

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.41

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРИЗОНТА О ПОДЗОЛА НА ДВУХ В РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ ДЕГРАДИРОВАННЫХ УЧАСТКАХ ТЕХНОГЕННО ТРАНСФОРМИРОВАННОЙ ЭКОСИСТЕМЫ (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)¹

© 2020 г. Г. М. Кашулина^а, *, Т. И. Литвинова^а, Н. М. Коробейникова^а

^аПолярно-альпийский ботанический сад-институт КНЦ РАН, Ферсмана, 18а, Анатиты, 184209 Россия

*e-mail: galina.kashulina@gmail.com

Поступила в редакцию 10.02.2020 г.

После доработки 13.03.2020 г.

Принята к публикации 18.03.2020 г.

С 22 сентября по 10 июля в 2014/2015 и 2015/2016 гг. измеряли температуру верхнего горизонта О подзола (Albic Podzol) на двух участках сильнозагрязненной и деградированной экосистемы в окрестностях медно-никелевого предприятия на Кольском полуострове: на преобладающей в структуре экосистемы техногенной пустоши без напочвенного покрова и на разрастающемся в ответ на снижение выбросов небольшого куста вороники (*Empetrum hermaphroditum*). Как показали результаты, почвы под куртиной угнетенной вороники и пустоши техногенной значительно различались по всем общим температурным показателям. Почва под куртиной вороники была подвержена значительно меньшим колебаниям температуры, как за период исследований, так и в суточном цикле. В осенний период она дольше поддерживала температуру в положительной области и эффективнее смягчала первые ночные заморозки. Из-за темной окраски разрушающегося гор. О почва пустоши лучше прогревалась и характеризовалась более высокими дневными и среднесуточными температурами в летний период. В осенний период до формирования постоянного снежного покрова почва пустоши, наоборот, сильнее промерзала вслед за резкими снижениями температуры воздуха. Таким образом, наличие даже угнетенного напочвенного покрова предохраняло почву от резких колебаний температуры, обеспечивая более стабильные температурные условия для роста растений. В отсутствии напочвенного растительного покрова дополнительное иссушение в летний период и резкие одновременные снижения температуры почвы и воздуха осенью могут быть дополнительными к экстремальному загрязнению стресс-факторами для выживших древесных растений и их семян.

Ключевые слова: температура почвы, деградированный подзол (Eroded Albic Podzol), напочвенный покров, техногенная пустошь (technogenic barten), медно-никелевое предприятие

DOI: 10.31857/S0032180X20090087

ВВЕДЕНИЕ

Медно-никелевое предприятие, расположенное в центре Кольского полуострова (северо-запад России), является самым крупным и длительно действующим источником выбросов SO₂ и тяжелых металлов на севере Европы [17, 24]. Одним из наиболее очевидных последствий выбросов этого предприятия является экстремальное химическое загрязнение всех поверхностных компонентов окружающей среды: атмосферы и атмосферных осадков [19], почв [3, 4, 22, 24] и растений [11, 23] основными металлами загрязнителями – Ni и Cu. Так, содержание Ni и Cu в горизонте О почв около этого пред-

приятия к настоящему времени достигло уровней свойственных перерабатываемой руде [4]. В меньшей степени все поверхностные среды здесь загрязнены большим спектром других токсичных элементов – Cd, Pb, Hg, As, Tl и др. [3, 22, 24]. Тем не менее, наиболее значительное влияние на химические свойства (содержание органического вещества, ЕКО, содержание обменных оснований и доступных питательных элементов) и морфологическое сложение почв деятельность предприятия оказывает посредством косвенного воздействия – через разрушение растительности [6, 18].

После сокращения выбросов в последние 20 лет около этого предприятия, как и в целом в регионе [17], началось восстановление растительности [7, 13]. В основном оно здесь протека-

¹ Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi 10.31857/S0032180X20090087 для авторизованных пользователей.

ет за счет разрастания выживших древесных растений – главным образом березы с протяженными, глубоко уходящими корнями. Напочвенный покров здесь восстанавливается значительно медленнее. Это обусловлено не только экстремальным загрязнением, но и физическим разрушением верхнего горизонта О почв [6] – места обитания корней кустарничков. Единичные выжившие куртины кустарничков разрастаются только в местах скопления свежего опада березы под кронами деревьев (рис. S1, А). Вместе с тем, для дальнейшего устойчивого восстановления нарушенных экосистем необходимо формирование не только напочвенного покрова, но и древесного подростка. Как показал многолетний мониторинг, семена выживших березы и сосны являются жизнеспособными и прорастают, несмотря на экстремальное загрязнение верхних слоев почв тяжелыми металлами. Однако через несколько лет эти сеянцы гибнут.

Кроме приведенных выше негативных антропогенных факторов дополнительными причинами угнетенного состояния выживших растений и гибели сеянцев могут быть также изменения водного и теплового режима нарушенных экосистем. Большая роль растений [1, 12] в формировании теплового режима почв и задокументированные его изменения в случае повреждения растительности другими факторами, например, пожарами [8] или рубками леса [2] дают основание предположить, что микроклимат нарушенных экосистем около медно-никелевых предприятий также претерпел серьезные изменения.

Возможность сдвига водного режима нарушенных экосистем в сторону иссушения из-за повреждения напочвенного покрова была нами показана ранее при анализе факторов и механизмов разрушения экосистем под воздействием медно-никелевых предприятий в регионе [18]. Дополнительным стресс-фактором для ослабленных сеянцев березы здесь могут быть и ранние осенние заморозки. Причем, именно, заморозки могут оказаться главным фактором в повреждении сеянцев. Поскольку, согласно теории Маниона [21] именно мороз рассматривается в качестве основного фактора повреждения и гибели деревьев в условиях загрязнения. Остальные факторы, включая загрязнение, могут только ослабить растения. Некоторые лесоводы [15, 16], изучавшие повреждение экосистем под воздействием медно-никелевых предприятий на Кольском полуострове в период наивысшего объема выбросов, также рассматривали мороз в качестве важного фактора повреждения деревьев.

С морозными явлениями могут быть связаны и два других вида повреждения в экстремально загрязненных и нарушенных экосистемах около медно-никелевого предприятия: морозное пучение на отдельных участках с выталкиванием материала иллювиального горизонта ВF подзола на поверхность

(рис. S1, В) и появившееся в последние несколько лет выталкивание проводящих корней березы над поверхностью (рис. S1, С). Если первое может иметь положительный экологический эффект, поскольку на поверхности оказывается минеральный материал, который не способен накапливать большое количество тяжелых металлов и является менее токсичным субстратом для сеянцев [4]. То последствия от выталкивания корней значительно более серьезные – могут привести к гибели деревьев переживших период наивысшего загрязнения атмосферы.

