$

Источник: составлено авторами

в чернозёме южном, что выше климатической нормы на 29 и 55 см соответственно.

Таким образом, в современный период наблюдается потепление обеих почв по всему их профилю вплоть до глубины 320 см.

Почвенный криогенез как природный фактор риска трубопроводов в криолитозоне при современном потеплении

С потеплением связаны различные климатические риски, обусловленные развитием криогенных процессов. В Западной Сибири имеется развитый нефтегазовый комплекс с сетью трубопроводов. Коррозия металла труб в почве является основной причиной быстрого износа трубопроводных транспортных систем. Интенсивность развития коррозионного процесса в значительной степени определяется

температурными условиями почвы. Современное потепление ведёт к интенсификации процессов почвенного криогенеза, что будет способствовать более интенсивному износу нефтяных и газовых труб (рис. 8).

В условиях бугристо-западинного рельефа его составляющие (бугры и западины) связаны между собой единым энергомассообменом. В холодный период года, в период промерзания, под действием возрастающего градиента температур в промерзающем слое происходит накопление льда в теле бугра, что приводит к его росту, оказывая давление на трубу, вследствие чего это давление сопровождается её коррозионным растрескиванием под напряжением (КРН). В тёплый период года в результате современного потепления увеличивается глубина сезонного протаивания верхних горизонтов мерзлотных почв, что приводит к вы-

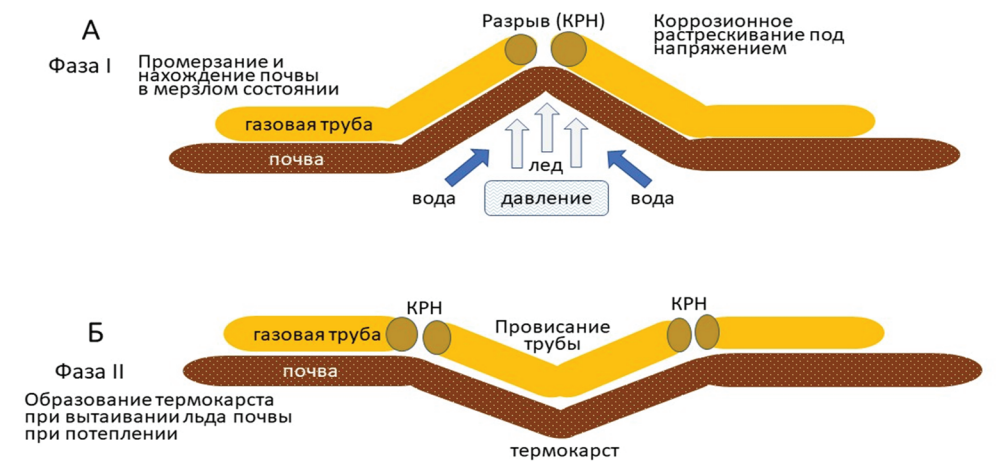


Рис. 8 / Fig. 8. Коррозионные риски: (А) при промерзании и нахождении почвы в мёрзлом состоянии, (Б) при вытаивании льда и формировании термокарста при потеплении / Corrosion risks: (A) when freezing and the soil is in a frozen state, (B) when ice melts and thermokarst forms during warming

Источник: составлено авторами

таиванию жильных льдов и формированию термокарста с накоплением воды, оказывающей растепляющий эффект. Под весом трубы возникают дополнительные напряжения при изгибе, что способствует возникновению трещин в этих частях нефтяной или газовой трубы.

