

КРИОПЕДОЛОГИЯ

УДК 581.524.3 (551.525.5)

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-5(58-66)

**ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ПОЧВ ПОСТАГРОГЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ
ПРИ АКТИВИЗАЦИИ САМОВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ СУКЦЕССИИ
ТУНДРОВОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ (ЕВРОПЕЙСКИЙ СЕВЕРО-ВОСТОК РОССИИ)****Д.А. Каверин, А.В. Пастухов, А.Н. Панюков***Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,
167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28, Россия; dkav@mail.ru*

Исследованы особенности температурного режима почв и изменений глубины залегания кровли многолетнемерзлых пород в постагрогенных луговых экосистемах криолитозоны европейского Северо-Востока России, развивающихся в условиях активизации самовосстановительной сукцессии тундровой растительности (2009–2016 гг.). Проведено сравнение исследуемых показателей с показателями сельскохозяйственного периода функционирования луговых (агрогенных) экосистем (1996–1999 гг.). Современное повышение температуры суглинистых агроглееземов и глееземов, сформировавшихся в условиях относительно близкого (до 2 м) и глубокого (более 2 м) залегания кровли многолетнемерзлых пород, произошло в результате активизации сукцессии тундровой растительности на фоне климатических изменений. Повышение температуры почв обусловило опускание кровли многолетнемерзлых пород в рассматриваемый период с 1.5 до 1.8 м на приречном увале и с 1.8 до 2.0 м на водораздельном массиве.

Температурный режим почв, многолетнемерзлые породы, постагрогенные экосистемы, самовосстановительная сукцессия тундровой растительности

**SOIL TEMPERATURE REGIME IN POSTAGROGENIC ECOSYSTEMS UNDER
THE EXPANSION OF SELF-RESTORING SUCCESSION OF TUNDRA VEGETATION
(EUROPEAN NORTH-EAST OF RUSSIA)****D.A. Kaverin, A.V. Pastukhov, A.N. Panjukov***Institute of Biology, Komi Science Center UB RAS,
28, Kommunisticheskaya str., Syktyvkar, 167982, Russia; dkav@mail.ru*

The peculiarities of soil temperature regime and permafrost table depth in the postagrogenic meadow ecosystems developing in the cryolithozone in the European north-east of Russia in the context of the self-restoring tundra vegetation succession expansion have been investigated (2009–2016). A comparative assessment of the studied parameters with those pertained to meadow (agrogenic) ecosystems in the period of their agricultural development (1996–1999) is provided. Recent increase in the temperature of loamy Anthrosols and Stagnosols is associated with the permafrost table depth changing from relatively shallow to below 2 m as a result of climate change-driven activation of the self-restoring tundra vegetation succession. Specifically, within the observation sites located on the river terrace and watershed, the increased soil temperature during the study period has prompted an increase in the active layer thicknesses from 1.5 to 1.8 m and from 1.8 to 2.0 m, respectively.

Soil temperature regime, permafrost, postagrogenic ecosystems, self-restoring succession of tundra vegetation

ВВЕДЕНИЕ

Во второй половине XX в. в связи с ростом населения Воркутинского промышленного района, расположенного в пределах криолитозоны европейского Северо-Востока России, началось сельскохозяйственное освоение массивов тундры [Арчегова и др., 2013]. В условиях сурового субарктического климата и несплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП) целесообразным стало создание многолетних сеяных лугов как кормовой базы местного животноводства [Котелина и др., 1985]. В конце 1990-х гг. совхо-

зы ликвидировали, на сеяных лугах прекратили вносить удобрения в почвы и сенозаготовку. В 2000-х гг. луга продолжали функционировать в качестве устойчивых постагрогенных экосистем [Панюков, 2013; Ковалева и др., 2017], но уже во втором десятилетии XXI в. началось активное внедрение на сеяные луга тундровой растительности.

В условиях высокотемпературной восточно-европейской криолитозоны изменения растительного покрова сильно влияют на температуру почв

и глубину залегания кровли ММП [Малкова, 2010]. Исследованиям температурного режима почв луговых экосистем в криолитозоне посвящено незначительное количество работ [Десяткин, Десяткин, 2017; Zheng et al., 2017].

Влияние сельскохозяйственного освоения на летний температурный режим почв тундровых экосистем европейского Севера было исследовано А.В. Кононенко [1986], установившей, что уничтожение естественной растительности и поверхностного оторфованного горизонта приводит к кардинальной смене температурного режима почв сельскохозяйственных угодий. Наиболее подробно температурный режим длительно сезоннопромерзающих почв агрогенных и постагрогенных тундровых экосистем в сравнении с их целинными аналогами рассмотрен в работе И.Б. Арчеговой [2007]. Агрогенно-трансформированные почвы, сформировавшиеся при освоении массивов крупнокустарниковой тундры, в последние годы их сельскохозяйственного использования (1996–1999) стали холоднее целинных почв, приближаясь по температурным параметрам к мерзлотным почвам региона.

Цель работы – исследование динамики температурного режима агроглееземов и глубины залегания кровли многолетнемерзлых пород в условиях активизации самовосстановительной сукцессии тундровой растительности в постагрогенных экосистемах европейского Северо-Востока России. В сравнительном аспекте рассматриваются исследуемые показатели в ненарушенных тундровых экосистемах, расположенных в аналогичных ландшафтных условиях. Сопоставлены показатели для постагрогенного (2009–2016 гг.) и сельскохозяйственного (1996–1999 гг.) периодов функционирования тундровых экосистем.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Территория исследований характеризуется суровым субарктическим климатом и массивно-островным распространением ММП [Геокриологическая карта..., 1997]. Основные климатические параметры за периоды 1996–1999 и 2009–2016 гг. по метеостанции г. Воркута приведены в табл. 1.