Вместе с тем изменениям микроклимата экосистем вследствие нарушения растительности около медно-никелевых предприятий на Кольском полуострове посвящены единичные работы [20]. Для выявления возможности повреждения сеянцев березы и выталкивания корней при пучении грунта морозами во время осенних заморозков были проведены рекогносцировочные наблюдения за динамикой температуры почв на двух участках сильно загрязненной и нарушенной экосистемы около источника выбросов: преобладающей в структуре экосистемы техногенной пустоши без напочвенного покрова (где прорастают и гибнут сеянцы березы и выталкиваются на поверхность корни деревьев) и разрастающегося в ответ на снижение выбросов небольшого куста вороники (*Empetrum hermaphroditum*). Эта работа была проведена в рамках комплексного почвенно-геоботанического мониторинга [4–6, 19].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наблюдения за температурой почвы проводили на стационарной площадке П-1 комплексного почвенно-геоботанического мониторинга [4–6, 19], расположенной в 8 км на север от комбината “Североникель” (рис. S2). Она расположена на плоской вершине моренного холма. Растительность здесь представлена кустистой березой, разросшейся после значительного снижения выбросов в последние 20 лет. Высота берез не превышает 2 м, а проективное покрытие крон на площадке составляет около 30%. Напочвенный растительный покров на большей части территории площадки к началу мониторинговых исследований (2001 г.) был уже полностью разрушен. Почва представлена деградированным подзолом с разрушающимся горизонтом О на поверхности [6]. По данным обследования 2001–2011 гг., эта площадка является одной из самых загрязненных: концентрации Ni в снежном покрове превышали фоновые значения в 7300 и Cu в 5700 раз [19], а в разрушающемся горизонте О – Ni в 1200 и Cu в 730 раз [4].

Экстремальность условий произрастания растений здесь обусловлена не только высоким уровнем загрязнения, но и природной суровостью климата

[10, 14] в данной местности (коротким вегетационным периодом, продолжительной холодной зимой и низкой суммой биологически активных температур) из-за ее высокого широтного положения ($67^{\circ}59'16.7''$ с. ш.).

Температуру верхнего горизонта О почв на глубине 2 см фиксировали 6 раз в сутки температурными регистраторами марки iButton с 22 сентября 2014 г. по 11 июня 2015 г. и в тот же период 2015/2016 гг. на двух участках стационарной площадки П-1 (рис. S3) Первый участок — “техногенная пустошь” представлял преобладающую часть территории экосистемы без напочвенного покрова с разрушающимся гор. О подзола коренной экосистемы на поверхности. При длительном отсутствии свежего опада старое органическое вещество гор. О здесь хорошо разложилось и превратилось в пылящий материал, смешанный с минеральными частицами из нижерасположенных горизонтов [6]. Сверху горизонт гор. О пустоши имеет темную серовато-коричневую (10YR 3/2) окраску. В нем находятся только редкие крупные проводящие корни деревьев.

Второй участок представлял единичные разрастающиеся после снижения выбросов куртины вороники (*Empetrum hermaphroditum*) рядом с кроной березы — участок “вороника”. Здесь горизонт О представлен разлагающимся современным опадом листьев березы, сметаемым сюда с открытых мест ветром. На поверхности кроме живых побегов вороники находится слегка потемневший прошлогодний опад листьев березы. Его светлая золотисто-коричневая окраска на поверхности с глубиной по мере разложения становится темно-серой. На этом участке в горизонте О много живых крупных и мелких корней растений.

Кроме различий по способности отражать радиацию из-за различий цвета и материала поверхности на тепловой режим почв могут также оказать влажность, содержание органического вещества и плотность сложения [1]. Данные разреза-траншеи 2013 года на этой площадке показали, что влажность гор. О пустоши составила всего 8.2% (на воздушно-сухую почву), а влажность гор. О под вороникой варьировала от 19% в верхнем слое 0—1 см, до 44% на глубине 2 см и 256% на глубине 4 см. Площадное опробование в 2018 г. также показало, что влажность гор. О пустоши меньше (варьирует от 17 до 100, среднее — 36%, $n = 13$), чем в почве под вороникой (от 33 до 145, среднее 93%, $n = 5$). Согласно *U*-критерию Манна-Уитни, влажность слоя со свежим опадом листьев березы под вороникой была значимо ($p \leq 0.01$) больше по сравнению с разрушающимся гор. О на пустоши.

Различия по содержанию $C_{орг}$ в гор. О между участками в разрезе-траншее были менее существенны (41% на абсолютно-сухую почву в пустоши, 51% в верхнем слое 0—1 см и 49% на глубине

2—4 см под вороникой), но по составу органики почва на пустоши и под вороникой отличались принципиально: в первом случае — это остатки старого органического вещества почвы исходного кустарничково-зеленомошного ельника, а под вороникой — свежий разлагающийся опад листьев березы.

Более высокая влажность гор. О, состоящего из опада листьев березы, не означает ее более высокую теплопроводность, поскольку она имеет более рыхлое сложение по сравнению с пустошью: плотность гор. О пустоши по результатам площадного опробования 2018 г. составила (среднее \pm стандартное отклонение) 0.58 ± 0.19 г/см³ ($n = 13$), а под вороникой — 0.14 ± 0.07 г/см³ ($n = 5$).

Логгеры были установлены в метре друг от друга. Что позволило свести к минимуму различия по затенению обследованных участков деревьями.

Температуру воздуха, высоту снежного покрова, облачность и направление ветра за период исследования представляли данные метеостанции “Мончегорск” (URL: <http://www.rp5.ru>), расположенной в 4 км на В-ЮВ от площадки мониторинга (рис. S2). Некоторое представление о мощности и плотности снега, от которых зависит тепло- и воздухообмен между почвой и воздухом в зимний период [9] на обследуемой площадке дают данные наблюдений 2005—2011 гг. [19]. Так средняя мощность снега на конец марта здесь в тот период варьировала от 47 до 78 см и была от 9 до 24 см выше, чем на метеостанции “Мончегорск”. Плотность снега варьировала от 0.18 до 0.30 г/см³. Для мощности снега на этой площадке свойственно очень высокое пространственное варьирование. Например, в 2006 году при средней мощности снежного покрова 66.2 см на площадке, она варьировала от 40 до 83 см, то есть в 2 раза.

Обработка данных и построение диаграмм были проведены с использованием Microsoft Excel 2010.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как показали результаты, почвы под куртиной угнетенной вороники и техногенной пустоши в обследованной экосистеме, значительно различались по всем температурным показателям (табл. 1). Так, средняя за период исследования (с 22 сентября по 11 июня) температура воздуха в 2014/2015 гг. составила -2.9 , в 2015/2016 гг. — -2.6°C . В почвах на обоих участках эта величина была в области положительных температур. При этом средняя температура почвы в 2014/2015 гг. под вороникой была на 0.9°C ниже по сравнению с почвой пустоши.

Максимальная среднесуточная температура почвы пустоши благодаря темной окраске поверхности и лучшему прогреванию в летний период была близка к этому показателю для воздуха оба сезона и почти на 4°C превышала температу-

Таблица 1. Основные температурные показатели гор. О деградированного подзола на глубине 2 см на участках с полностью разрушенным напочвенным покровом – “пустошь” и под угнетенной куртиной вороники – “вороника” и атмосферного воздуха по данным метеостанции Мончегорск (www.gp5.ru) по данным наблюдения с 22 сентября по 10 июня 2014/2015 и 2015/2016 гг.