Заключение

Созданная геореференсированная база данных наблюдений за температурой воздуха на протяжении 70 лет и температурой почвы за 55 лет позволила на примере территории Западной Сибири проследить многолетнюю динамику этих параметров в связи с современной тенденцией потепления. Построенные модели и проведённые расчёты послужили основанием для выводов, связанных с потенциальными последствиями выявленных процессов для состояния ландшафтов, сельского и лесного хозяйств, объектов инфраструктуры:

1. в современный период во всех почвенных зонах Западной Сибири отмечается изменение почвенного климата в сторону его потепления в связи с ростом среднегодовых температур воздуха. Потепление наблюдается во все сезоны года, особенно в весенний и зимний сезоны и отличается выраженной зональностью;

2. установлено смещение изотермы среднегодовой температуры воздуха 0°C на 250–400 км в северном направлении, что обуславливает уменьшение площади с отрицательной среднегодовой температурой воздуха на 34%;

3. во всех почвенных зонах наблюдается потепление почв по всему их профилю. Потепление отмечается как в тёплый, так и в холодный периоды года и характеризуется увеличением среднегодовой температуры почв, увеличением суммы активных температур в почвах, уменьшением суммы отрицательных температур, глубины сезонного промерзания и длительности нахождения почв в мёрзлом состоянии;

4. современное потепление находит своё отражение в ландшафтах Западной Сибири и характеризующих их почвах. Можно ожидать продвижения лесных сообществ к северу и соответствующего изменения спектра почвообразовательных процессов – проявления кислотного гидролиза минералов, лессиважа, элювиально-глеевого процессов. В таёжной зоне потепление приведёт к увеличению продуктивности древостоев [19]. Почвообразование будет сопровождаться усилением гумусово-аккумулятивного процесса. В почвах степной и сухостепной зоны можно ожидать усиления аридизации и связанных с ней процессов окарбонирования, засоления, и осолонцевания чернозёмов и каштановых почв, формирования почвенных засух;

5. увеличение глубины протаивания мерзлотных почв при потеплении климата в условиях бугристо-западинного рельефа приводит к снижению коррозионной стойкости газо- и нефтепроводов. Необходима разработка и применение технологии защиты трубопроводов от негативного влияния криогенных процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в Западном секторе Российской Арктики / А. А. Васильев, А. Г. Гравис, А. А. Губарьков, Д. С. Дроздов, Ю. В. Коростелёв, Г. В. Малкова, Г. Е. Облогов и др. // Криосфера Земли. 2020. Т. XXIV. № 2. С. 15–30.
2. Израэль Ю. А., Павлов А. В., Анохин Ю. А. Эволюция криолитозоны при современных изменениях глобального климата // Метеорология и гидрология. 2002. № 1. С. 22–34.
3. Использование данных метеорологических станций для оценки тенденций многолетних изменений температуры почв на территории сезонной и многолетней криолитозоны России / Д. А. Гиличинский, С. С. Быховец, В. А. Сорокинов, Д. Г. Фёдоров-Давыдов, Р. Г. Барри, Т. Жанг, М. К. Гаврилова и др. // Криосфера Земли. 2000. Т. IV. № 3. С. 59–66.
4. Конищев В. Н. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2009. № 4. С. 10–20.
5. Медведков А. А. Как глобальное потепление меняет природу сибирской тайги? // Природа. 2016. № 12 (1216). С. 40–47.
6. Павлов А. В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск: ГЕО, 2008. 230 с.
7. Трофимова И. Е., Балыбина А. С. Классификация климатов и климатическое районирование Западно-Сибирской равнины // География и природные ресурсы. 2014. № 2. С. 11–21.
8. Трофимова И. Е., Балыбина А. С. Районирование Западно-Сибирской равнины по термическому режиму почв // География и природные ресурсы. 2015. № 3. С. 27–38.
9. Харюткина Е. В., Логинов С. В. Тенденции временных изменений температуры почвы на глубинах в Западной Сибири по данным реанализа // География и природные ресурсы. 2019. № 2. С. 95–102.
10. Худяков О. И., Решоткин О. В. Динамика температуры мерзлотных почв в вегетационный период на фоне повышения среднегодовой температуры воздуха // Почвоведение. 2020. № 5. С. 576–589.
11. Шерстюков А. Б. Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова на территории России // Криосфера Земли. 2008. Т. XII. № 1. С. 79–87.
12. Шполянская Н. А., Осадчая Г. Г., Малкова Г. В. Современное изменение климата и реакция криолитозоны (на примере Западной Сибири и Европейского Севера России) // Географическая среда и живые системы. 2022. № 1. С. 6–30.
13. Chen L., Aalto J., Luoto M. Decadal changes in soil and atmosphere temperature differences linked with environment shifts over northern Eurasia // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2021. Vol. 126. P. e2020JF005865.
14. Chen L., Aalto J., Luoto M. Significant shallow-depth soil warming over Russia during the past 40 years // Global and Planetary Change. 2021. Vol. 197. P. 103394.
15. Goncharova O. Yu., Matyshak G. V., Epstein H. E., et al. Influence of snow cover on soil temperatures: Meso- and micro-scale topographic effects (a case study from the northern West Siberia discontinuous permafrost zone) // Catena. 2019. Vol. 183. P. 104224.
16. Hjort J., Karjalainen O., Aalto J., et al. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century // Nature Communications. 2018. Vol. 9. No. 1. P. 5147.
17. Reshotkin O. V., Khudyakov O. I. Soil temperature response to modern climate change at four sites of different latitude in the European part of Russia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 368. P. 012040.

