

УДК 502.52:502.057:551.584:581.5 (571.53/55)

DOI: 10.15372/GIPR20220214

Н.Н. ВОРОПАЙ*, **, Ж.В. АТУТОВА, Е.С. ШУКЛИНА*, ******Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
634055, Томск, пр. Академический, 10/3, Россия, voropay_nn@mail.ru, ekaterinakot99@gmail.com**Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, Россия, voropay_nn@mail.ru, atutova@mail.ru***Томский государственный университет,
634050, Томск, пр. Ленина, 36, Россия, ekaterinakot99@gmail.com**МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВЫ
ПИРОГЕННО ТРАНСФОРМИРОВАННЫХ ГЕОСИСТЕМ ТУНКИНСКОЙ КОТЛОВИНЫ
(ЮГО-ЗАПАДНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ)**

С целью выявления особенностей динамики температурного режима почв при послепожарном восстановлении подтаежных светлохвойных геосистем Тункинской котловины рассмотрены процессы демутации в сосновых лесах урочища Бадары после прошедших в 2010 г. пожаров. В ходе мониторинговых наблюдений 2011–2020 гг. на участке горелого леса рассмотрена специфика восстановления древесного подроста, а также кустарникового яруса и живого напочвенного покрова. Отмечен период появления первых всходов подроста и подлеска, установлено проективное покрытие видов всех лесорастительных ярусов. При сравнении доминирующего состава биоценозов вторичных сукцессий с естественными растительными сообществами выявлены индикаторы перспективности успешного лесовосстановления. На выбранных площадках проведен анализ 10-летних данных наблюдения за температурным режимом почв от поверхности до глубины 3,2 м. Измерения проводились круглогодично в автоматическом режиме с помощью атмосферно-почвенных измерительных комплексов. В результате анализа полученных данных выявлены разности между температурами почвы на нарушенном и естественном участках. Открытые почвы на площадке, подвергшейся пожару, больше прогреваются в летнее время и больше промерзают в зимнее. Снежный покров, выступая в роли теплоизолятора на обеих площадках, уменьшает различия, однако при позднем его установлении контрасты увеличиваются. За период наблюдения отмечено уменьшение микроклиматических разностей по мере восстановления растительного покрова, что указывает на восстановление температурного режима на пирогенно-нарушенном участке. Полученные результаты применимы при анализе пирогенной трансформации подтаежных светлохвойных геосистем юга Восточной Сибири и прогнозе послепожарного восстановления светлохвойных лесов Тункинской котловины с учетом региональной специфики. Продолжение комплексного мониторинга позволит более детально оценить восстановление ландшафтно-климатических условий территории.

Ключевые слова: гарь, естественное восстановление, лесной пожар, микроклимат, мониторинг, сосновые леса, температурный режим почв.

N.N. VOROPAI*, **, Zh.V. ATUTOVA, E.S. SHUKLINA*, ******Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, 634055, Tomsk, pr. Akademicheskii, 10/3, Russia,
voropay_nn@mail.ru, ekaterinakot99@gmail.com**V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 1, Russia, voropay_nn@mail.ru, atutova@mail.ru

***Tomsk State University, 634050, Tomsk, pr. Lenina, 36, Russia, ekaterinakot99@gmail.com

**LONG-TERM SOIL TEMPERATURE DYNAMICS
IN PYROGENICALLY TRANSFORMED GEOSYSTEMS OF THE TUNKA DEPRESSION
(SOUTHWESTERN CISBAIKALIA)**

In order to identify the features in the dynamics of the soil temperature regime during the post-fire reforestation of the subtaiga light-coniferous geosystems of the Tunka depression, a study was made of the demutation processes in the pine forests of the Badary urochishche the fires that occurred in 2010. As part of monitoring observations in 2011–2020, the specificity of

rehabilitation of understory trees as well as of the shrub layer and live ground cover was determined. The period of appearance of the first shoots of undergrowth was noted; the projective cover of species of all forest-growing layers was estimated. By comparing the dominant composition of secondary succession biocenoses with natural plant communities, indicators of the prospects for successful reforestation were identified. An analysis was made of 10-year-long observation data on the soil temperature regime from the surface to a depth of 3.2 m was carried out at the selected sites. Measurements were made all year round in an automatic mode using atmospheric-soil measuring systems. The differences between the soil temperatures on the disturbed and natural sites, which vary over a year, were revealed. Open soils on the site affected by fire are warmer in the summer and colder in the winter. Snow cover acting as a heat insulator on both sites reduces the differences. However, with late snow onset, the contrasts increase. During the observation period, a decrease in microclimatic differences was observed with the regeneration of vegetation cover, which indicates the reforestation of the temperature regime in the pyrogenically disturbed area. The results obtained at this stage, and also the continuation of the monitoring are applicable to the analysis of pyrogenic transformation of subtaiga light-coniferous geosystems in the south of Eastern Siberia and the forecast of post-fire reforestation of light-coniferous forests of the Tunka depression, taking into account regional specifics. The continuation of comprehensive monitoring will allow for a more detailed assessment of the regeneration of the landscape and climatic conditions of the territory in the future.

Keywords: burn, natural reforestation, forest fire, microclimate, monitoring, pine forests, soil temperature regime.

ВВЕДЕНИЕ

Для многих прикладных, а также теоретических задач, связанных с оценкой отклика земной поверхности на изменения климата, первостепенное значение имеет температура почв — важнейшая характеристика климатических, почвообразовательных, мерзлотных и инженерно-геологических условий. Значительное влияние на теплофизическое состояние почвы оказывают лесные пожары, во время которых происходит уничтожение растительного покрова и изменение свойств подстилающей поверхности (уменьшение мощности подстилки, увеличение плотности), повышающих ее теплопроводность. Уничтожение древостоя приводит к увеличению инсоляции, а изменение цвета поверхности после пожара — к снижению ее отражательной способности [1, 2].

Отмечено, что гари отличаются более контрастным температурным режимом на поверхности почвы [3–5] и на глубине 50–100 см [1, 2, 6, 7]. Происходящие после пожара изменения температурного режима нельзя оценить однозначно. С одной стороны, высокие дневные температуры поверхности (выше 50 °C) затрудняют естественное восстановление, с другой — интенсивный прогрев почвенной толщи способствует активизации многих процессов, протекающих в почве [1]. В зимний период значительный вклад в температурный режим почв вносит снежный покров, обладающий малой теплопроводностью и большой отражательной способностью. На безлесных территориях глубина промерзания почвы уменьшается с увеличением снежного покрова [3, 8]. Также здесь наблюдается наибольшая амплитуда годовых колебаний температуры как на поверхности, так и на глубинах [5, 9, 10]. В летнее время, даже спустя 2–3 года после пожара, максимальные температуры на поверхности могут превышать 55 °C [1], в то время как на контрольных участках они в 1,5–2 раза ниже. Такая же ситуация с минимальными температурами. Средняя годовая температура почвы в лесу на глубине 1 м на 1–2 °C ниже, чем на безлесном участке; в летний период почва под лесонасаждениями на глубине 20 см на 5–6 °C холоднее, чем на открытых территориях [11]. Большинство авторов отмечают, что различия температурного режима между фоновыми участками и постпирогенными территориями сохраняются более 15–20 лет. Однако в некоторых регионах температурные аномалии почвы не проявляются уже через 2–3 года после пожара [12, 13].

Оценивая актуальность исследования теплофизического состояния почвенного покрова как индикатора функционирования наземных биогеоценозов, коллективом сотрудников Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН (Иркутск) в 2007 г. организованы стационарные мониторинговые наблюдения за температурным режимом почвы в различных ландшафтных условиях Тункинской котловины, в том числе и в пределах пирогенно трансформированных геосистем урочища Бадары [14]. Распространенные здесь сосновые боры — природный эталон горно-котловинных светлехвойных лесов региона [15, 16]. Поэтому в решении задач их охраны и воспроизводства многолетний ряд температурных данных позволяет проследить динамику температурного режима почв в процессе послепожарного восстановления геосистем, установить на ее основе тенденции, указывающие на успешность процесса демутиации, а также повысить достоверность прогнозов восстановления уникальных ландшафтных комплексов.