Показатель	Пустошь 14/15 гг.	Пустошь 15/16 гг.	Вороника 14/15 гг.	Воздух 14/15 гг.	Воздух 15/16 гг.
Температура, °С					
Средние за весь период наблюдений	1.1	1.82	0.21	–2.9	–2.6
Максимальные среднесуточные	14.2	15.2	10.1	15.7	16.8
Минимальные среднесуточные	–5.9	–2.7	–3.9	–34	–36.7
Абсолютный максимум	23.2	22.7	13.1	20.9	21.5
Абсолютный минимум	–7.5	–3.4	–3.9	–35.4	–38
Диапазон варьирования	30.7	26.1	17	56.3	59.5
Сумма отрицательных среднесуточных	–109	–68	–234	–1168	–1278
Сумма положительных среднесуточных	395	548	287	436	605
Сумма среднесуточных – 5–10°С	163	444	181	149	296
Сумма среднесуточных >10°С	124	213	10	141	174
Даты					
Переход к отрицательным	21.10.14	7.11.15	21.10.14	10.10.14	6.11.15
Переход к положительным	2.05.15	1.05.16	6.05.15	30.03.15	26.04.16
Установка снежного покрова	–	–	–	12.11.14	6.11.15
Сход снежного покрова	–	–	–	10.05.15	2.05.16
Продолжительность периода, дней					
С отрицательными среднесуточными	112	95	182	160	151
С положительными среднесуточными	150	167	80	102	111
Количество дней					
Со среднесуточной T 5–10°С	33	48	25	33	39
Со среднесуточной T > 10°С	11	18	1	12	14

ру почвы под вороникой в 2014/2015 гг. Благодаря теплоизоляционным свойствам снежного покрова минимальная среднесуточная температура в почвах на обоих участках оказалась значительно менее низкой по сравнению с воздухом. Минимальная среднесуточная температура в почве под вороникой при этом в 2014/2015 гг. была на 2°С выше по сравнению с пустошью.

Абсолютный максимум температуры почвы и в воздухе оба сезона был отмечен в самом конце мая. При этом в почве пустоши он был выше не только по сравнению с почвой под вороникой, но и по сравнению с воздухом.

Абсолютная минимальная температура в почве пустоши, наоборот, была ниже, по сравнению с почвой под вороникой, причем минимальные абсолютные температуры почвы на разных участках были отмечены в разное время: в почве пустоши в 2014/2015 гг. – –7.5°С осенью (утром 6 ноября), в 2015/2016 гг. – –3.4°С (12 ноября 2015 г.), когда мощность снега на метеостанции была менее 0.5 и 8 см соответственно. В почве под вороникой минимальная абсолютная температура (–3.9°С)

была отмечена в середине зимы (12–14 января 2015 г.), когда температура воздуха несколько предшествующих дней держалась около –30°С.

Диапазон варьирования температуры воздуха за период наблюдений оба сезона по данным метеостанции составил почти 60°С. Температура почвы за период исследований варьировала в более узком диапазоне по сравнению с воздухом. При этом в почве под вороникой в 2014/2015 гг. он был значительно уже (всего 17°С) по сравнению с пустошью (около 30°С).

Наблюдения 2014/2015 гг. также выявили значительные различия между участками по продолжительности периода с отрицательными среднесуточными температурами: в почве на пустоши он составил 112 дней, в почве под вороникой – 182 дня. Количество дней со среднесуточной температурой >+5 и >+10°С в почве пустоши было сопоставимо с воздухом в 2014/2015 гг. и существенно больше в 2015/2016 гг. (табл. 1). В почве под вороникой продолжительность этих периодов была значительно меньше. Соответственно, и суммы биологически активных температур за пе-

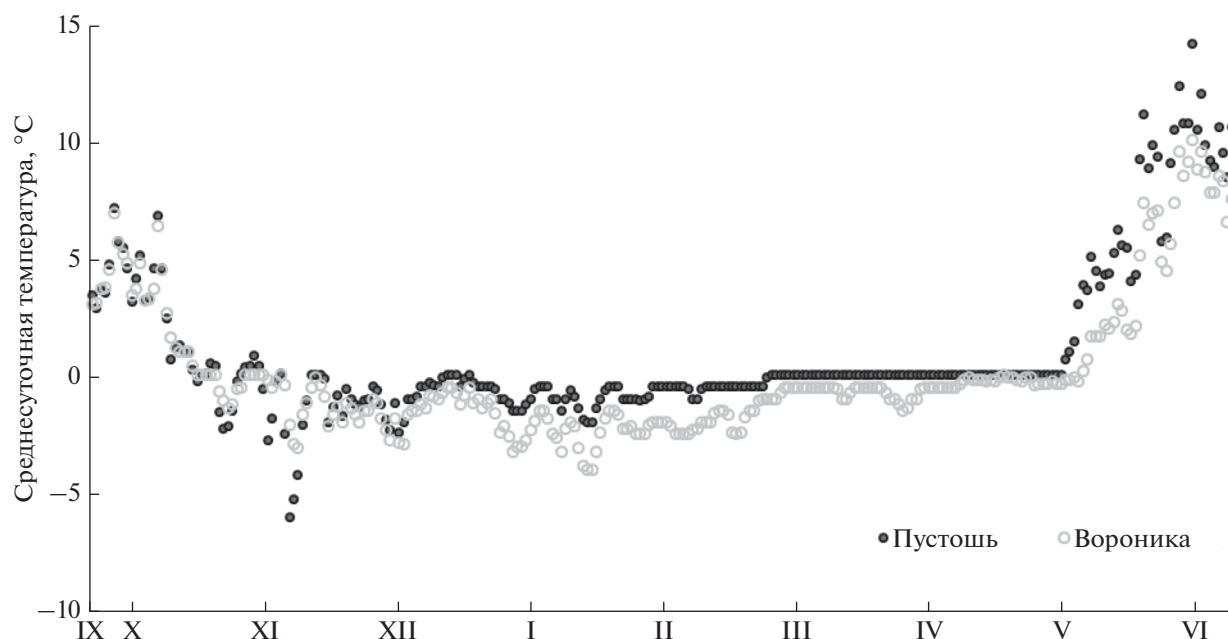


Рис. 1. Среднесуточная температура почвы на глубине 2 см на участке с полностью нарушенным напочвенным покровом (“пустошь”) и под разрастающейся куртиной вороники (“вороника”) с 22 сентября 2014 г. по 10 июня 2015 г.

риод исследований в почве на пустоши также были значительно выше по сравнению с почвой под вороникой.

Снежный покров оказывает значительное влияние на температуру почвы в зимний период. Согласно данным метеостанции, непостоянный снежный покров мощностью 0.5–5 см на территории присутствовал с 14 октября по 11 ноября 2014 г. и с 27 октября по 2 ноября 2015 г. Постоянный снежный покров оба сезона держался около 180 дней. Из них в 2014/2015 гг. 132 дня высота снежного покрова превышала 30 см и 93 дня – 40 см. Максимальной мощности – 58 см он достиг 1 апреля 2015 г. В 2015/2016 гг. 113 дней высота снега была более 30 см, 80 дней – 40 см, 59 дней – более 50 см. Максимальная высота – 69 см была обнаружена 28 февраля 2016 г.

Ход среднесуточных температур за период исследования. Соотношение среднесуточной температуры почвы между разными участками за период исследований не было постоянным и зависело от периода времени (рис. 1). В осенний период с 22 сентября до 12 ноября 2014 г. (до формирования постоянного снежного покрова по данным метеостанции) среднесуточная температура почвы под вороникой менее четко следовала за изменениями температуры воздуха по сравнению с почвой пустоши. В конце сентября благодаря солнечной активности почва пустоши днем прогревалась сильнее, но в вечерние и ночные часы остывала значительно. В результате различия среднесуточной температуры почвы между пусто-

шью и вороникой были незначительными – на $0.2 \pm 0.1^\circ\text{C}$ (здесь и далее: среднее \pm стандартное отклонение). При этом в 56% случаев температура была выше под пустошью, а в 44% – под вороникой.