18. Streletskiy D. A., Sherstiukov A. B., Frauenfeld O. W., et al. Changes in the 1963–2013 shallow ground thermal regime in Russian permafrost regions // *Environmental Research Letters*. 2015. Vol. 10. № 12. P. 125005.
19. Tchebakova N. M., Parfenova E. I., Korets M. A., et al. Potential change in forest types and stand heights in central Siberia in a warming climate // *Environmental Research Letters*. 2016. Vol. 11. № 3. P. 035016.

REFERENCES

1. Vasiliev A. A., Gravis A. G., Gubarkov A. A., Drozdov D. S., Korostelev Yu. V., Malkova G. V., Oblogov G. E., et al. [Permafrost degradation: results of long-term geocryological monitoring in the Western sector of the Russian Arctic]. In: *Kriosfera Zemli* [Cryosphere of the Earth], 2020, vol. XXIV, no. 2, pp. 15–30.
2. Israel Yu. A., Pavlov A. V., Anokhin Yu. A. [Evolution of the permafrost zone under modern changes in the global climate]. In: *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology], 2002, no. 1, pp. 22–34.
3. Gilichinsky D. A., Bykhovets S. S., Sorokovikov V. A., Fedorov-Davydov D. G., Barry R. G., Zhang T., Gavriloza M. K., et al. [Using data from meteorological stations to assess trends in long-term changes in soil temperature in the territory of the seasonal and long-term permafrost zone of Russia]. In: *Kriosfera Zemli* [Cryosphere of the Earth], 2000, vol. IV, no. 3, pp. 59–66.
4. Konishchev V. N. [Reaction of permafrost to climate warming]. In: *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya* [Bulletin of Moscow University. Episode 5: Geography], 2009, no. 4, pp. 10–20.
5. Medvedkov A. A. [How is global warming changing the nature of the Siberian taiga?]. In: *Priroda* [The Nature], 2016, no. 12, pp. 40–47.
6. Pavlov A. V. *Monitoring kriolitozony* [Monitoring of the cryolithozone]. Novosibirsk, GEO Publ., 2008. 230 p.
7. Trofimova I. E., Balybina A. S. [Classification of climates and climatic zoning of the West Siberian Plain]. In: *Geografiya i prirodnyye resursy* [Geography and natural resources], 2014, no. 2, pp. 11–21.
8. Trofimova I. E., Balybina A. S. [Zoning of the West Siberian Plain according to the thermal regime of soils]. In: *Geografiya i prirodnyye resursy* [Geography and natural resources], 2015, no. 3, pp. 27–38.
9. Kharyutkina E. V., Loginov S. V. [Trends in temporary changes in soil temperature at depths in Western Siberia according to reanalysis data]. In: *Geografiya i prirodnyye resursy* [Geography and natural resources], 2019, no. 2, pp. 95–102.
10. Khudyakov O. I., Reshotkin O. V. [Dynamics of the temperature of frozen soils during the growing season against the background of an increase in the average annual air temperature]. In: *Pochvovedeniye* [Soil Science], 2020, no. 5, pp. 576–589.
11. Sherstyukov A. B. [Correlation of soil temperature with air temperature and snow depth on the territory of Russia]. In: *Kriosfera Zemli* [Cryosphere of the Earth], 2008, vol. XII, no. 1, pp. 79–87.
12. Shpolyanskaya N. A., Osadchaya G. G., Malkova G. V. [Modern climate change and the reaction of the permafrost zone (on the example of Western Siberia and the European North of Russia)]. In: *Geograficheskaya sreda i zhivyye sistemy* [Geographical environment and living systems], 2022, no. 1, pp. 6–30.
13. Chen L., Aalto J., Luoto M. Decadal changes in soil and atmosphere temperature differences linked with environment shifts over northern Eurasia. In: *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2021, vol. 126, pp. e2020JF005865.