Район исследований представляет собой пологоувалистую равнину, покрытую чехлом покровных пылеватых суглинков мощностью менее 10 м [Карта..., 2010]. По геоботаническому районированию территория относится к Воркутинскому тундровому округу подзоны кустарниковой (южной) тундры [Огуреева, 1991]. На плакорах распространены кустарниковые (ерниковые и ивняковые) и кустарничковые тундры. На равнинных участках и в депрессиях развиты осоковые и плоскобугристые болота [Хантимер, 1974]. В структуре почвенного покрова в условиях за-

Таблица 1. Климатические параметры по метеостанции Воркута

| Гидрологические годы | Среднегодовая температура воздуха, °С | Суммы температур, °С·сут | | Коэффициент морозности воздуха | Среднегодовое количество осадков, мм |
|----------------------|---------------------------------------|--------------------------|---------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| | | положительных | отрицательных | | |
| 1995/96 | -5.8 | 835 | -2905 | 0.65 | 426 |
| 1996/97 | -5.2 | 828 | -2693 | 0.64 | 366 |
| 1997/98 | -8.0 | 1004 | -3878 | 0.66 | 583 |
| 1998/99 | -8.4 | 881 | -3930 | 0.68 | 541 |
| 1995–1999 | -6.8 | 887 | -3351 | 0.66 | 479 |
| 2009/10 | -7.0 | 995 | -3542 | 0.65 | 776 |
| 2010/11 | -4.1 | 1098 | -2562 | 0.60 | 668 |
| 2011/12 | -2.3 | 1370 | -2182 | 0.56 | 642 |
| 2012/13 | -4.8 | 1200 | -2951 | 0.61 | 438 |
| 2013/14 | -5.5 | 924 | -2862 | 0.64 | 623 |
| 2014/15 | -3.8 | 1184 | -2566 | 0.60 | 517 |
| 2015/16 | -1.1 | 1637 | -2018 | 0.53 | 419 |
| 2009–2016 | -4.1 | 1201 | -2669 | 0.60 | 583 |

трудненного дренажа преобладают торфяно-глееземы и торфяные олиготрофные почвы, на дренированных массивах широко распространены глееземы [Атлас..., 2010]. Глубина залегания кровли ММП в суглинистых почвогрунтах дифференцирована в зависимости от характера растительного покрова, варьируя от 0.7–0.8 до 2.0–3.0 м и более [Мажитова, 2008]. Глееземы мерзлотные широко развиты на наветренных вершинах, склонах увалов и террас под мохово-кустарничковой растительностью. Для мерзлотных почв характерна сливающаяся мерзлота, когда сезонное промерзание в почве достигает кровли ММП [Геокриология..., 1988]. Кровля ММП обычно не обнаруживается в пределах верхних 2–3 метров толщи под крупнокустарниковой растительностью, где наблюдается несливающаяся мерзлота [Шаманова, 1964].

Объектами исследования выбраны агроглееземы, сформированные на участках тундровых постагрогенных экосистем, представленных многолетними сеянными лугами, зарастающими естественной тундровой растительностью. В качестве целинных аналогов рассматриваются глееземы естественных тундровых экосистем (табл. 2). В глееземах естественных экосистем верхний органогенный горизонт (Т или О) непосредственно подстилается глеевым горизонтом (G). Агроглееземы имеют ограниченное распространение и впервые были подробно изучены в окрестностях г. Воркута [Классификация..., 2004]. Агроглееземы отличаются от ненарушенных глееземов наличием дернового горизонта (АУ) в верхней части профиля (см. табл. 2). Минеральные горизонты ниже 20 см сохранили естественное ненарушенное сложение. Во всех почвах глеевый горизонт в средней

Таблица 2. Характеристика участков исследований

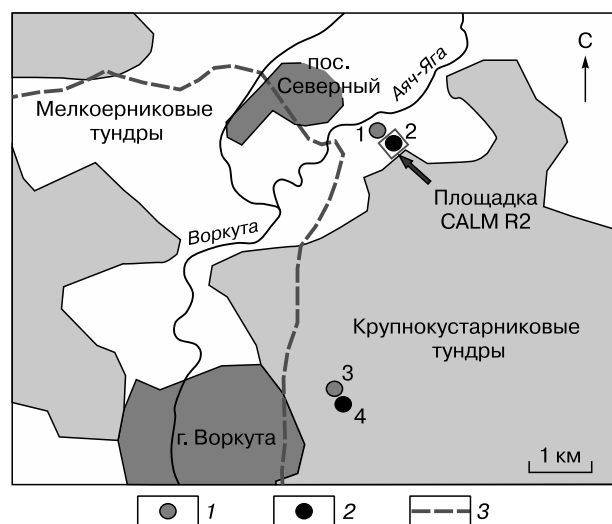
| Номер, тип участка | Характеристика рельефа | Растительное сообщество | Кустарниковый ярус | | Моховой ярус | | Название и строение почвы** |
|--------------------|---|--|---------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|--|
| | | | Средняя высота*, см | Проективное покрытие*, % | Средняя высота*, см | Проективное покрытие*, % | |
| 1. Постагрогенный | Дренажный склон юго-восточной экспозиции приречного увала | Разнотравно-красноовсяницевый луг | 30 ± 25 | 20 | 2 | 55 | Агроглеезем криометаморфический: АУ (0–5) – Вh (5–8) – G (8–28) – CRM (28–75) – C crm (75–100) – C crm (100–110) – G (110–147) |
| 2. Ненарушенный | | Мелкоерниковая травяно-кустарничковая моховая тундра | 30 ± 8 | 30–50 | 2 | 85 | Торфяно-глеезем криометаморфический мерзлотный: Т (0–12) – G (12–70) – CGcrm (70–110) – CG (110–120+) |
| 3. Постагрогенный | Дренажная вершина водораздельного увала | Разнотравно-мятликовый луг | 41 ± 50 | 20 | 1 | 35 | Агроглеезем криометаморфический: АУ (0–3) – АВg (3–10) – G (10–22) – CRM (22–60+) |
| 4. Ненарушенный | | Ивняково-ерниковая кустарничково-моховая тундра | 125 ± 25 | 60–70 | 7 | 70 | Глеезем криометаморфический: О (0–5) – Gtx (5–30) – CRM (30–89+) |

* Измерения проведены в сентябре 2016 г.