В октябре–первой декаде ноября среднесуточная температура почвы пустоши также более четко следовала за ходом температуры воздуха ($r = 0.81$). При этом разница между воздухом и почвой пустоши сокращалась с каждым новым случаем резкого похолодания: 22 октября температура почвы на пустоши была на 9.6°C , 1 ноября – на 2.3°C , а 6 ноября только на 1.5°C выше по сравнению с воздухом. В эти первые три эпизода резкого похолодания, снижение температуры почвы под вороникой запаздывало на 1–2 дня, и было менее значительным по сравнению с почвой пустоши. Например, 6 ноября, когда среднесуточная температура почвы пустоши резко снизилась до минимальной среднесуточной за весь период наблюдений (-5.9°C), температура почвы под вороникой была почти на 4°C выше. В этот период среднесуточная температура почвы под пустошью в 57% случаев была выше, чем под вороникой на $0.3 \pm 0.2^\circ\text{C}$. В 44% случаев почва под вороникой была теплее, но ее преимущество было значительнее: на $0.9 \pm 1.0^\circ\text{C}$ (рис. 1).

Среднесуточная температура воздуха в период с 12 ноября 2014 г. (сформировался постоянный снежный покров) до 30 марта 2015 г. (переход температуры воздуха через 0°C) составила $-7.4 \pm 7.4^\circ\text{C}$. Благодаря термоизоляционным свойствам снежного покрова среднесуточная темпе-

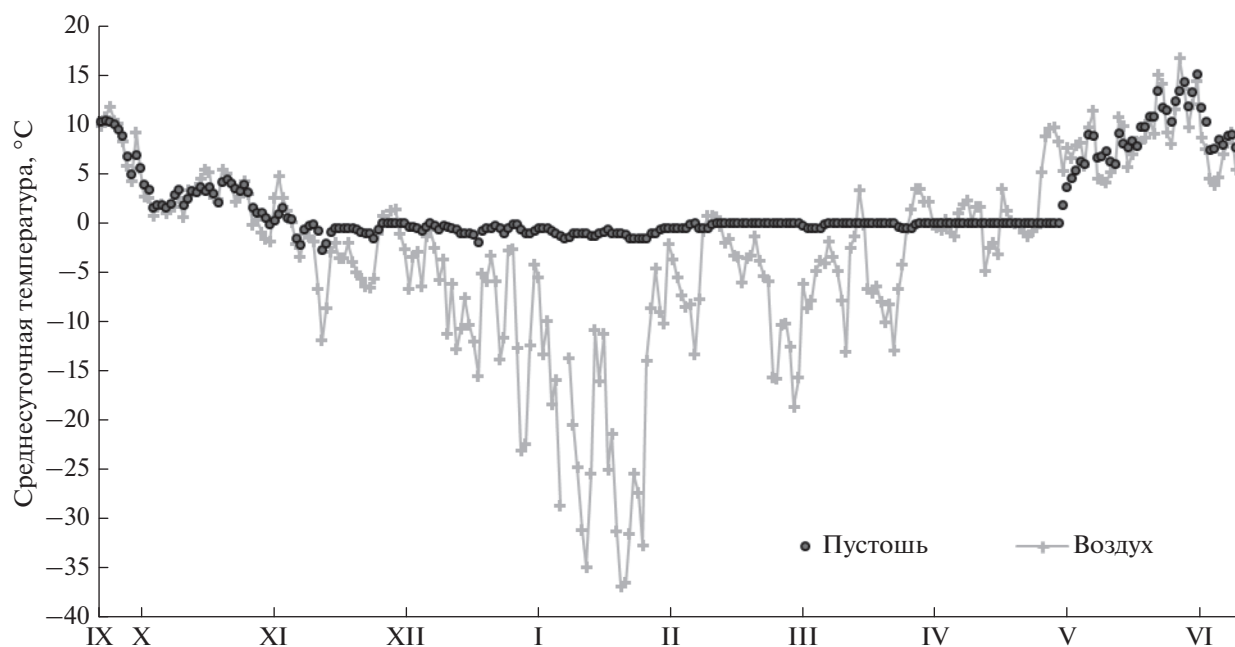


Рис. 2. Среднесуточная температура почвы на глубине 2 см на участке с полностью нарушенным напочвенным покровом (“пустошь”) и атмосферного воздуха (данные метеостанции “Мончегорск”, www.gr5.ru) с 22 сентября 2015 г. по 10 июня 2016 г.

ратура почвы зимой и ее варьирование на обоих участках было значительно ниже: $-0.5 \pm 0.6^\circ\text{C}$ — для пустоши и $-1.5 \pm 0.9^\circ\text{C}$ — для вороники.

В почве пустоши варьирование среднесуточной температуры постепенно уменьшалось по мере увеличения мощности снега. Начиная с 24 февраля 2015 г., когда мощность снега по данным метеостанции достигла 50 см, и до 1 мая среднесуточная температура почвы пустоши устойчиво держалась на $+0.1^\circ\text{C}$. В отличие от весенне-летнего и осеннего периодов, среднесуточная температура почвы под воронкой в зимний период была устойчиво ниже, чем в пустоши и она продолжала, хотя и слабо реагировать на резкие снижения температуры воздуха в течение всего зимнего периода. Именно на зимний период (13–14 января 2015 г.) пришлось минимальная среднесуточная температура -3.9°C в почве под воронкой, когда температура воздуха несколько дней держалась ниже -30°C .

Причиной различий хода среднесуточных температур почвы между участками в зимний период может быть пространственное варьирование на площадке мощности и плотности снега, которые оказывают значительное влияние на теплопроводность снега и интенсивность воздухообмена почвы с атмосферой [9]. То есть в данном случае над куртиной вороники мощность снега (возможно из-за приподнятости поверхности над пустошью) или плотность (из-за шероховатости поверхности) снега были меньше по сравнению с пустошью.

Из-за значительного многолетнего и пространственного варьирования мощности и плотности снежного покрова (см. выше) можно допустить возможность более сильного промерзания почвы на всей площадке в малоснежные годы.

С 1 марта до начала мая снежный покров продолжал предохранять почву от резкого падения температуры. Устойчивый переход через ноль в сторону положительных температур для воздуха был отмечен 30 марта 2015 г. В почве это событие было отмечено значительно позже: 2 и 6 мая, для пустоши и под воронкой, соответственно, когда мощность снега на метеостанции составляла уже менее 30 см. В отличие от осеннего периода, в весенне-летний период с 6 мая по 10 июня среднесуточная температура почвы под воронкой была устойчиво ниже (на $2.5 \pm 0.9^\circ\text{C}$) по сравнению с почвой пустоши. Различия по температуре почвы между двумя участками были значимы согласно *U*-критерию Манна-Уитни при $p < 0.01$. Распределение среднесуточной температуры в почвах обоих участков достоверно при $p < 0.01$ коррелировало с температурой воздуха: $r = 0.83$ и 0.80 для пустоши и вороники, соответственно. Относительно воздуха температура почвы пустоши была в 47% случаев на $2 \pm 0.9^\circ\text{C}$ выше; почва под воронкой была ниже в 75% случаев на $3.1 \pm 1.7^\circ\text{C}$.