Принимая во внимание вышесказанное, наше исследование нацелено на выявление особенностей динамики температуры почвы подтаежных светлехвойных геосистем в период их послепожарного возобновления на основе сравнительного анализа с территориями, не испытывающими пирогенного

влияния. Одной из приоритетных задач для достижения поставленной цели становится отслеживание динамики восстановления растительного покрова геосистем, подвергнутых пожарам, с последующим анализом влияния процесса демутиации на динамику температуры почвы.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Наиболее пирогенно трансформированной территорией Тункинской котловины (Юго-Западное Прибайкалье) является урочище Бадары. Это возвышающийся в виде пологого купола песчаный массив с высотами 780–855 м, находящийся в центральной части котловины. Его поверхность представлена грядами и ложбинами, образованными в ходе интенсивного воздействия эоловых процессов. Климат района резко континентальный. По данным метеостанции Тунка, в центральной части котловины средняя месячная температура воздуха в январе составляет $-24,2^{\circ}\text{C}$, в июле — $18,7^{\circ}\text{C}$; средняя годовая равна $-3,2^{\circ}\text{C}$ [17]. Абсолютный минимум температуры воздуха достигает $-40,1^{\circ}\text{C}$, максимум — $32,6^{\circ}\text{C}$. За год выпадает 300–350 мм осадков [18]. Преобладают ветры западных и северных румбов, что соответствует широтному простиранию самой котловины и ориентации спускающихся к ней с севера глубоко врезанных долин рек, берущих начало со склонов Тункинских Гольцов.

Ландшафтообразующими единицами данной территории выступают подгорные подтаежные сосновые геомы [19]. Однако в современной ландшафтной структуре вследствие периодически повторяющихся лесных пожаров отсутствуют произраставшие здесь ранее естественные сосновые боры. Наиболее крупные возгорания здесь были в 1996, 2001, 2003, 2010, 2015 и 2016 гг.; масштаб трансформации порой достигал 32 % от площади урочища [20, 21]. В результате этого современная ландшафтная структура урочища характеризуется мозаичностью контуров производных лесов, находящихся на различных стадиях лесовосстановления, процесс которого нередко осложняется повторно проходящими пожарами.

Для определения особенностей протекания процессов постпирогенных восстановительных сукцессий исследования проводились на двух ключевых участках, различающихся экологическими условиями функционирования ландшафтных комплексов [22]. Расположение участков показано на рис. 1, а. Площадка А-26 — гарь со средней степенью огневого поражения. Расположена в восточной оконечности урочища Бадары на высоте 766 м над ур. моря. Пологий склон юго-восточной экспозиции — краевой участок прохождения пожара 2010 г., после которого на корню осталась значительная часть древостоя.

Площадка А-27 — участок, не затронутый недавними пожарами, его геоботаническую характеристику принимаем за эталон (фон), приближение к которому будет свидетельствовать о благоприятном течении процесса лесовосстановления на пирогенно трансформированных территориях. Фоновая площадка расположена в восточной оконечности урочища Бадары на высоте 786 м над ур. моря, в 3,3 км от площадки А-26, на пологом склоне восточной экспозиции. По «Классификации и диагностике почв России» (2004 г.) [23], почвенный покров сложен псаммоземом иллювиально-ожелезненным; включение древесного угля и небольшая толщина лесной подстилки (до 3 см) указывают на частоту повторяющихся здесь пожаров [24]. Растительность представлена сосновыми средневозрастными лесами (45–50 лет, некоторые экземпляры имеют возраст 80 лет) с подлеском из рододендрона даурского (*Rhododendron dauricum*) и зеленомошно-травяно-кустарничковым напочвенным покровом. Это производные леса, восстанавливаемые после прошедших здесь около полувека назад лесных пожаров.

Исследования охватывают 10-летний период наблюдений за восстановлением растительного покрова и за его влиянием на динамику температуры почвы. Геоботанические данные отражают особенности древостоя и подроста (формула насаждений в каждом ярусе, обилие по Друде, средняя высота), а также специфику травяно-кустарничкового покрова (обилие по Друде, средняя высота и проективное покрытие). Анализировались основные закономерности состава и распределения растительного покрова на площадках, подверженных влиянию пирогенного фактора, и на территориях, долгое время не тронутых пожарами. В итоге был получен ряд совокупностей зарастания, характеризующий особенности постпирогенного восстановления геосистем в определенных ландшафтно-экологических условиях.

Для измерения температуры почвы был использован атмосферно-почвенный измерительный комплекс (АПИК), базовая комплектация которого позволяет проводить непрерывные долговременные автоматические измерения основных метеорологических параметров атмосферы и почвы с глубины 3,2 м (в некоторых моделях до нескольких десятков метров) до высоты 10 м [25]. В работе ис-

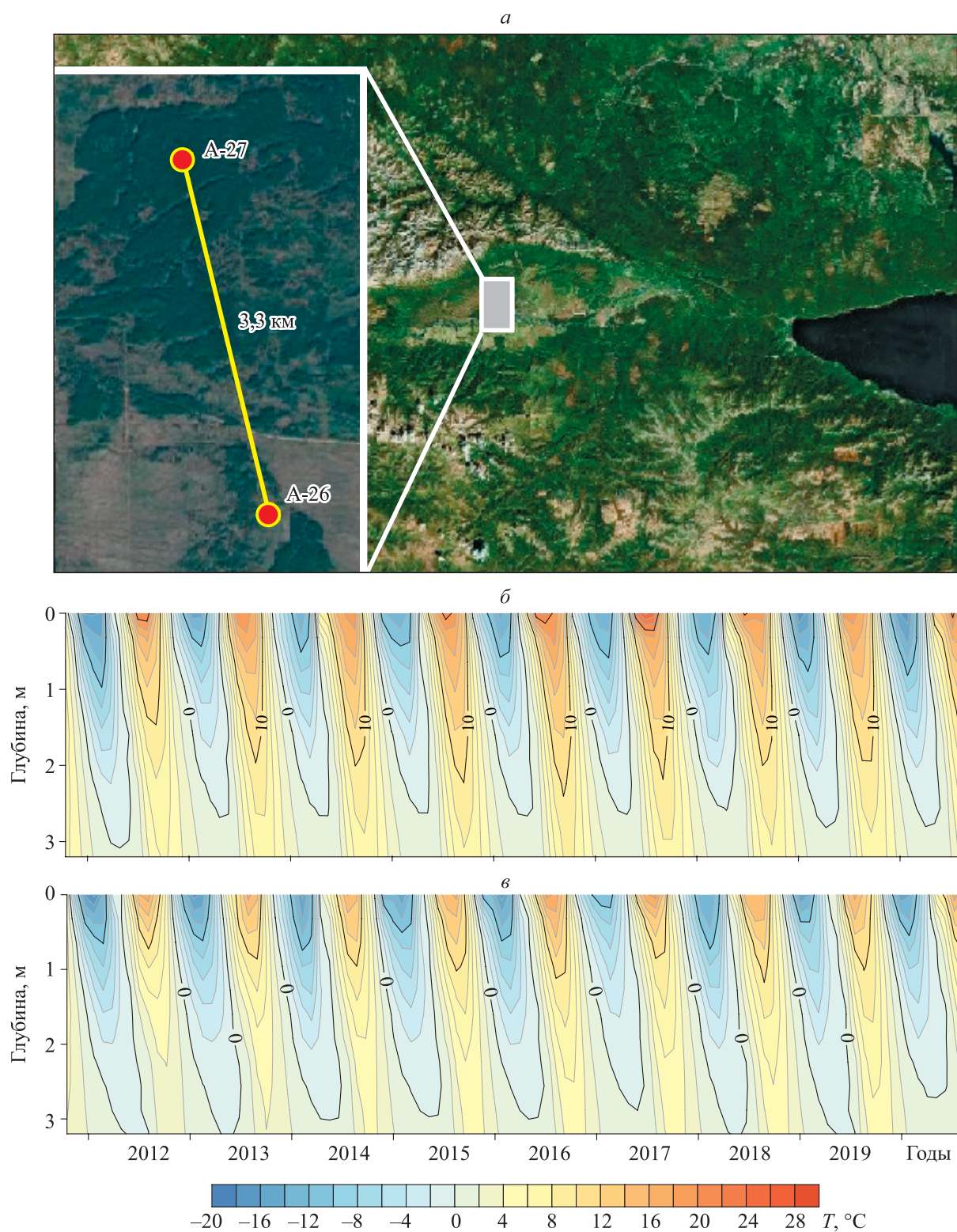


Рис. 1. Схема расположения ключевых участков (*a*) и изменения температуры почвы на площадках А-26 (гарь) (*б*) и А-27 (сосновый лес) (*в*) за 10-летний период измерения.