** Индексы почвенных горизонтов: АУ – дерновый; О – оторфованная подстилка; Т – торфянистый; G – глеевый; CRM – криометаморфический; В – переходный; С – почвообразующая порода; АВ, ВС – переходные горизонты. Индексы генетических признаков почвенных горизонтов: h – перегнойный, g – глееватый, tx – тикотропный, crm – криометаморфизованный, по: [Классификация..., 2004].

части профиля подстилается криометаморфическим горизонтом (CRM), постепенно переходящим в почвообразующую породу (С). Исследуемые почвы развиты на дренированных суглинистых увалах. При этом рассматриваются две пары почвенных профилей, сформированных на участ-

ках с преобладанием мелко- и крупнокустарниковой растительности соответственно. Участки 1 и 2 находятся на расстоянии 400 м друг от друга, в 10 км к северо-востоку от Воркуты (урочище Аяч-Яга) на приречном увале в условиях преобладания мелкоерниковой растительности и относительно близкого (1–2 м) залегания кровли ММП (рис. 1, см. табл. 2). Участки 3 и 4 расположены на расстоянии 400 м друг от друга, в 3 км к северо-востоку от Воркуты (урочище Нерусовой-Мусюр) на дренированном водораздельном увале, покрытом преимущественно крупнокустарниковой растительностью в условиях относительно глубокого (2 м и более) залегания кровли ММП. Все четыре участка исследований удовлетворительно представляют преобладающие типы растительных сообществ. Расположение участков в тождественных ландшафтных условиях позволяет рассмотреть специфику изменений температурного режима почв, глубины залегания кровли ММП и растительного покрова постагрогенных экосистем (участки 1 и 3) в сравнении с их целинными аналогами (участки 2 и 4). Освоение почв тундровых экосистем на участках сопровождалось созданием сеяных лугов, используемых в качестве сенокосных в 1980–1990-е гг. С 1997 г. внесение удобрений было приостановлено, уборка урожая производилась нерегулярно и в 2000-е гг. прекратилась совсем. Сеяные луга перешли в стадию постагрогенных агроэкосистем. Обилие, жизнеспособность



Географическое положение объектов исследования.

Участки 1–4 исследований: 1 – постагрогенные, 2 – ненарушенные. 3 – автодорога.

и степень развития высеванных видов трав существенно снизились. Началось внедрение видов из окружающих естественных тундровых экосистем – ив, мхов и пионерных лишайников. В постагрогенных экосистемах кустарники и мхи еще не сформировали сплошного яруса, произрастая в виде отдельных куртин (см. табл. 2).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В контуре каждого участка заложены минитрансекты, на пикетах которых были исследованы видовой состав, высота и проективное покрытие ярусов растительного покрова, мощность снежного покрова и глубина залегания кровли ММП. Минитрансекты участков 1, 3, 4 представляют собой прямые линии длиной 50 м с равномерно установленными на них через каждые 5 м 11 пикетами. Стометровый минитрансект на участке 2 выделен из 11 пикетов ряда № 6 мониторинговой площадки CALM R2 (Аяч-Яга) [Brown et al., 2000].

С помощью градуированного металлического зонда длиной 2 м была измерена глубина залегания кровли ММП в конце периода сезонного протаивания и мощность снежного покрова в третьей декаде марта. В 1998, 2009–2016 гг. ежегодные измерения мощности сезонного слоя и снежного покрова проведены на участке 2, на участках 1, 3, 4 данные параметры определяли только в 1998, 2009 и 2016 гг.

Заложение почвенного разреза и бурение температурной микроскважины было проведено на каждом участке для изучения морфологических свойств и температурного режима почв. Многолетние мониторинговые исследования почвенных температур (2009–2016 гг.) были проведены с помощью цифровых логгеров НОВО U-12-008, установленных на глубинах 0, 20, 50, 100 см и запрограммированных на 8 измерений в сутки. Логгеры были установлены в середине минитрансекта. Датчики логгеров погружены в скважину диаметром 3 см и глубиной до 100 см. Значения температуры почв (0–50 см), глубины залегания кровли ММП и снежного покрова за 1997–1998 гг. использованы из базы данных Г.Г. Мажитовой. Температурные показатели исследуемых почв в 1997–1998 гг., функционирующих в агрогенных экосистемах, сравнивались с показателями постагрогенного периода (2009–2016 гг.).

Значения температуры воздуха и сумм осадков для расчетов климатических параметров получены по данным метеостанции Воркута. Названия почв и индексы горизонтов даны по классификации почв России [Классификация..., 2004].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Климатические параметры. В постагрогенный период функционирования исследуемых лу-

говых экосистем (2000–2016 гг.) зафиксировано постепенное повышение среднегодовых температур воздуха ($R^2 = 0.22$, $y = 0.1432x - 5.6507$), обусловленное преимущественно уменьшением сумм отрицательных температур воздуха ($R^2 = 0.24$, $y = 42.5x - 3104.6$) (см. табл. 1). Суммы положительных температур воздуха изменились слабо ($R^2 = 0.05$, $y = 8.8664x + 1101$). В течение постагрогенного периода зафиксировано постепенное уменьшение коэффициента морозности воздуха (КМВ) ($R^2 = 0.16$, $y = -0.0027x + 0.6272$). Уменьшение значений КМВ с 0.66 (1996–1999 гг.) до 0.60 (2009–2016 гг.) фиксирует смягчение климатических условий в региональной зоне массивно-островного распространения ММП. Проведенные мониторинговые исследования на площадке CALM R2 показывают устойчивый положительный тренд ($R^2 = 0.53$, $y = 2.4141x + 25.148$) увеличения мощности снежного покрова в период 2000–2016 гг. Рост мощности снежного покрова снижает стабильность ММП в регионе [Оберман, Шеслер, 2009]. Очевидно, что климатические изменения последних десятилетий стали одной из основных причин активизации самовосстановительной сукцессии тундровой растительности на рассматриваемых участках [Елсаков, 2013].