Наблюдения за температурой почвы пустоши в 2015/2016 гг. (табл. 1, рис. 2) также показали, что среднесуточная температура в бесснежный период достоверно коррелировала с температурой воздуха: $r = 0.93$ для осени (22 сентября–6 ноября) и

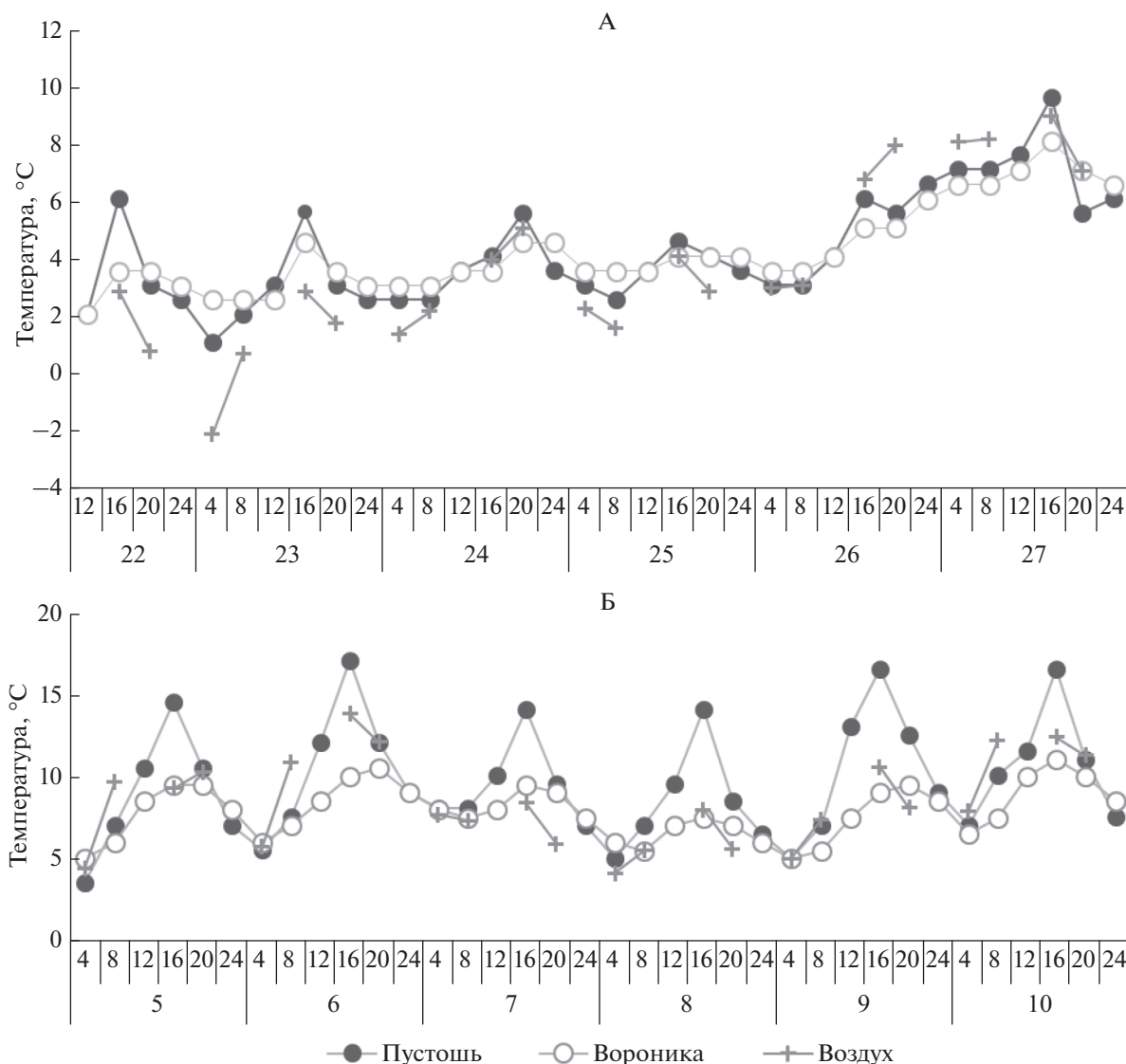


Рис. 3. Суточный ход температуры почвы пустоши и под вороникой и температуры атмосферного воздуха (данные метеостанции «Мончегорск», www.rp5.ru): А – с 22 по 27 сентября 2014 г.; Б – с 5 по 10 июня 2015 г.

0.78 для весенне-летнего периода (2 мая–10 июня). При этом в 68% случаев почва пустоши была теплее воздуха на $1.8 \pm 1.0^\circ\text{C}$, в 32% – на такую же величину – ниже. Из-за более теплой погоды температура почвы пустоши осенью не опустилась ниже 0°C в бесснежный период. А снежный покров мощностью 8 см значительно смягчил резкое снижение температуры воздуха 12 ноября до -11.9°C , поэтому минимальная среднесуточная температура почвы пустоши в этот сезон была выше, чем в сезон 2014/2015 гг. и составила всего -2.7°C .

Под снегом почва пустоши зимой 2015/2016 гг. продолжала с отставанием на один день слабо реагировать на резкие изменения температуры воздуха. Например, при снижении температуры воз-

духа до -23°C 28 декабря при мощности снега 33 см температура почвы снизилась только до -0.9°C 29 декабря; при температуре ниже -36°C 20 и 21 января и мощности снега 42 см температура почвы с 22 по 26 января была -1.2°C . И с 11 февраля, когда мощность снега достигла 50 см, и до конца апреля температура почвы устойчиво держалась на 0.1°C .

Суточный ход температуры. В сезон 2014/2015 гг. варьирование температуры почвы в течение суток отчетливо проявилось в начале осени до 10 октября (переход через 0°C воздуха) и возобновилось 2 мая в почве пустоши и 6 мая в почве под вороникой (рис. 3, А, 3, Б). Оно обусловлено, главным образом, суточным ходом солнечной активности, снижаясь и повышаясь вслед за высотой солнцестоя-

ния и продолжительностью дня. С 10 октября (переход температуры воздуха через 0°C) до 12 ноября (установился постоянный снежный покров) для пустоши и до конца зимы для почвы под вороникой изменение температуры в течение суток определялось температурой воздуха и редко имело определенную приуроченность к определенному времени суток. Суточный ход температуры почвы на каждом из обследованных участков имел свои специфические особенности и зависел от времени года и погодных условий. Например, от наличия облачности: в солнечные дни почва лучше прогревается днем и сильнее охлаждается ночью, обуславливая более высокое варьирование температуры в течение суток.

В почве пустоши максимальная температура и осенью (22 сентября–10 октября) и в весенне-летний (7 мая–10 июня) период в наших исследованиях чаще всего (в 74% случаев осень и 94% – весна-лето) приходилась на 16 ч. Более детальные исследования в ненарушенной экосистеме [10] показали, что максимум температуры поверхности почвы приходится на 13–15 ч, на глубине 5–10 см максимум запаздывает на 2–3 ч. То есть в наших исследованиях в 16 ч фиксировалась близкая к максимуму суточная температура.

В почве под вороникой суточный температурный максимум только в 76% случаев приходился на то же время и в 24% случаев сдвигался на срок позже. Для нее также характерна небольшая разница температуры между 16 и 20 ч.