14. Chen L., Aalto J., Luoto M. Significant shallow–depth soil warming over Russia during the past 40 years. In: *Global and Planetary Change*, 2021, vol. 197, pp. 103394.
15. Goncharova O. Yu., Matyshak G. V., Epstein H. E., et al. Influence of snow cover on soil temperatures: Meso- and micro-scale topographic effects (a case study from the northern West Siberia discontinuous permafrost zone). In: *Catena*, 2019, vol. 183, pp. 104224.
16. Hjort J., Karjalainen O., Aalto J., et al. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century. In: *Nature Communications*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 5147.
17. Reshotkin O. V., Khudyakov O. I. Soil temperature response to modern climate change at four sites of different latitude in the European part of Russia. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 368, pp. 012040.
18. Streletskiy D. A., Sherstiukov A. B., Frauenfeld O. W., et al. Changes in the 1963–2013 shallow ground thermal regime in Russian permafrost regions. In: *Environmental Research Letters*, 2015, vol. 10, no. 12, pp. 125005.
19. Tchebakova N. M., Parfenova E. I., Korets M. A., et al. Potential change in forest types and stand heights in central Siberia in a warming climate. In: *Environmental Research Letters*, 2016, vol. 11, no. 3, p. 035016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Решоткин Олег Владимирович – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории экологии и генезиса почв Института физико-химических и биологических проблем почвоведения, Пушчинский научный центр биологических исследований РАН; e-mail: reshotkin@rambler.ru

Алябина Ирина Олеговна – доктор биологических наук, профессор кафедры географии почв факультета почвоведения, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова; e-mail: alyabina@yandex.ru

Худяков Олег Иванович – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии и генезиса почв Института физико-химических и биологических проблем почвоведения, Пушчинский научный центр биологических исследований РАН; e-mail: oix@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oleg V. Reshotkin – PhD (Biology), Researcher, Laboratory of Soil Ecology and Genesis, Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences; e-mail: reshotkin@rambler.ru

Irina O. Alyabina – Dr. Sci. (Biology), Prof., Department of Soil Geography, Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University; e-mail: alyabina@yandex.ru

Oleg I. Khudyakov – Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, Laboratory of Soil Ecology and Genesis, Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences; e-mail: oix@rambler.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Решоткин О. В., Алябина И. О., Худяков О. И. Изменение атмосферного и почвенного климата Западной Сибири в условиях глобального потепления // Географическая среда и живые системы. 2023. № 3. С. 6–25.

DOI: 10.18384/2712-7621-2023-3-6-25

FOR CITATION

Reshotkin O. V., Alyabina I. O., Khudyakov O. I. Changes in the atmospheric and soil climate of Western Siberia under conditions of global warming. In: *Geographical Environment and Living Systems*, 2023, no. 3, pp. 6–25.

DOI: 10.18384/2712-7621-2023-3-6-25