Растительный покров. Постагрогенные сообщества участков 1 и 3 физиономически схожи друг с другом, представляя собой варианты разнотравно-злаковых лугов (см. табл. 2). После снятия агрорежима в обоих фитоценозах происходит изреживание сеяного злакового травостоя с одновременным внедрением видов из соседних ненарушенных сообществ. В период 2009–2016 гг. на участках 1 и 3 начал активно формироваться кустарниковый ярус из ив (*Salix* sp.) и карликовой березы (*Betula nana* L.). Высота и проективное покрытие кустарникового и мохового ярусов существенно ниже, чем для целинных участков (см. табл. 2).

На целинных участках 2 и 4 видовой состав кустарникового яруса одинаковый, в обоих сообществах преобладает карликовая березка со значительной примесью ив. Высота и проективное покрытие кустарникового яруса участка 2 значительно ниже, чем для участка 4 (см. табл. 2). На славодренированном участке 2 проективное покрытие мохового яруса на 15 % выше, чем на дренированном участке 4 (см. табл. 2).

Температурный режим почв. Исследования выявили значительные изменения температурных показателей почв, произошедшие со второй половины 1990-х до 2009–2016 гг. (табл. 3). В почвах как ненарушенных, так и постагрогенных участков наблюдается значительное сокращение сумм отрицательных температур (см. табл. 3). Это обусловлено повышенными зимними температурами воздуха и глубиной снежного покрова в период

Таблица 3. Температурные параметры почв, глубина кровли ММП и мощность снежного покрова на участках исследований

| Гидрологические годы | Среднегодовая температура, °С | | | | Сумма температур, °С-сут | | | | | | | | Глубина кровли ММП, см | Мощность снежного покрова, см |
|----------------------------------|-------------------------------|------|------|------|--------------------------|------|------|------|---------------|-------|-------|------|------------------------|-------------------------------|
| | | | | | положительных | | | | отрицательных | | | | | |
| | Глубина, см | | | | | | | | | | | | | |
| | 0 | 20 | 50 | 100 | 0 | 20 | 50 | 100 | 0 | 20 | 50 | 100 | | |
| <i>1. Постагрогенный участок</i> | | | | | | | | | | | | | | |
| 1997–1998* | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | –850 | – | – | – |
| 2009/10 | 0.1 | – | – | – | 567 | – | – | – | –549 | – | – | – | 150 | 28 |
| 2010/11 | 0.8 | – | – | – | 779 | – | – | – | –483 | – | – | – | – | – |
| 2011/12 | 1.5 | 0.8 | – | – | 1073 | 708 | 517 | 35 | –287 | –184 | – | – | – | – |
| 2012/13 | 0.8 | 0.3 | 0.3 | 0.1 | 933 | 589 | 353 | 128 | –638 | –468 | –233 | –77 | – | 35 |
| 2013/14 | 1.1 | 0.6 | 0.5 | 0.3 | 669 | 405 | 231 | 99 | –287 | –202 | –68 | –4 | – | – |
| 2014/15 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| 2015/16 | 2.3 | 1.6 | 1.0 | – | 1199 | 785 | 372 | 33 | –366 | –198 | – | – | 180 | 39 |
| <i>2. Ненарушенный участок</i> | | | | | | | | | | | | | | |
| 1997–1998* | – | –3.2 | – | – | 740 | 269 | – | – | –2062 | –1460 | –1401 | – | 71 | 39 |
| 2009/10 | 0.2 | 0.0 | –0.3 | – | 541 | 266 | 101 | – | –474 | –253 | –202 | – | 106 | – |
| 2010/11 | 1.0 | 0.7 | 0.6 | – | 743 | 452 | 419 | – | –385 | –206 | –197 | –105 | 102 | 36 |
| 2011/12 | 2.1 | 1.3 | 1.3 | –0.2 | 935 | 518 | 525 | 43 | –169 | –57 | –57 | – | 105 | 42 |
| 2012/13 | 1.4 | 0.5 | 0.5 | 0.0 | 900 | 429 | 414 | 72 | –402 | –241 | –224 | –79 | 107 | 53 |
| 2013/14 | 1.0 | – | 0.6 | 0.1 | 582 | – | 315 | 44 | –211 | –88 | –90 | –13 | 101 | 91 |
| 2014/15 | 2.2 | 1.3 | 0.9 | 0.1 | 1045 | 563 | 355 | 0 | –252 | –109 | –32 | –6 | 100 | 71 |
| 2015/16 | 3.0 | 1.5 | 1.0 | 0.1 | 1526 | 694 | 434 | 64 | –453 | –164 | –71 | –25 | 106 | 44 |
| <i>3. Постагрогенный участок</i> | | | | | | | | | | | | | | |
| 1997–1998* | –0.5 | –0.4 | –0.4 | – | 1107 | 786 | 515 | – | –1083 | –919 | –720 | – | 170 | 43 |
| 2009/10 | –0.4 | – | –0.2 | –0.2 | 570 | – | 413 | 283 | –636 | – | –417 | –286 | 180 | 70 |
| 2010/11 | 1.0 | – | 0.7 | 0.5 | 879 | – | 582 | 394 | –506 | – | –331 | –219 | – | – |
| 2011/12 | 2.0 | – | – | – | 1207 | – | – | – | –212 | – | – | – | – | – |
| 2012/13 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1168 | 812 | 695 | 613 | –571 | –243 | –148 | – | – | 81 |
| 2013/14 | 2.2 | – | – | 1.7 | 983 | – | – | 818 | –172 | – | – | – | – | – |
| 2014/15 | 2.4 | 2.5 | 2.3 | 2.3 | 1079 | 927 | 842 | 814 | –227 | –40 | –17 | – | – | – |
| 2015/16 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 200 | 72 |
| <i>4. Ненарушенный участок</i> | | | | | | | | | | | | | | |
| 1997–1998* | – | 1.6 | 1.6 | – | – | 749 | 684 | – | –355 | –187 | –95 | – | >200 | 79 |
| 2009/10 | 1.5 | – | 1.4 | 1.6 | 779 | – | 671 | 637 | –247 | – | –146 | –54 | >200 | 110 |
| 2010/11 | – | – | 2.1 | 2.1 | – | – | 844 | 792 | –483 | – | –81 | –22 | – | – |
| 2011/12 | 2.3 | 2.0 | – | – | 1220 | 1039 | – | – | –151 | –49 | –51 | –9 | – | – |
| 2012/13 | 2.2 | 2.3 | 2.1 | – | 1081 | 955 | 818 | – | –262 | –112 | –98 | 0 | – | 100 |
| 2013/14 | 2.0 | 2.0 | – | – | 922 | 766 | – | – | –176 | –52 | 0 | 0 | – | – |
| 2014/15 | 2.6 | 2.5 | 2.5 | 2.4 | 999 | 952 | 905 | 860 | –33 | –24 | –1 | 0 | – | – |
| 2015/16 | 3.3 | 3.2 | 3.0 | 2.8 | 1236 | 1180 | 1110 | 1018 | –18 | –13 | 0 | 0 | >200 | 80 |