В *осенний период* наиболее высокие различия по максимальной суточной температуре почвы между участками – 2.4°C были обнаружены в самом начале исследований – 22 сентября. Затем различия между участками по максимальным дневным температурам почв постепенно снижались, достигая значений, не превышающих 0.5°C к 20 октября.

Начиная с 8 мая, когда почва на обоих участках начала интенсивно прогреваться в дневное время, температура почвы на пустоши в 16 ч была от +1 (24 мая высокая облачность и южный ветер весь предшествующий день) до +10.1°C (31 мая – ночью дул северный ветер, днем было ясно и по дул теплый ветер с ВЮВ) выше по сравнению с почвой под вороникой. Различия по температуре почвы между участками в утренние и вечерние часы были значительно ниже.

Минимальная суточная температура почвы на обоих участках, как и в ненарушенных экосистемах [10] в весенне-летний период более четко приходилась на ночные часы – 24 и 4 ч. При этом с 8 по 24 мая минимальная суточная температура почвы под вороникой была на 0.5–2°C ниже по сравнению с почвой пустоши. Возможно, это обусловлено более интенсивным и глубоким про-

мерзанием почвы под вороникой в зимний период (рис. 1). В период с 24 мая по 11 июня почва пустоши ночью была, как правило, от 0.5 до 1.5°C холоднее почвы под вороникой.

Сравнение суточного хода температур почвы с другими метеорологическими данными показало, что почва под вороникой лучше удерживает тепло ночью в малооблачную погоду и/или когда дует северный ветер. Например, 5 июня в отсутствии облаков и при северном направлении ветра температура в почве пустоши ночью снизилась на 10°C (с 13.7 до 3.6°C). За это же время температура почвы под вороникой снизилась всего на 2°C: с 7.1 до 5.1°C. То есть в начале вегетационного периода присутствие даже угнетенного напочвенного покрова, разрастающегося по свежему опад листьев березы, предохраняет почву от резкого снижения температуры ночью в наиболее неблагоприятные по погодным условиям дни.

Если положение максимальной суточной температуры в почве пустоши в период с 22 сентября по 10 октября (переход через 0°C воздуха), как и в весенне-летний период, довольно четко приходится на 16 ч, то положение минимальной температуры осенью менее определено. Суточный минимум в почве на обоих участках в осенний период может приходиться, как на ночное, так и на вечернее или утреннее время. При этом различия между вечерними, ночными и утренними часами по температуре почвы на обоих участках сглаживались.

В отличие от весенне-летнего периода, минимальная суточная температура почвы под вороникой в период с 22 сентября по 10 октября была на $0.6 \pm 0.6^\circ\text{C}$ выше по сравнению с почвой на пустоши. Наиболее существенное превышение минимальной суточной температуры почвы под вороникой по сравнению с пустошью отмечалось при резком снижении температуры воздуха до отрицательной температуры. При этом почва на обоих участках в этот период удерживают температуру в области положительных значений, и почва под растительностью с наличием свежего опада делает это более эффективно.

С 10 октября (дата перехода среднесуточных температур воздуха через 0°C) и до 21 октября (дата перехода среднесуточной температуры почв через 0°C) почва под вороникой все сроки наблюдений оставалась в положительной области (+0.1°C), тогда как в почве пустоши в ночные часы температура один день – 16 октября вслед за резким снижением температуры воздуха до –6.5°C впервые снизилась до –1°C.

Поздней осенью с 21 октября по 12 ноября до установления постоянного снежного покрова почва под вороникой также более успешно поддерживала ночную температуру и смягчала первые ночные заморозки в отличие от почвы пусто-

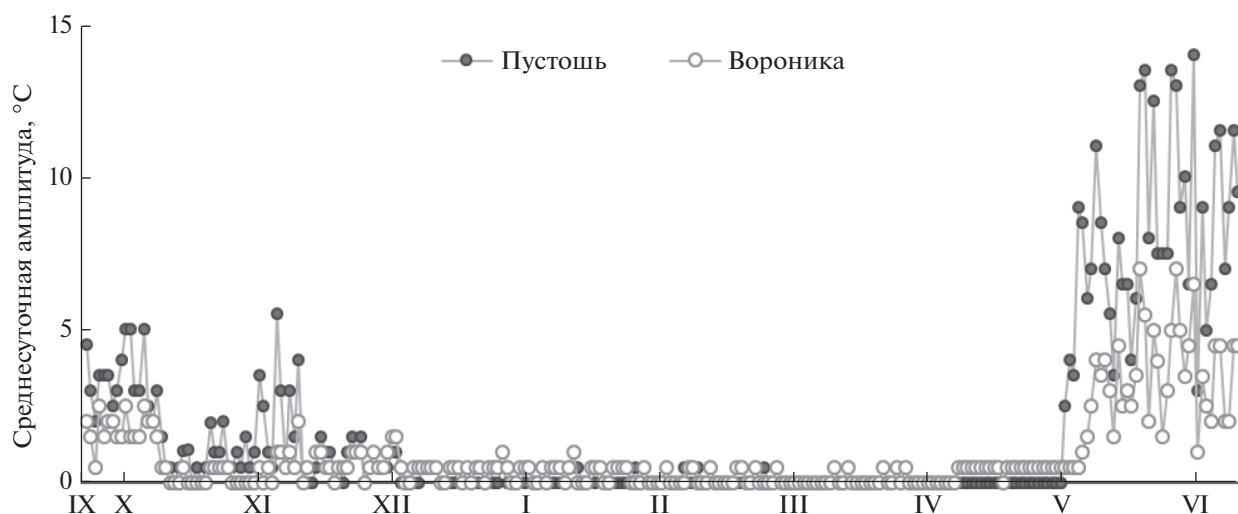


Рис. 4. Суточная амплитуда температуры почвы пустыши и под вороникой с 22 сентября 2014 г. по 11 июня 2015 г.

ши. Например, 6 ноября при падении температуры воздуха ночью до -11.4°C , температура почвы под вороникой была на 5.6°C выше по сравнению с пустышью: -1.4 и -7.0°C соответственно.

Суточные амплитуды колебаний температуры характеризуют способность почв поддерживать температурный гомеостаз в течение суток. С 22 сентября по 20 октября 2014 г. и с начала мая (2 мая для пустыши и 6 мая 2015 г. для почвы под вороникой) в течение суток температура почв находилась в области положительных температур. Суточная амплитуда температуры в почве пустыши в эти периоды была всегда выше, чем в почве под вороникой (рис. 4). Согласно *U*-критерию Манна-Уитни, амплитуда температуры почвы пустыши в эти периоды была значимо выше, чем в почве под вороникой. При этом величины суточной амплитуды достоверно ($p \leq 0.01$) коррелировали между двумя участками: с 22 сентября по 20 октября $r = 0.88$ ($n = 28$); с 6 мая по 10 июля $r = 0.81$ ($n = 35$).

В период с 22 сентября по 20 октября суточная амплитуда в почве на пустыше варьировала от 0 до 5°C , в почве под вороникой — от 0 до 2.5°C . Наиболее высокие амплитуды приходились на малооблачные дни с резкой сменой направления ветра в течение суток (2, 3 и 6 октября). Минимальное варьирование -0°C — в облачные дни с устойчивым южным ветром (13, 17 и 19 октября).