пользованы данные автоматических измерений температуры почвы на стандартных глубинах 0, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 120, 160, 240, 320 см за период с 13 октября 2011 г. по 16 августа 2020 г. Измерения проводились с шагом 1 час. В температурных зондах используются датчики DS18B20, точность которых путем калибровки в диапазоне $-55...50\text{ }^{\circ}\text{C}$ доведена до $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Корректность использования АПИК для долговременного микроклиматического мониторинга показана в работе [26].

Рассматриваемые площадки характеризуются длительно-сезонно-промерзающим типом температурного режима почв [27]. Глубина промерзания в течение исследуемого периода достигает 2,4 м, длительность периода с температурой ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в верхнем слое (5–10 см) 150–160 суток. Суточные колебания температуры проникают до глубины 20–30 см в зимние месяцы и 40–60 см — в летние (см. рис. 1, б, в). В работе проведено сравнение характеристик температурного режима (средних значений, их изменчивости, годовых и суточных амплитуд на разных глубинах).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Наблюдения за температурой почвы на площадке А-26 были начаты в октябре 2011 г., через год после прохождения низового пожара. Территория характеризовалась сохранением на корню большей части древостоя, который, однако, был спилен и местами здесь же складирован или хаотично повален. На момент осмотра (в конце вегетационного периода) сухостойный напочвенный покров свидетельствовал о возобновлении травостоя, состоящего преимущественно из злаков (вейников и осок). Через год, в сентябре 2012 г., среди доминирующих злаков наблюдалось значительное присутствие полыни шелковистой (*Artemisia sericea*). При осмотре площадки в начале вегетационного периода, в первой половине июня 2013 г., выявлено присутствие в травяном покрове, помимо вышеназванных видов, герани луговой (*Geranium pratense*), горошка мышиного (*Vicia cracca*), костяники обыкновенной (*Rubus saxatilis*); из кустарничков замечена брусника (*Vaccinium vitis-idaea*), из кустарников — шиповник иглистый (*Rosa acicularis*). В течение всего этого трехлетнего периода отмечалось активное усыхание и выпадение древостоя. Проективное покрытие травяного покрова возросло с 30 до 40 %.

В начале июня 2014 г. вблизи установленного АПИК была заложена площадка 10×10 м для проведения геоботанических мониторинговых исследований. Наблюдалось продолжение процесса усыхания и вывала древостоя (рис. 2, а). В местах произрастания до пожара единичных экземпляров березы повислой (*Betula pendula*) отмечено ее возобновление, средняя высота поросли составила 0,9–1,0 м. Редкими экземплярами зафиксированы годовичные всходы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*). Проективное покрытие напочвенного покрова в этот период вегетации составило 40–50 %. В небольшом количестве встречены кустарнички (брусника) и кустарники (шиповник иглистый и рододендрон даурский) со средними высотами 15–20 см. В очень малом количестве отмечена костяника обыкновенная; рассеянно распространены полынь шелковистая, клевер средний (*Trifolium medium*); в наибольшем количестве представлены вейники (*Calamagrostis*), а также герань луговая, иван-чай узколистный (*Chamerion angustifolium*), кровохлебка лекарственная (*Sanguisorba officinalis*).

В конце июля 2016 г. на площадке А-26 наблюдалось довольно обильное наличие сосновых всходов, со средними высотами 25–30 см. Проективное покрытие составило 20–30 %, напочвенного покрова — 50–60 %. По-прежнему доминируют злаковые — вейники и осоки (*Carex*); среди довольно обильно распространенных вышеназванных герани луговой, костяники обыкновенной, клевера среднего, полыни шелковистой и иван-чая узколистного единичными экземплярами встречены лютик близкий (*Ranunculus propinquus*) и в небольших количествах — хризантема Завадского (*Chrysanthemum zawadskii*). Средняя высота кустарничков была 15 см; наблюдалось увеличение обилия брусники. Шиповник иглистый и рододендрон даурский по-прежнему встречались редко.

В первой половине июля 2017 г. наблюдалось обильное количество брусники; обилие рододендрона даурского осталось на прежнем уровне, шиповника иглистого — незначительно увеличилось. Средняя высота кустарников составила 25–35 см. Проективное покрытие древесного подроста было в пределах 30–40 %. Доминирует сосна обыкновенная, средняя высота которой 50–55 см (см. рис. 2, б). Проективное покрытие напочвенного покрова — 60–70 %. Среди вышеназванных доминирующих видов травяного покрова в небольшом количестве также отмечена астра альпийская (*Aster alpinus*).

В середине июля 2018 г. на площадке А-26 наблюдались следы весеннего пала травы. Огнем не поврежден обильный сосновый подрост, средняя высота которого увеличилась до 70 см. Средняя высота единично встречающихся экземпляров березового подроста составила 160–170 см. Проективное покрытие подроста в целом оценивалось в 40–50 %. Обилие и средняя высота кустарников не изменились. В отсутствие прошлогоднего сухостоя хорошо просматривался напочвенный покров,