Примечание. Прочерк – не определяли.
* По данным Г.Г. Мажитовой.

2009–2016 гг. по сравнению с предыдущими десятилетиями. Увеличение мощности снежного покрова обусловлено как ростом количества зимних осадков, так и экспансией крупнокустарниковой растительности на участки низкорослых мохово-кустарничковых тундр [Елсаков, Кулюгина, 2014]. Особенно сильное повышение зимних температур почв фиксируется на ненарушенном участке 2.

Наименьшие различия между рассматриваемыми периодами (1996–1999 и 2009–2016 гг.) отмечены в почве целинного участка 4 с крупнокустарниковой растительностью.

В 2009–2016 гг. почвы постагрогенных участков зимой были холоднее целинных аналогов (см. табл. 3). Это связано с меньшей высотой и сомкнутостью кустарникового яруса, характеризующего

ся снегозадерживающим эффектом [Чигир, 1975]. В данный период почвы участков 3 и 4 еще существенно различаются, а профили наветренных участков 1 и 2 уже приближаются друг к другу по зимним температурным параметрам. Это объясняется меньшими различиями в мощности снежного покрова, высоте и сомкнутости кустарниковой растительности между участками 1 и 2 по сравнению с участками 3 и 4 (см. табл. 2, 3). Тем не менее различия в суммах отрицательных температур почв участков 3 и 4 значительно уменьшились. В 1990-е гг. в почве луга на глубине 20 см суммы отрицательных температур были в 8–10 раз ниже, чем для почвы ивняковой тундры [Арчегова, 2007], в 2009–2016 гг. данный показатель варьирует в диапазоне 1.5–4 (см. табл. 3). В 1997–1998 гг. на участке 1 сумма отрицательных температур на глубине 50 см была выше таковой целинной почвы участка 2, что согласуется с заглубленной кровлей ММП и большим летним прогревом освоенной суглинистой мерзлотной почвы наветренной поверхности увала.

В 1997–1998 гг. сумма положительных температур в почве постагрогенного участка 3 была ниже, чем для участка 4, что объясняется значительным “накоплением” зимнего холода. Из-за отсутствия данных не представляется возможным сравнить летние температурные условия участков 1 и 2. Однако по динамике глубины залегания кровли ММП можно предположить, что суммы положительных температур в почве постагрогенного участка 1 были выше таковых для участка 2. Это согласуется с результатами ранее проведенных исследований А.В. Кононенко [1986], зафиксировавшей лучшее летнее прогревание агроглееземов освоенных участков по сравнению с целинными аналогами. Влияние распашки на усиление летнего прогревания почв связано с разрушением органогенных горизонтов [Шаманова, 1964].

В 2009–2016 гг. по сравнению с сельскохозяйственным периодом в почвах суммы положительных температур значительно повысились (см. табл. 3). В 2009–2016 гг. почва постагрогенного участка 3 продолжала прогреваться летом хуже целинного, что объясняется неполным восстановлением здесь кустарникового яруса (см. табл. 2, 3). Верхние горизонты (0–20 см) агроглеезема (участок 1) летом остаются холоднее своего целинного аналога, однако на глубинах 50–100 см суммы положительных температур сопоставимы (см. табл. 3). Меньшее летнее прогревание агроглееземов также обусловлено формированием плотного теплоизолирующего травянистого очеса в результате медленной биологической трансформации отмершей биомассы [Арчегова и др., 2009].

Данные по среднегодовой температуре почв на объектах исследования в 1990-е гг. отрывочны.