В весенний период в почве пустыши суточное варьирование возобновилось со 2 мая, в почве под вороникой 6 мая. При этом почва на обоих участках очень резко увеличивала суточную амплитуду, и к 9 мая в почве под пустышью она достигла 11°C , а в почве под вороникой — 4°C . Максимальная амплитуда суточной температуры в наших исследованиях пришлось на конец мая: и достигла 14°C в

почве пустыши (19, 20, 22, 26 и 31 мая), и 7°C под вороникой (19 и 27 мая). Наибольшую суточную амплитуду температуры в это время обеспечивает меньшая облачность в дневное время и смена направлений ветра в течение суток.

Очень важным для экосистемы является способность почв поддерживать температурный гомеостаз и смягчать ночные заморозки осенью в период между переходом среднесуточных температур почвы через 0°C (21 октября 2014 г.) и формированием постоянного снежного покрова (12 ноября). В этот период было отмечено несколько эпизодов (21–23 октября, 31 октября–1 ноября и 5–8 ноября), когда температура почвы пустыши в ночной период резко опустилась вслед за температурой воздуха. Наиболее высокие амплитуды температуры были отмечены 5–6 ноября: с 0.1°C в 4 утра 5 ноября температура почвы пустыши упала до -7.5°C (абсолютный минимум за период наблюдений) к 8 ч утра 6 ноября. За это время температура почвы под вороникой снизилась только с $+0.1$ до -1.9°C .

Метеоданные за 2005–2019 гг. Наиболее опасными явлениями для растений являются заморозки в отсутствие снежного покрова, когда его воздействию одновременно подвергается, и надземная часть растений, и корни. Для оценки частоты встречаемости заморозков в отсутствие снежного покрова на обследуемой территории в настоящее время был проведен анализ данных метеостанции Мончегорск (gr5.ru) за 2005–2019 гг. Продолжительность бесснежного периода за эти годы варьировала от 146 (2017 г.) до 200 (2011 г.) дней (среднее — 148 дней). Продолжительность периода без заморозков была от 0 (2019 г.) до 53 (2018 г.) дней (среднее — 27 дней) короче.

Интенсивность осенних заморозков, включая дни с мощностью снега 1 см и менее, варьировала от 0.1 до 11.4°C. Распределение заморозков осенью по интенсивности было следующим: ниже -5.0°C – 12%, от -4 до -5°C – 8%, от -3 до -4°C – 12%, от -2 до -3°C – 16%, от -1 до -2°C – 20% и от -0.1 до -1°C – 32% случаев. Самый ранний осенний заморозок был отмечен 26 сентября 2012 г. Наиболее часто заморозки осенью случались в конце октября–начале ноября. Продолжительность заморозков осенью также значительно варьировала: от одного срока наблюдений (то есть ночного) до 22 дней (с 11 октября по 8 ноября 2009 г.).

Весенние заморозки в бесснежный период случались не каждый год. Их не было в 2005, 2015, 2018 и 2019 гг. Весенние заморозки могли особенно негативно сказаться на состоянии растений в 2007, 2010, 2012 и 2016 гг., поскольку им в эти годы предшествовал теплый период и растения уже начали расти. В остальные годы заморозки наступали сразу после схода снега и только задерживали начало вегетации. Весенние заморозки не были продолжительными и наблюдались только в ночное время. Их интенсивность также была низкой: в 46% случаев они были ниже -1°C.

Таким образом, метеоданные за 2005–2019 гг. показали, что угнетенные растения на сильно загрязненной и нарушенной площадке, кроме экстремального загрязнения подвергаются воздействию таких природных стресс-факторов, как периодические весенние и регулярные многочисленные осенние заморозки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рекогносцировочные исследования в течение 263 дней (с 22 сентября по 11 июля) 2014, 2015 и 2016 гг. в экстремально загрязненной и нарушенной экосистеме около медно-никелевого предприятия показали, что горизонт О подзола, состоящий из свежего опада листьев березы под разрастающимся небольшим кустом вороники, значительно отличался по всем температурным показателям от гор. О техногенной пустоши без напочвенного покрова.

Почва под единичной угнетенной куртиной вороники значительно эффективнее предохраняла почву от резких колебаний температуры: разница между абсолютным минимумом и абсолютным максимумом за период исследований составила всего 17°C, а максимальная суточная амплитуда – 7°C. В то же время почва пустоши, где на поверхности находится темноокрашенный горизонт О эродированного подзола, характеризовалась значительно более высокими амплитудами температур: около 30°C за весь период исследования и 14°C максимальная суточная.

Соотношение всех определенных температурных показателей почвы между обследованными участками за период исследований не было постоянным и зависело от периода времени. В *весенне-летний период*, в зависимости от погодных условий (облачность, устойчивость направления ветра) максимальная дневная температура почвы пустоши была от 1 до 10°C, а среднесуточная от 0.9 до 4.1°C выше, чем в почве под вороникой. Значительно более высокая дневная и среднесуточная температура в почве пустоши, преобладающей в структуре экосистемы, могут значительно усилить расход влаги на испарение и способствовать еще большему сдвигу водного режима всей экосистемы в сторону иссушения в летний период. Как показали дополнительные исследования, влажность разрушающегося гор. О пустоши, действительно, значимо, согласно *U*-критерия Манна-Уитни, ниже по сравнению с гор. О под вороникой.

В *осенний период*, несмотря на лучший прогрев в летний период, почва пустоши без напочвенного покрова обладает меньшим запасом тепла и быстрее начинает остывать, опускаясь до отрицательной температуры вслед за резкими снижениями температуры воздуха сначала в ночные часы, а затем и в течение суток. Абсолютный температурный минимум (-7.5°C) и минимальная среднесуточная температура (-5.9°C) в почве пустоши пришлось именно на осенний период до формирования постоянного снежного покрова на территории. Одновременные резкие снижения температуры, и воздуха, и почвы на большей части территории экосистемы осенью могут быть губительными для ослабленных сеянцев березы. Периодическое промерзание и оттаивание почвы в этот период может быть причиной и морозного пучения с выталкиванием материала нижнего минерального горизонта ВF и проводящих корней деревьев на поверхность.

Почва под вороникой обладала большим запасом тепла и дольше удерживала температуру почвы в положительной области осенью и значительно смягчала первые ночные заморозки. Дополнительным к солнечной энергии источником тепла здесь могут быть интенсивно протекающие в начале осени процессы разложения скапливающегося здесь опада березы.

В *зимний и ранневесенний период* снежный покров хорошо защищал почву на обоих участках от интенсивного промерзания. Вместе с тем, почва под вороникой продолжала реагировать на наиболее резкие снижения температуры воздуха в течение всего зимнего периода. Поэтому абсолютный минимум и минимальная среднесуточная температура (-3.9°C) в почве под вороникой были обнаружены 11 января 2015 г., когда температура воздуха несколько дней держалась ниже -30°C.

Вероятно, на этом участке экосистемы имел место более интенсивный воздухообмен между почвой и воздухом вследствие меньшей высоты и/или плотности снега. Зависимость интенсивности теплообмена с воздухом [9] от высоты и плотности снега означает, что на отдельных участках этой площадки, особенно в малоснежные зимы, почва может промерзнуть сильнее, также вызывая морозное пучение и выталкивание проводящих корней растений на поверхность, и последующую гибель дерева.