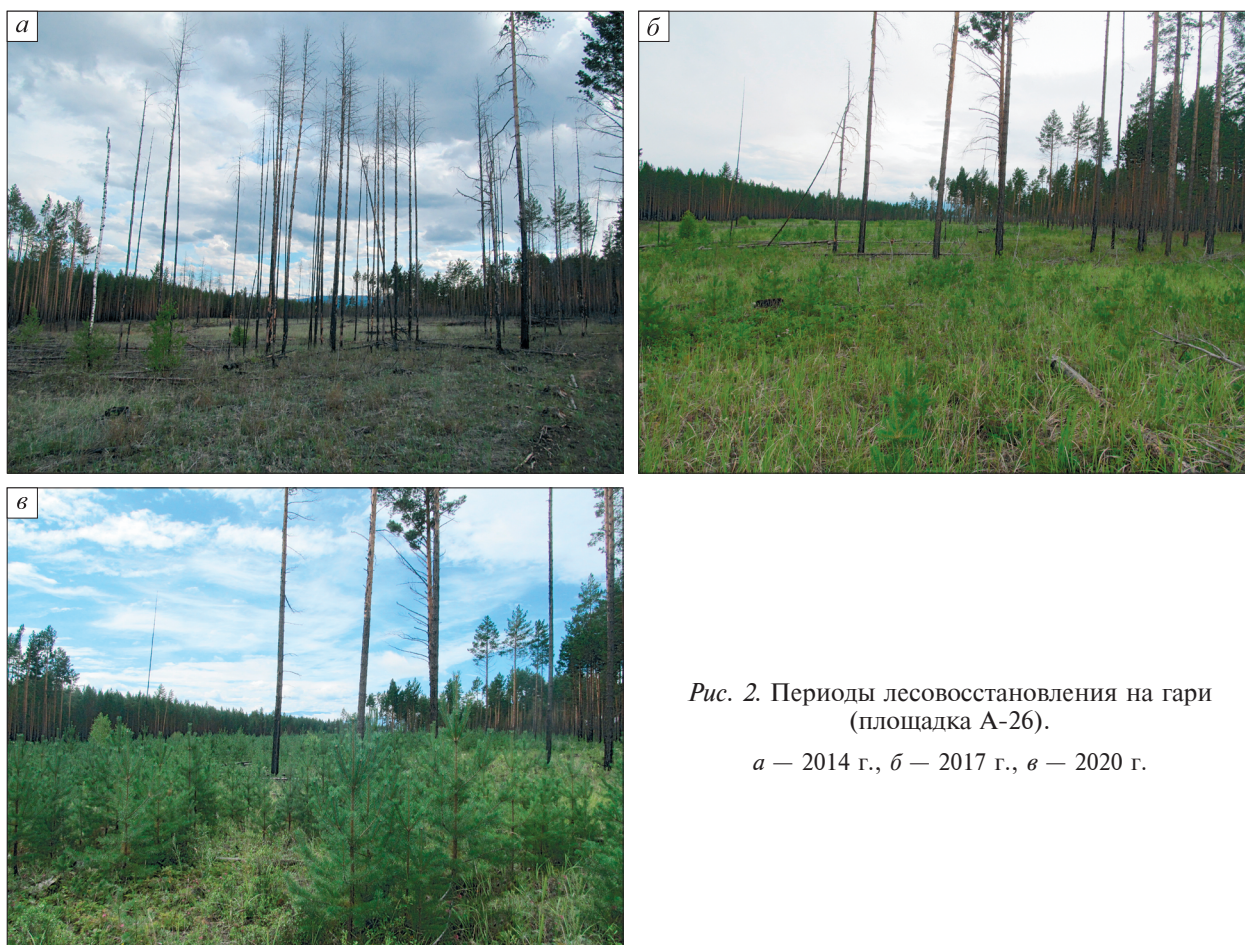


Рис. 2. Периоды лесовосстановления на гари (площадка А-26).

а — 2014 г., б — 2017 г., в — 2020 г.

проективное покрытие которого осталось на прежнем уровне — 60–70 %; состав и обилие травостоя также существенно не изменились. Редкими небольшими островками отмечено появление плевроциума Шребера (*Pleurozium schreberi*).

В начале августа 2020 г. на площадке А-26 наблюдалось значительное увеличение высоты соснового подроста, достигавшего 2,5 м; средняя высота древостоя составила 1,4 м (см. рис. 2, в). Проективное покрытие оценивалось в 60–70 %. В напочвенном покрове наряду с вышеупомянутыми видами отмечена ястребинка зонтичная (*Hieracium canadense*), встречаемая в небольших количествах. Незначительно увеличилось обилие плевроциума Шребера. Диапазон высоты травостоя составил 10–85 см; проективное покрытие — 60–70 %. Средняя высота кустарничкового яруса, по-прежнему состоящего из брусники, отмечена на уровне 15 см. Шиповник иглистый и рододендрон даурский встречались в малом количестве, их средние высоты составили 35–40 см.

В целом по результатам 10-летних наблюдений можно утверждать, что лесовосстановление на площадке А-26 происходит вполне успешно. С момента появления первых всходов соснового подроста в 2013 г. его максимальная высота к августу 2020 г. достигла 2,5 м. Высота редкого подроста березы повислой около 3 м. Помимо обильного дочернего подроста, о благополучном протекании процесса демутации свидетельствует увеличение обилия лесных видов растительности (брусники, костяники обыкновенной, осок, зеленых мхов (плевроциум Шребера)) вслед за распространенным здесь на начальном этапе луговым разнотравьем.

В подтверждение успешности лесовосстановления проведены сравнения геоботанических характеристик с аналогичными данными для площадки А-27, представленной той же группой фаций, что и на площадке А-26 до пожара (рис. 3). Средняя высота сосны обыкновенной фоновой территории составляет 15 м, сомкнутость крон — 0,8. Последний факт, лимитирующий доступ солнечной радиации к поверхности, объясняет отсутствие светолюбивого соснового подроста. Из кустарников обильно представлен рододендрон даурский, имеющий средние высоты 40–60 см, а также редко встречаю-



Рис. 3. Сосновый с единичными экземплярами лиственницы и березы с подлеском из рододендрона даурского зеленомошно-травяно-кустарничковый лес (площадка А-27).

щийся шиповник иглистый высотой 15–25 см. Скудный напочвенный покров, развитие которого сдерживает широко распространенный здесь хвойный опад, имеет проективное покрытие 30 %. Зеленые мхи (плевроциум Шребера) представлены фрагментарно. Из кустарничков довольно обильно встречается брусника. Также обильно произрастает костяника обыкновенная. Остальные травянистые встречаются рассеянно, в небольшом количестве. Это вейники, василистник малый (*Thalictrum minus*), чина приземистая (*Lathyrus humilis*), майник двулистный (*Maianthemum bifolium*), хвощ лесной (*Equisetum sylvaticum*), подмаренник северный (*Galium boreale*).

Исследуемые участки характеризуются сходством почвенного сложения. По [23], покров площадки А-27 представлен псаммоземом иллювиально-ожелезненным, площадки А-26 — псаммоземом гумусовым иллювиально-ожелезненным [24]. Несмотря на то что температурный режим почвы на площадках очень схож (см. рис. 1, б, в), за период наблюдения отмечены существенные различия даже в средних месячных значениях температуры (см. таблицу). В среднем за год почва на нарушенной площадке теплее на всех глубинах. Наибольшие различия на поверхности — в мае, при отсутствии травянистой растительности они достигают 6 °С. С глубиной максимальные величины микроклиматических разностей уменьшаются до 3,6–4,4 °С, и за счет инерционности процесса теплопередачи наблюдается их сдвиг на более поздние месяцы. Так, в слое 80–240 см наибольшее различие средних месячных температур почвы фиксируется в июле, на глубине 320 см — в августе (см. таблицу). В зимние месяцы различия между температурами на глубинах становятся отрицательными: почва на открытой площадке охлаждается, а затем и промерзает быстрее, чем под пологом соснового леса. Однако различия температур зимой на порядок меньше, чем летом, что объясняется наличием снежного покрова, выступающего в роли теплоизолятора и фактора, сглаживающего атмосферное воздействие. Распределение величин стандартного отклонения за отдельные месяцы одинаково на обеих площадках. Максимальные значения в слое 0–120 см наблюдаются в зимние месяцы и составляют 1,5–2,0 °С. Минимальные значения отклонения в этом же слое совпадают по величине с максимумом на глубине 240–320 см и находятся в пределах 0,7–1,2 °С.

На основе полученных результатов можно выделить следующие особенности постпирогенных сукцессий в лесах урочища Бадары. Подтверждено, что послепожарное естественное лесовозобновление на месте сосновых лесов происходит без смены пород [28, 29]. В пределах трансформированной площадки 10 % естественно возобновляемого подроста приходится на прикорневую поросль березы повислой, остальные 90 % принадлежат сосне обыкновенной. За семилетний период наблюдалось

Средние месячные температуры почвы (°C) на отдельных глубинах и микроклиматические разности (Δ) между площадками А-26 (гарь) и А-27 (сосновый лес) за период с ноября 2011 г. по август 2020 г. (числитель — температуры почвы, знаменатель — стандартное отклонение)