И.Б. Арчегова [2007] фиксирует снижение среднегодовой температуры на участке 3 по сравнению с целинным, но конкретных значений не приводит. В 1997–1998 гг. положительные среднегодовые температуры наблюдаются в немерзлом глееземе участка 4, почвы участков 2 и 3 характеризуются отрицательными среднегодовыми температурами (см. табл. 3). В период 2009–2016 гг. для почв постагрогенных экосистем, так же как и целинных, характерны преимущественно положительные среднегодовые температуры. По данному годовому параметру почвы постагрогенных экосистем остаются в целом холоднее целинных. Почвы наветренных участков 1, 2 холоднее таковых, формирующихся на подветренных массивах (участки 3, 4), что связано с региональными особенностями дифференциации геокриологических условий [Оберман, Шеслер, 2009]. Различия годовых и летних температурных показателей между этими двумя группами почв усиливаются с глубиной (см. табл. 3).

Многолетнемерзлые породы. В условиях доминирования мелкоерниковой растительности с близким к поверхности залеганием ММП (до 1 м) разрушение теплоизолирующего торфяного горизонта в период сельскохозяйственного освоения на участке 1 способствовало понижению уровня кровли ММП до 1.5 м. Однако полного оттаивания ММП не произошло, так как луговые экосистемы продолжили функционировать в условиях относительно малой мощности снежного покрова и сильного зимнего охлаждения почв. При наличии поверхностного теплоизолирующего торфяного горизонта близкозалегающие ММП на участке 2 можно рассматривать в качестве климатически обусловленных экосистемно-защищенных [Shur, Jorgenson, 2007]. При уничтожении в результате распашки поверхностного органогенного горизонта на участке 1 ММП потеряли экосистемную защиту, оставаясь преимущественно климатически обусловленными. В 2009–2016 гг. активизация самовосстановительной сукцессии на фоне смягчения климатических показателей способствовала дальнейшему опусканию кровли ММП на участке 1 с 1.5 до 1.8 м.

На участке 4 кровля ММП на глубине до 2 м не обнаруживается. Сомкнутый высокий кустарниковый ярус, задерживающий значительное количество снега, и маломощная оторфованная подстилка обуславливают относительно мягкий температурный режим почв и, соответственно, отсутствие ММП в пределах почвенного профиля. Сведение крупнокустарниковой растительности при сельскохозяйственном освоении на участке 3 привело к усилению зимнего охлаждения почв и поднятию кровли ММП до глубины 1.5 м в 1990–2000 гг. [Mazhitova, Lapteva, 2004]. В 2009–2016 гг.

сукцессионные изменения растительного покрова способствовали усилению снегонакопления, что наряду со смягчением зимнего климата обусловило протаивание ранее агрегированных ММП до глубины 2 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При создании и эксплуатации сеяных лугов (1980–1990-е гг.) на суглинистых внепойменных массивах тундры температура почв и глубина залегания кровли ММП изменялись дифференцированно в зависимости от ландшафтного положения экосистем. Разрушение мелкоерниковой растительности и торфяного теплоизолирующего горизонта при сельскохозяйственном освоении участков с близкозалегающими ММП (1.0 м) привело к повышению температуры почв и протаиванию ММП до глубины 1.5 м. Сведение снегозадерживающего крупнокустарникового яруса на участках с глубокозалегающими ММП (более 2 м), напротив, обусловило снижение температуры почв и агрегацию ММП до глубины 1.5 м.

В период активизации самовосстановительной сукцессии (2009–2016 гг.) по сравнению с сельскохозяйственным периодом в постагрогенных экосистемах наблюдались повышенные среднегодовые температуры воздуха (-4.1 ± 1.8 °C), низкий коэффициент морозности воздуха (0.60 ± 0.03). Наблюдался положительный тренд ($R^2 = 0.53$) увеличения средней мощности снежного покрова (56 ± 20 см). Климатическое потепление приводит к сукцессионным изменениям тундровой растительности в постагрогенных экосистемах, где формируются кустарниковый (сомкнутость 0.2, высота 30–40 см) и моховой (сомкнутость 3.5–5.5, высота 1–2 см) ярусы, изреживается сеяный злаковый травостой.

В 2009–2016 гг. по сравнению с концом 1990-х гг. зафиксировано значительное повышение сумм положительных и, особенно, отрицательных температур почв постагрогенных и целинных тундровых экосистем. Различия в суммах отрицательных температур между почвами луговых и ненарушенных экосистем значительно уменьшились в постагрогенный период (в 1.5–4 раза) по сравнению с таковыми для сельскохозяйственного периода (в 8–10 раз). Однако почвы постагрогенных участков зимой остаются холоднее целинных, что связано с меньшим снегонакоплением в условиях разреженной кустарниковой растительности зарастающих лугов.

Почвы постагрогенных экосистем в летний период в целом остаются холоднее своих целинных аналогов, что объясняется их большим зимним охлаждением и формированием теплоизолирующего травяного охеса после прекращения сенокосшения. Агролееземы, как и их целинные

аналоги, характеризуются преимущественно положительными среднегодовыми температурами. В постагрогенных экосистемах повышение температуры почв привело к опусканию кровли ММП в 2009–2016 гг. на 0.2–0.3 м независимо от ландшафтного положения участков.

Таким образом, повышение температуры почв постагрогенных экосистем, сопровождаемое опусканием кровли ММП, обусловлено активизацией самовосстановительной сукцессии естественной тундровой растительности, происходящей на фоне современных климатических изменений.

Работа выполнена в рамках темы Государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН (№ АААА-А17-117122290011-5), РФФИ (проект № 18-05-11003).