Таким образом, рекогносцировочные исследования показали, что такие изменения микроклимата, как дополнительное иссушение летом и одновременное резкое снижение температуры, и почвы, и воздуха осенью только из-за отсутствия напочвенного покрова на большей части территории могут быть дополнительным к экстремальному загрязнению и суровым климатическим условиям [10, 14] стресс-факторами для выживших растений и ослабленных сеянцев березы в техногенно нарушенной экосистеме около медно-никелевого предприятия. Они, вместе с экстремальным загрязнением, препятствуют реализации, имеющегося даже в этой сильно нарушенной экосистеме, потенциала к самовосстановлению древесного яруса.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках темы НИР “Современная трансформация почв Крайнего Севера в условиях техногенного воздействия”, ГЗ № 0229-2016-0003.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Рис. S1. Фото сеянца березы (А), морозное пучение грунта с выходом на поверхность иллювиального ВГ горизонта (В) и выталкивание проводящих корней березы из почвы (С) на площадке мониторинга П-1 (8 км на север от комбината “Североникель”).

Рис. S2. Схема расположения площадки П-1, метеостанции Мончегорск и медно-никелевого комбината “Североникель” (А). Общий вид (В) площадки П-1 (8 км на север от комбината “Североникель”).

Рис. S3. Фото места установки температурных регистраторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Димо В.Н. Теплового режим почв СССР. М.: Колос, 1972. 360 с.
2. Дымов А.А., Старцев В.В. Изменение температурно-режима подзолистых почв в процессе естественного лесовозобновления после сплошнолесосечных рубок // Почвоведение. 2016. № 5. С. 599–608.
3. Кашулина Г.М. Аэротехногенная трансформация почв европейского субарктического региона. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. Ч. 1. 158 с. Ч. 2. 234 с.
4. Кашулина Г.М. Мониторинг загрязнения почв тяжелыми металлами в окрестностях медно-никелевого предприятия на Кольском полуострове // Почвоведение. 2018. № 4. С. 493–505.
5. Кашулина Г.М., Кубрак А.Н., Баскова Л.А., Коробейникова Н.М. Влияние длительного экстремального загрязнения выбросами комбината “Североникель” на содержание доступных для растений Р, К, Са и Mg в подзолах // Вестник МГТУ. 2016. Т. 19. № 1/2. С. 184–193.
6. Кашулина Г.М., Переверзев В.Н., Литвинова Т.И. Трансформация органического вещества почв в условиях экстремального загрязнения выбросами комбината “Североникель” // Почвоведение. 2010. № 10. С. 1265–1275.
7. Копчик Г.Н., Копчик С.В., Смирнова И.Е., Кудрявцева А.Д., Турбабина К.А. Реакция лесных экосистем на сокращение атмосферных промышленных выбросов в Кольской Субарктике // Журн. общей биологии. 2016. Т. 77. № 2. С. 147–165.
8. Крапивин В.Ф., Потапов И.И. Лесной пожар и радиационный баланс бореального леса // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2010. № 5. С. 77–82.
9. Осокин Н.И., Сосновский А.В., Чернов Р.А. Влияние стратиграфии снежного покрова на его термическое сопротивление // Лед и снег. 2013. № 3(123). С. 63–70.
10. Семко А.П. Гидротермический режим почв лесной зоны Кольского полуострова. Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 1982. 142 с.
11. Сухарева Т.А., Лукина Н.В. Минеральный состав ассимилирующих органов хвойных деревьев после снижения уровня атмосферного загрязнения на Кольском полуострове // Экология. 2014. № 2. С. 97–104.
12. Тишков А.А., Осокин Н.И., Сосновский А.В. Влияние синузид мохообразных на деятельный слой арктических почв // Известия РАН. Сер. географическая. 2013. № 3. С. 39–46.
13. Черненко Т.В., Кабилов Р.Р., Басова Е.В. Восстановительные сукцессии северотаежных ельников при снижении аэротехногенной нагрузки // Лесоведение. 2011. № 6. С. 49–66.
14. Яковлев Б.А. Климат Мурманской области. Мурманск, 1961. 180 с.
15. Aamlid D., Venn K. Methods of monitoring the effect of air pollution on forest and vegetation of eastern Finland, Norway // Norwegian J. Agricultural Science. 1993. V. 7. P. 71–87.
16. Alexeyev V.A. Impacts of air pollution on far north forest vegetation // The Science of the Total Environment. 1995. V. 160/161. P. 605–617.
17. AMAP Assessment report 2006: Acidifying pollutants, Arctic Haze and Acidification in the Arctic. Arctic Mon-

- itoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, 2006. 111 p.
18. *Kashulina G., Reimann C., Finne T.E., Halleraker J.H., Ayras M., Chekushin V.* The state of the ecosystems in the Central Barents Region: scale, factors and mechanism of disturbance // *The Science of the Total Environment*. 1997. V. 206. P. 203–225.
 19. *Kashulina G., Caritat P. de, Reimann C.* Snow and rain chemistry around the “Severonikel” industrial complex, NW Russia: Current status and retrospective analysis // *Atmospheric Environment*. 2014. V. 89. P. 672–682.
 20. *Kozlov M.V.* Changes in wind regime around a nickel-copper smelter at Monchegorsk, Northwestern Russia // *International J. Biometeorology*. 2002. V. 46. P. 76–80.
 21. *Manion P.D.* Tree disease concepts. Prentice Hall, New Jersey, 1991. 402 p.
 22. *Reimann C., Kashulina G., Caritat P. de, Niskavaara H.* Multi-element, multi-medium regional geochemistry in the European Arctic: element concentration, variation and correlation // *Applied Geochemistry*. 2001. V. 16. P. 759–780.
 23. *Reimann C., Koller F., Kashulina G., Niskavaara H., Englmaier P.* Influence of extreme pollution on the inorganic chemical composition of some plants // *Environmental Pollution*. 2001. V. 115. P. 239–252.
 24. *Salminen R., Chekushin V., Tenhola M. et al.* Geochemical atlas of eastern Barents region // *J. Geochemical Exploration*. 2004. V. 83. № 1–3. 530 p.

Comparative Analysis of Soil Temperature on Two Degraded Sites of the Technogenic Ecosystem of Nickel Industrial Complex (Kola Peninsula)

G. Kashulina^{1,*}, T. Litvinova¹, and N. Korobeinikova¹

¹*Polar-Alpine Botanical Garden-Institute of the KSC RAS, Apatity, Russia*

**e-mail: galina.kashulina@gmail.com*

Soil temperature was measured during 263 days in the damaged ecosystem, located 8 km north of the “Severonikel” industrial complex – the largest source of SO₂ and heavy metals in Northern Europe. The aim of the study was to compare the temperature regimes of the soil at a site with depressed crowberry cover with that at a site, where ground vegetation was completely destroyed by pollution – technogenic barren. Results of measurements demonstrated that, despite the depressed state of the crowberry, ground vegetation cover continues to perform its functions – protects soil from strong temperature fluctuations. In contrast, complete ground vegetation disturbance results in a significant increase in temperature amplitude of the upper layer of soil, diurnal and mean daily temperatures during summer. This can essentially increase the moisture evaporation and shift water regime of the damaged ecosystem toward dryness. In autumn, prior to the stable snow cover formation, the barren soil, on the contrary, froze more strongly after the sharp decrease in the air temperature. Thus, both extra-drying in summer and freezing during autumn can be an additional stress to extreme pollution stress-factors for survived trees and birch seedlings in the damaged ecosystem near emission source.

Keywords: soil temperature, Eroded Albic Podzol, ground vegetation, technogenic barren, copper-nickel industry