Месяц	0 см		10 см		40 см		80 см		120 см		240 см		320 см	
	A-26	A-27	Δ	A-26	A-27	Δ	A-26	A-27	Δ	A-26	A-27	Δ	A-26	A-27
I	$\frac{-14,8}{1,8}$	$\frac{-14,8}{1,5}$	0,0	$\frac{-14,0}{2,1}$	$\frac{-13,9}{1,4}$	-0,1	$\frac{-11,5}{1,7}$	$\frac{-10,6}{1,4}$	-0,9	$\frac{-7,2}{1,7}$	$\frac{-6,4}{1,1}$	-0,8	$\frac{-3,8}{1,4}$	$\frac{-3,4}{0,8}$
II	$\frac{-14,1}{1,5}$	$\frac{-13,8}{1,8}$	-0,3	$\frac{-13,8}{1,6}$	$\frac{-13,4}{1,8}$	-0,4	$\frac{-12,1}{1,5}$	$\frac{-11,2}{1,6}$	-0,9	$\frac{-8,9}{1,5}$	$\frac{-8,2}{1,3}$	-0,7	$\frac{-5,9}{1,4}$	$\frac{-5,7}{0,9}$
III	$\frac{-5,8}{1,9}$	$\frac{-6,6}{1,8}$	0,8	$\frac{-5,8}{1,7}$	$\frac{-7,1}{1,8}$	1,3	$\frac{-6,2}{1,5}$	$\frac{-7,0}{1,6}$	0,8	$\frac{-6,0}{1,1}$	$\frac{-6,2}{1,3}$	0,2	$\frac{-4,9}{0,9}$	$\frac{-5,1}{1,0}$
IV	$\frac{5,1}{1,8}$	$\frac{1,0}{1,2}$	4,1	$\frac{3,0}{1,1}$	$\frac{0,0}{1,0}$	3,0	$\frac{0,8}{0,7}$	$\frac{-0,9}{0,9}$	1,6	$\frac{-0,9}{0,7}$	$\frac{-1,7}{0,9}$	0,7	$\frac{-1,3}{0,5}$	$\frac{-2,1}{0,6}$
V	$\frac{12,3}{1,4}$	$\frac{6,2}{1,0}$	6,0	$\frac{9,2}{1,3}$	$\frac{4,2}{1,4}$	5,0	$\frac{6,4}{1,2}$	$\frac{2,1}{1,0}$	4,4	$\frac{3,0}{1,3}$	$\frac{0,4}{0,4}$	2,6	$\frac{1,0}{0,7}$	$\frac{-0,5}{0,2}$
VI	$\frac{18,7}{1,5}$	$\frac{13,3}{0,7}$	5,4	$\frac{15,7}{0,7}$	$\frac{11,3}{0,5}$	4,4	$\frac{12,4}{0,5}$	$\frac{8,2}{0,4}$	4,2	$\frac{8,8}{0,9}$	$\frac{4,9}{0,8}$	3,9	$\frac{6,0}{0,5}$	$\frac{2,5}{0,8}$
VII	$\frac{20,6}{1,0}$	$\frac{16,6}{0,9}$	4,0	$\frac{18,9}{0,7}$	$\frac{15,2}{0,7}$	3,7	$\frac{16,3}{0,7}$	$\frac{12,6}{0,7}$	3,6	$\frac{13,3}{0,7}$	$\frac{9,1}{0,7}$	4,1	$\frac{10,7}{0,8}$	$\frac{6,3}{0,6}$
VIII	$\frac{17,9}{1,0}$	$\frac{15,0}{0,9}$	2,9	$\frac{17,6}{1,2}$	$\frac{14,2}{0,8}$	3,4	$\frac{16,2}{0,9}$	$\frac{12,9}{0,8}$	3,3	$\frac{14,5}{0,7}$	$\frac{10,8}{0,8}$	3,7	$\frac{12,8}{0,7}$	$\frac{8,8}{1,0}$
IX	$\frac{11,0}{1,2}$	$\frac{9,0}{1,1}$	2,0	$\frac{11,4}{1,1}$	$\frac{9,0}{1,0}$	2,4	$\frac{11,8}{0,9}$	$\frac{9,4}{0,9}$	2,5	$\frac{11,7}{0,8}$	$\frac{9,1}{1,0}$	2,7	$\frac{11,4}{0,7}$	$\frac{8,3}{1,1}$
X	$\frac{1,1}{0,9}$	$\frac{1,0}{0,9}$	0,1	$\frac{2,6}{0,7}$	$\frac{1,7}{0,9}$	0,9	$\frac{4,4}{0,5}$	$\frac{3,4}{0,8}$	1,0	$\frac{5,8}{0,7}$	$\frac{4,8}{0,7}$	1,0	$\frac{6,9}{0,4}$	$\frac{5,3}{0,7}$
XI	$\frac{-6,6}{1,3}$	$\frac{-6,4}{1,3}$	-0,2	$\frac{-5,6}{1,4}$	$\frac{-5,1}{1,1}$	-0,6	$\frac{-2,0}{0,9}$	$\frac{-1,5}{0,7}$	-0,5	$\frac{0,9}{0,7}$	$\frac{1,0}{0,5}$	-0,1	$\frac{2,7}{0,2}$	$\frac{2,1}{0,4}$
XII	$\frac{-11,7}{1,6}$	$\frac{12,0}{1,8}$	0,3	$\frac{-11,0}{1,6}$	$\frac{-10,9}{1,6}$	-0,1	$\frac{-7,9}{1,1}$	$\frac{-7,1}{1,2}$	-0,8	$\frac{-3,3}{1,3}$	$\frac{-2,7}{0,8}$	-0,6	$\frac{-0,4}{0,5}$	$\frac{-0,4}{0,5}$

Примечание. Жирным шрифтом выделены отрицательные разности (температура почвы на гарь ниже, чем на фоновой площадке), курсивом — положительные.

постоянное увеличение проективного покрытия соснового подроста, что доказывает стимулирующее воздействие пожаров на возобновление светлехвойных лесов [30–32]. На открытых безлесных участках прогоревшей площадки А-26 с обильным освещением, прогревом и сухостью почвы появление сосновых всходов отмечено на третий послепожарный год.

На начальных стадиях послепожарного восстановления одними из основных индикаторов лесорастительных условий являются виды нижних ярусов [30]. Весь период наблюдений на площадке А-26 отмечалась вейниково-разнотравная постпирогенная стадия с бруснично-разнотравными микрогруппировками с появлением мохово-бруснично-разнотравных микроассоциаций на более поздних стадиях развития гари. На этом этапе проявляется кустарниковый ярус, представленный рододендром даурским и шиповником иглистым. Таким образом, по мере изменения экологических условий (увеличение высоты древесного подроста, снижение степени освещенности, повышение увлажненности почвенного горизонта) доминирующие на начальном этапе восстановления луговые разнотравные ассоциации на более поздних сроках были дополнены лесными видами.

В течение первых лет после прохождения пожара не наблюдается каких-либо изменений в различии характеристик температурного режима на двух площадках как на поверхности, так и в нижележащих слоях, что может быть связано с неинтенсивным лесовосстановлением. Сдерживающий фактор этого процесса как для древесной, так и для травяно-кустарничковой растительности — медленно разлагаемый и твердый хвойный опад, а также ветви и стволы поваленных деревьев. Образующие ими захламливаемые участки служат причиной пространственной неравномерности развития подпологовой растительности [33].

Кроме того, вследствие изменения свойств верхнего слоя почвы после пожара максимальные температуры поверхности на площадке А-26 достигают 51 °С (рис. 4, а), что является губительным для появившихся всходов [34] и уменьшает скорость лесовосстановления. В эти же сроки на фоновой площадке максимальная температура поверхности не превышает 24 °С. В первую очередь на передачу тепла между почвой и атмосферой влияет густота растительных сообществ [35]. Густой древостой, мощная подстилка, высокий травяной покров больше препятствуют прогреванию почвы в дневные часы и радиационному выхолаживанию ночью. Поэтому уменьшение суточной амплитуды колебаний температуры почвы в результате постпирогенного восстановления растительного покрова можно считать индикатором стабилизации и успешности процесса демутиации. Суточные колебания на рассматриваемых площадках проникают не глубже 40 см, на глубинах от 40 до 320 см фиксируются годовые колебания температуры.

Величина средней месячной амплитуды суточного хода температуры поверхности на ненарушенном участке близка к амплитуде температуры почвы на глубине 10 см на гари. Их максимальные величины около 7 °С. Амплитуда температуры поверхности в пределах пирогенно нарушенного участка достигает 25 °С, тенденция к ее уменьшению прослеживается начиная с 2015 г. (через пять лет после пожара). За последние шесть лет величина средней за июль суточной амплитуды уменьшилась до 17 °С (см. рис. 4, в). Та же тенденция наблюдается в изменении разности амплитуд температуры поверхности между нарушенной и фоновой площадками. Что касается максимальной суточной амплитуды на поверхности (см. рис. 4, г), на фоновой площадке она не изменяется в течение периода наблюдений и составляет 9–11 °С, на нарушенной же амплитуда уменьшилась за 2018–2020 гг. более чем на 10 °С, после максимума в 2017 г. (39,1 °С).