Литература

- Арчегова И.Б.** Термический режим тундровых почв в условиях освоения и восстановления естественной растительности // Почвоведение, 2007, № 8, с. 954–960.
- Арчегова И.Б., Кузнецова Е.Г., Лиханова И.А. и др.** Экологические принципы природопользования и природовосстановления на Севере. Сыктывкар, Коми НЦ УрО РАН, 2009, 176 с.
- Арчегова И.Б., Панюков А.Н., Андрианов В.А.** Возможности и экономическая целесообразность сельского хозяйства в тундре // Север и рынок: формирование экон. порядка, 2013, № 1, с. 12–15.
- Атлас почв Республики Коми** / Под ред. Г.В. Добровольского, А.И. Таскаева, И.В. Забоевой. Сыктывкар, Коми республи. типография, 2010, 356 с.
- Геокриологическая карта СССР**, масштаб 1:2 500 000 / Отв. ред. Э.Д. Ершов, К.А. Кондратьева. Винница, Карг. предприятие, 1997, 16 л.
- Геокриология СССР**. Европейская территория СССР / Ред. Э.Д. Ершов. М., Недра, 1988, 358 с.
- Десяткин Р.В., Десяткин А.Р.** Термический режим мерзлотной лугово-черноземной солонцеватой почвы в многолетнем цикле // Почвоведение, 2017, № 11, с. 1344–1354.
- Елсаков В.В.** Материалы спутниковых съемок в анализе значений хлорофилльного индекса тундровых фитоценозов // Исследование Земли из космоса, 2013, № 1, с. 60–70.
- Елсаков В.В., Кулюгина Е.Е.** Растительный покров Югорского полуострова в условиях климатических флуктуаций последних десятилетий // Исследование Земли из космоса, 2014, № 3, с. 65–77.
- Карта четвертичных образований территории Российской Федерации**. Масштаб 1:2 500 000 / Под ред. О.В. Петрова, А.Ф. Морозова, Т.В. Чепкасовой и др. СПб., ВСЕГЕИ, 2010, 1 л.
- Классификация и диагностика почв России** / Сост. Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск, Ойкумена, 2004, 342 с.
- Ковалева В.А., Денева С.В., Панюков А.Н. и др.** Почвенные грибы как компоненты постагрогенных фитоценозов в тундре // Вестн. Ин-та биологии Коми НЦ УрО РАН, 2017, № 3, с. 7–14.

- Кононенко А.В.** Гидротермический режим таежных и тундровых почв Европейского Северо-Востока. Л., Наука, 1986, 144 с.
- Котелина Н.С., Арчегова И.Б., Иванов В.А., Назарова В.И.** Производство кормов в условиях Крайнего Севера // Вестн. с.-х. наук, 1985, № 7, с. 78–83.
- Мажитова Г.Г.** Температурные режимы почв в зоне сплошной многолетней мерзлоты европейского Северо-Востока России // Почвоведение, 2008, № 1, с. 54–67.
- Малкова Г.В.** Мониторинг среднегодовой температуры пород на стационаре Болванский // Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 3, с. 3–14.
- Оберман Н.Г., Шеслер И.Г.** Современные и прогнозируемые изменения мерзлотных условий Европейского северо-востока Российской Федерации // Проблемы Севера и Арктики РФ. Науч.-информ. бюл., 2009, вып. 9, с. 96–106.
- Огуреева Г.Н.** Ботанико-географическое районирование СССР. М., Изд-во Моск. ун-та, 1991, 188 с.
- Панюков А.Н.** Восстановительная сукцессия на залежах в условиях восточноевропейской тундры // Междунар. журн. прикл. и фундам. исследований, 2013, № 8 (2), с. 235–238.
- Хантимер И.С.** Сельскохозяйственное освоение тундры. Л., Наука, 1974, 227 с.
- Чигир В.Г.** Гелиотермозона и некоторые криогенные особенности почв южной части Западно-Сибирской равнины // Почвенный криогенез и мелиорация холодных и мерзлотных почв / Ред. О.В. Макеев. М., Ин-т агрохимии и почвоведения, 1975, с. 170–173.
- Шаманова И.И.** Сезонное промерзание и протаивание почв и горных пород // Геокриологические условия Печорского угольного бассейна / Ред. Н.Г. Бобов, Л.А. Братцев. М., Наука, 1964, с. 88–118.
- Brown J., Hinkel K.M., Nelson F.E.** The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: Research designs and initial results // Polar Geography, 2000, vol. 24, No. 3, p. 165–258.
- Mazhitova G.G., Lapteva E.M.** Trans-Ural Polar Tour. Guidebook. Syktyvkar, Russia, Institute of Biology Komi SC RAS, 2004, 53 p.
- Shur Y.L., Jorgenson M.T.** Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems // Permafrost and Periglacial Processes, 2007, No. 18, p. 7–19, DOI: 10.1002/ppp.582.
- Zheng D., Van Der Velde R., Su B. et al.** Evaluation of noah frozen soil parameterization for application to a Tibetan Meadow Ecosystem // J. Hydrometeorol., 2017, No. 18 (6), p. 1749–1763, DOI: 10.1175/JHM-D-16-0199.1.
- Dobrovolsky G.V., Taskaev A.I., Zaboeva I.V.** (Eds.). Atlas pochv Respubliki Komi [Soil Atlas of the Komi Republic]. Syktyvkar, Komi Republican Printing House, 2010, 356 p. (in Russian).
- Ershov E.D., Kondratieva K.A.** (Eds.). Geokriologicheskaya karta SSSR [Geocryological Map of the USSR (scale 1:2 500 000)]. Vinnitsa, Kart. predpriyatye, 1997, 16 sheets (in Russian).
- Ershov E.D.** (Ed.). Geokriologiya SSSR. Evropeiskaya territoriya SSSR [Geocryology of the USSR. European Territory of the USSR]. Moscow, Nedra, 1988, 358 p. (in Russian).
- Desyatkin R.V., Desyatkin A.R.** Temperature regime of solonchic meadow-chernozemic permafrost-affected soil in a long-term cycle. Eurasian Soil Science, 2017, vol. 50, No. 11, p. 1301–1310.
- Elsakov V.V.** The materials of satellite images for chlorophyll index values analysis of tundra phytocenoses. Issledovanie Zemli iz Kosmosa [Studying the Earth from Space], 2013, No. 1, p. 60–70 (in Russian).
- Elsakov V.V., Kulyugina E.E.** The vegetative cover of the Yugra Peninsula under conditions of climate fluctuations during the recent decades. Issledovanie Zemli iz Kosmosa [Studying the Earth from Space], 2014, No. 3, p. 65–77 (in Russian).
- Petrov O.V., Morozov A.F., Chepkasova T.V. et al.** (Eds.). Map of Quaternary deposits on the Territory of the Russian Federation (scale 1:2 500 000). St. Petersburg, VSEGEI, 2010, 1 sheet. (in Russian).
- Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I.** (Eds.). Russian Soils Classification and Diagnostics. Smolensk, Oykumena, 2004, 342 p. (in Russian).
- Kovaleva V.A., Deneva S.V., Panyukov A.N. et al.** Soil fungi as components of postagrogenic phytocenoses in tundra. Bulletin of the Institute of Biology of Komi Science Center (IB Komi SC UB RAS), 2017, No. 3, p. 7–14 (in Russian).
- Kononenko A.V.** Gidrotermicheskiy rezhim taezhnykh i tundrovyykh pochv Evropeiskogo Severo-Vostoka [Hydrothermal Regime of the Taiga and Tundra Soils in the Northeast European Russia]. Leningrad, Nauka, 1986, 144 p. (in Russian).
- Kotelina N.S., Archegova I.B., Ivanov V.A., Nazarova V.I.** Fodder production in the Far North. Vestnik Selsko-khozyaistvennykh Nauk [J. Agricultural Sciences], 1985, No. 7, p. 78–83 (in Russian).
- Mazhitova G.G.** Soil temperature regimes in the discontinuous permafrost zone in the East European Russian Arctic (in Russian). Eurasian Soil Science, 2008, vol. 1, No. 41, p. 48–62.
- Malkova G.V.** Mean-annual ground temperature monitoring on the steady-state-station “Bolvansky”. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2010, vol. XV, No. 3, p. 3–14 (in Russian).
- Oberman N.G., Shesler I.G.** Modern and forecasted changes in cryological conditions in the northeast European Russian Federation. Nauchno-inform. Bulletin [Problems of the North and the Arctic of the Russian Federation. Scientific-inform. Bul.], 2009, issue 9, p. 96–106 (in Russian).
- Ogureeva G.N.** Botaniko-geograficheskoe raionirovaniye SSSR [Botanical-Geographical Zoning of the USSR]. Moscow, Moscow University Press, 188 p. (in Russian).
- Panyukov A.N.** Restoration succession on fallow in the conditions of East European tundra. Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy [Intern. J. Applied and Basic Research], 2013, No. 8 (2), p. 235–238 (in Russian).
- Khantimer I.S.** Selsko-khozyaistvennoye osvoeniye tundry [Agricultural development of the tundra]. Leningrad, Nauka, 1974, 227 p. (in Russian).