В слое до глубины 10 см отмечается обратная тенденция. Последние 4–5 лет на постпирогенном участке прослеживался некоторый рост суточных амплитуд (на 1–2 °С), что может быть связано с изменением теплофизических свойств почвы в процессе восстановления растительности. В частности, это касается увеличения влагосодержания и, как следствие, теплопередачи между слоями. В 2020 г. повышение суточных амплитуд на глубине 10 см прекратилось. В нижележащих слоях различия между суточными амплитудами на двух площадках остаются прежними. Разность сумм температур выше и ниже 0 °С, а также выше 5 °С на всех глубинах практически не меняется за рассматриваемый период, что еще раз указывает на то, что процесс восстановления температурного режима далек от завершения. Это подтверждает выводы других авторов о том, что выравнивание аномалий в первые 10 лет происходит не активно [4, 5].

При анализе температурного режима почвы необходимо учитывать облачность, наличие которой способствует сглаживанию контрастов между площадками при прогреве и радиационном выхолаживании. Амплитуда суточного хода температуры поверхности почвы уменьшается при наличии облачности, максимум и минимум менее выражены.

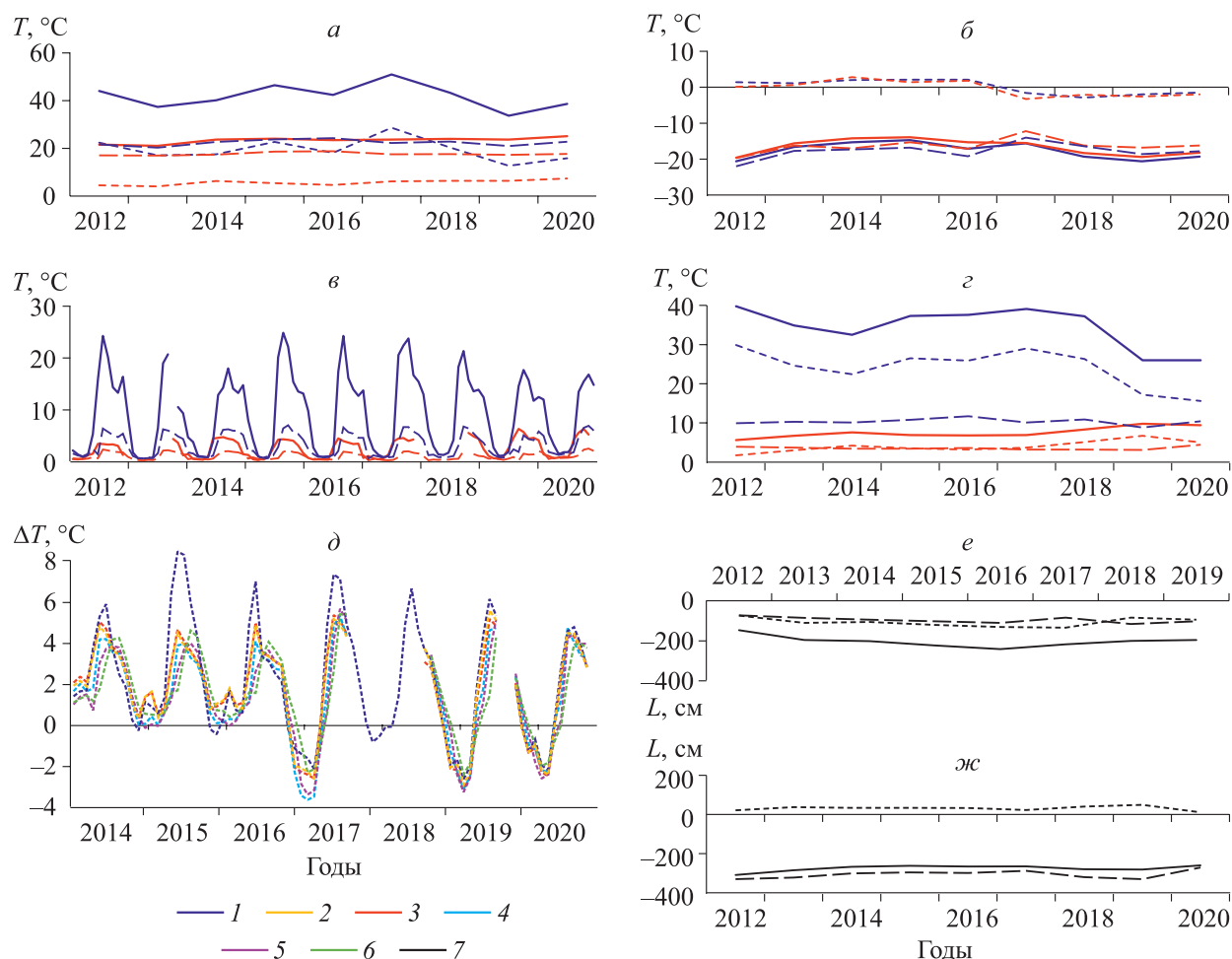


Рис. 4. Изменение характеристик температурного режима почвы на глубинах 0, 5, 10, 40, 80, 120 см за 2012–2020 гг.

a — максимальная температура почвы на поверхности и глубине 10 см; *б* — минимальная температура почва на поверхности и глубине 10 см; *в* — средняя месячная амплитуда суточного хода температуры почвы; *г* — максимальная за год суточная амплитуда; *д* — микроклиматические разности средних месячных значений температуры почвы; *е* — глубина прогрева почвы до 10 °С, *ж* — глубина промерзания почвы. Температура почвы на глубине, см: 1 — 0; 2 — 5; 3 — 10; 4 — 40; 5 — 80; 6 — 120. 7 — глубина прогрева/промерзания почвы, см. Сплошная линия — характеристики температурного режима почвы на площадке А-26 (гарь), штриховая — характеристики температурного режима почвы на площадке А-27 (сосновый лес), мелкая штриховая — микроклиматические разности (А-26 — А-27).

Различия значений температуры почвы между площадками в ясные и пасмурные дни более выражены в летний период, так как прогреванию и выхолаживанию почвы не препятствует снежный покров. Летом при отсутствии облачности диапазон суточных колебаний температуры поверхности почвы может составлять 35–40 °С на открытой площадке, 9–11 °С — на облесенной, на глубине 20 см — 10–12 и 2–4 °С соответственно (см. рис. 4, *г*), что совпадает с результатами исследования других авторов [1]. Минимальные температуры в суточном ходе, наблюдаемые ночью на двух площадках, практически совпадают (различия не превышают 1–3 °С: нарушенная площадка летними ночами больше остывает), основной вклад в различие суточных амплитуд и, соответственно, прогрев почвенной толщи вносят дневные температуры.

Следствием вышесказанного является более интенсивный прогрев почвы по всему профилю на площадке, где отсутствует растительный покров. В теплый период при отсутствии облачности различия между значениями температуры поверхности почвы днем могут достигать 25 °С (на гари почва теплее), ночью наблюдаются микроклиматические разности с обратным знаком: –2...–3 °С (радиа-

ционное выхолаживание на гари больше). При пасмурной погоде на обеих площадках колебания составляют не более 5–7 °С на поверхности почвы (различия не превышают 2–3 °С днем и –1...–2 °С ночью), а на глубине 20 см не прослеживаются. В зимний период, благодаря наличию снежного покрова, даже в ясный день на открытой площадке на поверхности почвы суточные колебания не превышают 1–2 °С. При этом разность температур поверхности почвы между площадками составляет 1,5–2 °С в течение суток при ясной погоде и 0,5–1 °С при пасмурной погоде.

В связи с эпизодическим отказом оборудования в первые годы наблюдения есть пропуски в данных. Однако это обстоятельство не мешает оценить изменение различий между площадками. Логично, что максимальные различия температуры почвы на разных глубинах между площадками должны фиксироваться в первые годы после пожара. Однако при анализе разностей за отдельные годы отмечено, что существенный вклад в величину этих различий вносят метеорологические условия конкретного года. На графике (см. рис. 4, д) представлено изменение разности средних месячных температур почвы на отдельных глубинах за 2014–2020 гг.