References

- Archegova I.B. Thermal regime of tundra soils under reclamation and restoration of natural vegetation. Pochvedeniye [Eurasian Soil Science], 2007, No. 8, p. 954–960 (in Russian).
- Archegova I.B., Kuznetsova E.G., Lihanova I.A., Panyukov A.N., Khabibullina F.M., Osadchaya G.G. Ekologicheskie printsipy prirodopolzovaniya i prirodovosstanovleniya na Severe [Ecological principles of nature management and restoration in the North]. Syktyvkar, Komi Scientific Center Ural Branch of the RAS, 2009, 176 p. (in Russian).
- Archegova I.B., Panyukov A.N., Andrianov V.A. Opportunities and economic feasibility of agriculture in the tundra. In: Sever i rynek: formirovaniye ekonomicheskogo poryadka [The North and the Market: the Establishment of an Economic Order], 2013, No. 1, p. 12–15 (in Russian).

Chigir V.G. Heliothermozone and some cryogenic features of soils in the southern part of the West Siberian Plain. In: Pochvennyi kriogenez i melioratsiya kholodnykh i merzlotnykh pochv [O.V. Makeev (Ed.). Soil Cryogenesis and Amelioration of Cold and Frozen Soils]. Moscow, Institute of Agrochemistry and Soil Science, 1975, p. 170–173 (in Russian).

Shamanova I.I. Seasonal freezing and thawing of soils and rocks. In: Geokriologicheskie usloviya Pechorskogo ugol'nogo basseina [N.G. Bobov, L.A. Bratsev (Ed.). Geocryological Conditions of the Pechora Coal Basin]. Moscow, Nauka, 1964, p. 88–118 (in Russian).

Brown J., Hinkel K.M., Nelson F.E. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: Research designs and initial results. Polar Geography, 2000, vol. 24, No. 3, p. 165–258.

Mazhitova G.G., Lapteva E.M. Trans-Ural Polar Tour. Guidebook. Syktyvkar, Russia, Institute of Biology Komi SC RAS, 2004, 53 p.

Shur Y.L., Jorgenson M.T. Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems. Permafrost and Periglacial Processes, 2007, No. 18, p. 7–19, DOI: 10.1002/ppp.582.

Zheng D., Van Der Velde R., Su B. et al. Evaluation of noah frozen soil parameterization for application to a Tibetan Meadow Ecosystem. J. Hydrometeorol., 2017, No. 18 (6), p. 1749–1763, DOI: 10.1175/JHM-D-16-0199.1.

*Поступила в редакцию 25 мая 2018 г.,
после доработки – 18 января 2019 г.,
принята к публикации 5 февраля 2019 г.*