Как отмечалось выше, в зимний период важную роль в формировании температурного режима почвы играет снежный покров (его наличие и высота). Согласно результатам снегосъемки, в 2012/13 гг. максимальная высота снежного покрова за зиму составляла 26–27 см на гари и 18–20 см в сосновом лесу. На ближайшей метеостанции (Тунка) максимальная высота снега в этот период была 29 см. За время исследования данная характеристика изменялась в диапазоне 0,7–29 см. Необходимо отметить, что при небольшой высоте снежного покрова (до 30 см) его теплоизоляционные свойства при температуре воздуха ниже –20 °С значительно снижаются [8]. Однако при температурах от 0 до –10 °С его влиянием нельзя пренебрегать. По данным наших наблюдений, различия между двумя площадками минимальны в годы, когда появление снежного покрова и переход средней суточной температуры воздуха через 0 °С происходят почти одновременно (разница не более 2–4 дней). По данным метеостанции Тунка [36], такие условия фиксировались зимой 2014/15, 2015/16 и 2017/18 гг.

При длительном же бесснежном периоде с отрицательными температурами (20–30 дней) мы наблюдаем различия в температуре почвы на всех глубинах (–2...–3 °С). В этом случае растительность в сосновом лесу препятствует радиационному выхолаживанию почвы в период до установления устойчивого снежного покрова. В то же время лес способствует некоторому уменьшению снегонакопления за счет перехвата осадков кронами. До зимы 2015/16 гг. более низкие температуры фиксировались на фоновой площадке, а в 2016/17 гг. картина сменилась на обратную: более низкие температуры поверхности почвы и ее верхних слоев наблюдались на пирогенно нарушенной площадке (см. рис. 4, б). Это может быть связано с особенностями снегонакопления в сочетании с отрицательными температурами воздуха на фоне изменяющегося ландшафта. В зимний период 2016/17 гг. минимальные суточные температуры поверхности почвы на открытой площадке (А-26) в январе составляли –19,3 °С, а в сосновом лесу (А-27) — –16,2 °С. В процессе восстановления растительности разность минимальных температур в 2019/20 гг. уменьшилась до –1,6 °С. При этом высота снега в январе 2017 г. составляла 16 см, а в 2019 г. она была минимальной за весь период (3 см). Различие температурного режима на поверхности почвы обуславливает различие температур по всему профилю.

В летний период прогрев почвы до температуры 10 °С и выше наблюдался в среднем до глубины 170 см (максимум 240 см в 2016 г.) на открытой площадке и лишь до 95 см (максимум 116 см в 2018 г.) на облесенной, т. е. глубина прогрева почвы различается в два раза (см. рис. 4, е). За счет более интенсивного прогрева в теплый период почва на открытой площадке дольше сохраняет это тепло и промерзает на меньшую глубину. И хотя зимой 2011/12 гг. на площадке А-26 (гарь) средняя суточная температура почвы на глубине 240 см опускалась до –1,7 °С, на площадке А-27 (лес) только до –0,8 °С, на глубине 320 см минимальная температура составляла 0,1 и –0,1 °С соответственно. Различия в глубине проникновения нулевой изотермы составляют 21–49 см, тенденции к изменению за период наблюдения нет (см. рис. 4, ж).

В летний период 2018–2020 гг., когда проективное покрытие нижнего лесорастительного яруса на площадке А-26 становится больше, чем в первые послепожарные годы, мы наблюдаем уменьшение разностей средних месячных температур почвы, что говорит о значительном влиянии травяно-кустарничковой растительности на поступление солнечной радиации к поверхности почвы, и это согласуется с выводами других авторов [37]. Это влияние становится сравнимым с влиянием полога леса, а иногда даже более существенным. В дальнейшем при развитии древесного яруса травянистая и кустарничковая растительность на площадке А-26 должна стать менее обильной, а при восстановлении растительного покрова произойдет и полное восстановление температурного режима.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили выявить особенности динамики температуры почвы в период восстановления сосновых лесов Тункинской котловины, преобразованных лесными пожарами. На основе данных многолетних мониторинговых наблюдений рассмотрена динамика естественного возобновления подтаежных светлехвойных геосистем. Выявлено, что сосновые всходы отмечены на третий послепожарный год; для первых послепожарных лет характерно появление корневой поросли березы повислой. Дальнейшее протекание процесса лесовозобновления проходит со значительным доминированием в подросте сосны обыкновенной, чаще всего характеризующейся высокими показателями прироста по высоте и удовлетворительной степенью проективного покрытия, что в целом можно считать маркером успешности лесовосстановления.

Кустарниковый ярус представлен появляющимся в первые послепожарные годы шиповником иглистым, а также рододендронам даурским. В напочвенном покрове среди луговых видов (полыни шелковистой, герани луговой, горошка мышиного, клевера среднего, кровохлебки лекарственной), доминирующих на начальных стадиях восстановления, в ходе последних наблюдений было выявлено значительное присутствие лесных видов (плевроциума Шребера, василистника малого, чины приземистой, майника двулистного, хвоща лесного, подмаренника северного, костяники обыкновенной, брусники), что также можно считать убедительным показателем эффективного восстановления предшествующих сосновых зеленомошно-травяно-кустарничковых лесов.

Растительный покров оказывает значительное влияние на температурный режим почв, что хорошо прослеживается в теплый и холодный периоды. При высокой и густой растительности летом влияние солнечной радиации, а следовательно и поступление тепла, на поверхность почвы минимально. Площадка с сосновым лесом прогревается менее интенсивно, чем площадка с гарью. В зимний период открытая местность подвергается большему промерзанию. Любой растительный покров препятствует быстрому охлаждению поверхности почвы и уменьшает колебания температур. Поверхность почвы зимой теплее тогда, когда на ней присутствует снежный покров. Исходя из анализа, древесный покров соснового леса является барьером для ветра, уменьшая выдувание снега, и препятствует радиационному выхолаживанию поверхности.

Десятилетние микроклиматические наблюдения (2011–2020 гг.) показали, что разности температур на экспериментальных площадках ($T_{\text{гарь}} - T_{\text{лес}}$) максимальны в теплое время года. На поверхности почвы в средних месячных значениях они достигают 8,5 °C (май 2015 г.), на глубине от 2 до 320 см — 3–6 °C. Суточные максимумы на поверхности отличаются на 25 °C. В зимнее время при небольшой высоте снега и позднем формировании устойчивого снежного покрова фиксируются отрицательные разности по всему почвенному профилю (следствие радиационного выхолаживания).

В годы, когда снежный покров устанавливается одновременно с переходом температуры воздуха через 0 °C в сторону отрицательных температур, различия между температурой почвы на площадках составляют 0–2 °C. По мере лесовозобновления на гарях происходит восстановление температурного режима, т. е. уменьшаются микроклиматические разности температуры почвы между площадками с нарушенной и естественной растительностью. Наиболее заметны эти изменения в рядах температуры поверхности почвы в летние месяцы. Направленный тренд в сторону восстановления температурного режима прослеживается в рядах суточных амплитуд и суточных максимальных температур на поверхности, начиная с 2015–2017 гг. (5–7-й годы после пожара). Различия средних месячных температур на поверхности начали уменьшаться в 2018 г., на глубинах тренды пока не фиксируются.

Полученные результаты исследования многолетней динамики температуры почвы пирогенно трансформированных геосистем Тункинской котловины в долговременной перспективе могут применяться при определении и прогнозировании динамических тенденций ландшафтно-климатических условий территории юга Восточной Сибири, пополняя информативную базу данных почвенно-климатических параметров в совокупности с особенностями протекания постпирогенных сукцессий. Продолжение мониторинговых наблюдений целесообразно для рассмотрения вопросов пирогенной трансформации геосистем, для подтверждения предварительных результатов об успешности протекания процесса восстановления с учетом региональной специфики.

Работа выполнена за счет средств государственного задания (AAAA–A21–121012190059–5, AAAA–A21–121012190017–5, 121031300158–9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасов П.А., Иванов В.А., Иванова Г.А. Особенности температурного режима почв в сосняках средней тайги, пройденных низовыми пожарами // Хвойные бореальной зоны. — 2008. — Т. 25, № 3–4. — С. 300–304.
2. Краснощёков Ю.Н. Влияние пожаров на свойства горных дерново-таежных почв лиственничников Монголии // Почвоведение. — 1994. — № 9. — С. 102–109.
3. Косарев В.П., Андрищенко Т.Т. Лесная метеорология с основами климатологии: Учебное пособие. — СПб.: Лань, 2007. — 288 с.
4. Пономарёв Е.И., Пономарёва Т.В. Влияние послепожарных температурных аномалий на сезонное протаивание почв мерзлотной зоны Средней Сибири по дистанционным данным // Сиб. экол. журн. — 2018. — № 4. — С. 477–486.
5. Швецов Е.Г., Пономарёв Е.И. Послепожарные эффекты в лиственничниках Сибири на многоспектральных спутниковых данных // Сиб. экол. журн. — 2020. — № 1. — С. 129–140.
6. Евдокименко М.Д. Микроклимат древостоев и гидротермический режим почв в сосновых лесах Забайкалья после низовых пожаров // Горение и пожары в лесу: Сб. статей. — Красноярск: Изд-во Ин-та леса и древесины СО АН СССР, 1979. — С. 130–140.
7. Беховых Ю.В., Макарычев С.В., Трофимов И.Т., Болотов А.Г. Особенности теплоаккумуляции и теплообмена в дерново-подзолистых почвах на горах сухостепной зоны Алтайского края // Антропогенное воздействие на лесные экосистемы: Тезисы докл. II Междунар. конф. (18–19 апреля 2002 г.). — Барнаул: Изд-во Алтайск. ун-та, 2002. — С. 142–145.
8. Максютова Е.В., Густокашина Н.Н. Изменение характеристик климата холодного периода на территории Иркутско-Черемховской равнины // География и природ. ресурсы. — 2009. — № 4. — С. 87–92.
9. Новиков С.М., Иванов К.Е. Болота Западной Сибири, их строение и гидрологический режим. — Л.: Гидрометеиздат, 1976. — 448 с.
10. Дюкарев Е.А. Влияние температуры воздуха и снежного покрова на характеристики сезонно-мерзлого слоя почвогрунтов // Криосфера Земли. — 2015. — Т. 19, № 3. — С. 45–51.
11. Шульгин А.М. Климат почвы и его регулирование. — М.: Гидрометеиздат, 1967. — 298 с.
12. Lopez-Garcia M.J., Caselles V. Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data // Geocarto International. — 1991. — Vol. 6. — P. 31–37.
13. Veraverbeke S., Verstraeten W.W., Lhermitte S., Kerchove R. van de, Goossens R. Assessment of post-fire changes in land surface temperature and surface albedo, and their relation with fire-burn severity using multitemporal MODIS imagery // International Journ. of Wildland Fire. — 2012. — Vol. 21. — P. 243–256.
14. Shuklina E.S., Voropay N.N. Influence of vegetation cover on the temperature dynamics of sandy soil // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2020 — Vol. 611 [Электронный ресурс]. — file:///C:/Users/user/Downloads/Influence_of_vegetation_cover_on_the_temperature_d.pdf (дата обращения 20.03.2021).
15. Атутова Ж.В. Современные ландшафты Тункинской котловины // География и природ. ресурсы. — 2018. — № 1. — С. 103–114.
16. Atutova Zh.V. Natural and anthropogenic transformation of geosystems of Tunkinsky national park: identification and mapping // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2021. — Vol. 885. — P. 012043.
17. Василенко О.В., Воропай Н.Н. Особенности формирования климата котловин юго-западного Прибайкалья // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2015. — № 2. — С. 104–111.
18. Воропай Н.Н., Киселёв М.В., Черкашина А.А. Мониторинг температуры почв на многолетнемерзлых породах в естественных и антропогенно нарушенных условиях Тункинской котловины // Лед и снег. — 2019. — № 4. — С. 517–528.
19. Михеев В.С., Ряшин В.А. Ландшафты юга Восточной Сибири: Карта м-ба 1:1 500 000. — М.: ГУГК, 1977. — 4 л.
20. Ахаржанова Т.В. Сосновый бор Бадары — особо ценный ландшафт Тункинского национального парка // Вестн. Бурят. ун-та. Сер. География, геология. — 2004. — Вып. 3. — С. 207–212.
21. Максютова Е.В., Макаренко Е.Л., Силаев А.В. Активность лесных пожаров и пожароопасность в Байкальском регионе в современных условиях // География и природ. ресурсы. — 2019. — № 5. — С. 52–58.
22. Atutova Zh.V., Voropay N.N., Shuklina E.S. Landscape-climatic features of the reforestation dynamics pyrogenically transformed geosystems of the Tunkinskaya depression // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2021. — Vol. 885. — P. 012042.
23. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. — Смоленск: Ойкумена, 2004. — 342 с.
24. Kiselev M.V., Voropay N.N., Cherkashina A.A. Influence of anthropogenic activities on the temperature regime of soils of the South-Western Baikal region // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. — 2019. — Vol. 381, N 1. — P. 012031.
25. Система автоматического мониторинга «САМ». — Томск: ИнФлай, 2014. — 18 с.
26. Kiselev M.V., Voropay N.N., Dyukarev E.A., Kurakov S.A., Kurakova P.S., Makeev E.A. Automatic meteorological measuring systems for microclimate monitoring // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2018. — Vol. 190, N 1. — P. 012031.

27. **Почвоведение:** Учебное пособие / Под общ. ред. В.А. Рожкова. — М.: Лесн. пром-сть, 2006. — 272 с.
28. **Санников С.Н.** Экология и география естественного возобновления сосны обыкновенной. — М.: Наука, 1992. — 264 с.
29. **Цветков П.А.** Влияние пожаров на начальный этап лесообразования в среднетаежных сосняках Сибири // Хвойные бореальные зоны. — 2013. — Т. 31, № 1. — С. 15–21.
30. **Иванова Г.А., Иванов В.А., Ковалева Н.М., Конард С., Жила С.В., Тарасов П.А.** Сукцессия растительности после высокоинтенсивного пожара в сосняке лишайниковом // Сиб. экол. журн. — 2017. — № 1. — С. 61–71.
31. **Heras J., Moya D., Vega J.A., Daskalaku E., Vallejo R., Grigoriadis N., Tsitsoni T., Baeza J., Valdecantos A., Fernandez C., Espelta J., Fernandes P.** Post-fire management of serotinous pine forests // Post-fire management and restoration of Southern European forests. — London; New York: Springer Science + Business Media B.V., 2012. — P. 121–150.
32. **Vallejo V.R., Arianoutsou M., Moreira F.** Fire ecology and post-fire restoration approaches in Southern European forest types // Post-fire management and restoration of Southern European forests. — London; New York: Springer Science + Business Media, 2012. — P. 93–119.
33. **Kuuluvainen T., Pukkala T.** Effect of crown shape and tree distribution on the spatial distribution of shade // Agricultural and Forest Meteorology. — 1987. — Vol. 40. — P. 215–231.
34. **Гирс Г.И.** Физиология ослабленного дерева. — Новосибирск: Наука, 1982. — 154 с.
35. **Гынинова А.Б., Убугунов Л.Л., Куликов А.И., Гынинова Б.Д., Гончиков Б.Н., Бадмаев Н.Б., Сымпилова Д.П.** Послепожарная эволюция лесных экосистем на песчаных террасах Юго-Восточного Прибайкалья // Сиб. экол. журн. — 2020. — № 1. — С. 13–25.
36. **Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М.** Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (TTTR) [Электронный ресурс]. — <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных> (дата обращения 03.01.2021).
37. **Ильичёв Ю.Н., Игнатьев Л.А., Артымук С.Ю.** Влияние пожаров и рубок по гарям на почвенно-экологические факторы естественного лесовосстановления // Сиб. экол. журн. — 2011. — № 6. — С. 861–869.

Поступила в редакцию 16.07.2021

После доработки 15.11.2021

Принята к публикации 29.12.2021