

УДК 631.43

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-2(154-161)

**Т. В. ПОНОМАРЁВА, Е. И. ПОНОМАРЁВ, А. С. ШИШИКИН, Е. Г. ШВЕЦОВ**

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/28, Россия, bashkova\_t@mail.ru, evg@ksc.krasn.ru, shishikin@ksc.krasn.ru, eugeneshvetsov11@yandex.ru

**МОНИТОРИНГ ТРАНСФОРМАЦИИ СТАРОПАХОТНЫХ ПОЧВ ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ  
ПРИ ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИИ**

*Изучены направления постагрогенной эволюции почв в сосняках лесостепной зоны Красноярского края. Фоновые исходные почвы на исследуемой территории представлены темно-серыми, серыми, дерново-подзолистыми, имеющими типичное строение почвенного профиля. После сельскохозяйственного освоения лесной территории в почвенном профиле сформирован пахотный горизонт, и почвы могут быть отнесены к отряду агроземов. Исследования выполнены в районе стационара Института леса СО РАН «Погорельский бор», на залежных участках, для которых предварительно было установлено время начала постагрогенной эволюции (7, 12 и 50 лет). Для идентификации участков использованы материалы спутниковой съемки. Наземный анализ состояния почв выполнялся с применением авторской методики съемки профилей в ИК-диапазоне. Подтвержден факт и получены инструментальные количественные характеристики динамики пахотных почв под сосняками лесостепи, которые за длительный период лесовосстановления приобретают строение, свойственное естественным почвам. Признаки агрогенного воздействия сохраняются до 50 лет. При этом при экспертном морфологическом анализе нижняя граница реликтового пахотного горизонта не прослеживается, но детектируется на съемках в тепловом диапазоне, что обусловлено различиями в строении и теплофизических свойствах пахотного и нижележащих горизонтов. Получены оценки вариативности спектральных признаков участков старопахотных почв, находящихся на разных стадиях сукцессии, при анализе спутниковых снимков высокого («Ресурс-П») и низкого (Landsat/TM/ETM/OLD, TERRA/Modis) пространственного разрешения за период 1975–2015 гг. Предложено использовать относительные показатели, характеризующие динамику дешифровочных признаков в сравнении с фоновыми участками.*

Ключевые слова: лесные почвы, постагрогенные сообщества, почвенный профиль, спутниковые данные, радиометрическая съемка.

**T. V. PONOMAREVA, E. I. PONOMAREV, A. S. SHISHIKIN, E. G. SHVETSOV**

Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russia, bashkova\_t@mail.ru, evg@ksc.krasn.ru, shishikin@ksc.krasn.ru, eugeneshvetsov11@yandex.ru

**MONITORING OF TRANSFORMATION OF POSTAGROGENIC SOILS  
IN FOREST-STEPPE ZONE DURING THE PROCESS OF REFORESTATION**

*We studied the trends of postagrogenic soil evolution under the pine forests of the forest-steppe zone in Krasnoyarsk krai. Original background soils of the study area are the dark gray (Phaeozems), gray (Luvisols) and sod-podzolic (Retisols) soils having a typical structure of the soil profile. After agricultural development of the forest area an arable horizon of profiles was formed. Hence, the soils may be assigned to the group of agrozeams (Anthrosols). Studies were carried out near the Pogorel'skii Bor scientific permanent station operated by the Institute of Forest SB RAS, on the abandoned lands, for which we preliminarily determined the start time of postagrogenic evolution (7, 12 and 50 years). To identify the plots we used satellite imagery. Above-ground analysis of the soil state was performed using the author's technique for profile imaging in the infrared range. We confirmed the fact and obtained instrumental quantitative characteristics of the arable soil dynamics under forest-steppe pine forests, which acquire a typical structure for natural soils during a long period of reforestation; the signs of agrogenic effects persist as long as 50 years. On the other hand, the lower boundary of the relict arable horizon cannot be detected using expert morphological expert analysis but it is identified from imagery obtained in the thermal range. It is caused by the difference of the structure and thermophysical properties of arable and underlying horizons. Estimates are obtained of variability in spectral features for areas of postagrogenic soils in different succession stages by analyzing satellite imagery of high (Resurs-P) and low (Landsat/TM/ETM/OLD, TERRA/Modis) spatial resolution (for the period 1975–2015). It is proposed to use relative indicators characterizing the dynamics of the interpretive features in relation to the background areas spectral characteristics.*

Keywords: forest soils, postagrogenic communities, soil profile, satellite data, radiometric imagery.

## ВВЕДЕНИЕ

Сокращение площади сельскохозяйственных угодий в последние 20 лет характерно практически для всех субъектов Российской Федерации [1, 2]. В то же время в структуре лесных земель зафиксирована тенденция к росту доли покрытых лесом площадей. В азиатской части РФ в начале XXI в. доля лесной растительности увеличилась примерно на 5 % (с 82 до 87 %) [3]. На неиспользуемых сельскохозяйственных угодьях происходит естественное восстановление леса породами-пионерами, как правило, березой, осиной, ольхой, сосной [1]. В южнотаежной и лесостепной зонах, когда зарастающая пашня не используется как сенокос или пастбище, на ней успешно поселяется сосна. Спустя 30–40 лет на бывших пашнях формируются высокопродуктивные сосновые или смешанные с преобладанием сосны древостои. В тех случаях, когда пашня выводится из оборота через использование ее в качестве сенокоса или пастбища, она заселяется лиственными породами (в основном березой и осиной) [4]. В ходе естественного постагрогенного лесовосстановления изменяются общий запас и структура надземной и подземной фитомасс [5].

Естественный процесс восстановления зональной растительности приводит к изменению состояния старопахотных почв, что является важным фактором современной эволюции почв в РФ, а его изучение относится к актуальным вопросам почвоведения [6]. Ход почвообразовательного процесса на залежных землях во многом определяется историей формирования постагрогенных сообществ.

Освоение подтаежных лесов в Сибири началось не более 300 лет назад, а интенсивное формирование сельскохозяйственных угодий проходило в начале и в середине прошлого столетия. Практиковалось подсечное земледелие, предполагавшее короткий цикл использования пашни, после чего она забрасывалась. Под сельскохозяйственное освоение попадали южнотаежные травянистые типы лесов на наиболее плодородных серых почвах. В результате южная тайга была фрагментирована сельскохозяйственными угодьями с образованием антропогенно преобразованной подтаежной подзоны с островами лесостепи, которая имеет четкие дешифровочные признаки по наличию сельскохозяйственных земель. Прекращение сельскохозяйственного использования приводит к восстановлению естественных границ южной тайги.

Масштабы процессов лесовосстановления и их временная динамика могут быть оценены на основе данных дистанционного зондирования [7]. Дистанционные методы изучения почв актуальны в силу значительного охвата территории, оперативности получения данных, возможности проведения долговременного мониторинга. Материалы космической съемки успешно используются в почвоведении как зарубежными [8–10], так и отечественными исследователями [11, 12]. Однако важные для России вопросы постагрогенной трансформации почв и динамики залежных земель затронуты лишь в единичных публикациях [13, 14]. Большую роль в подобных исследованиях играет возможность сбора наземной информации о состоянии и эволюции почвенных покровов, необходимой для калибровки и валидации результатов спутникового мониторинга.

Цель данной работы — изучить направление постагрогенной эволюции почв лесостепной зоны Средней Сибири на примере разновозрастных сосняков Красноярского края с использованием сопряженного анализа спутниковых данных, материалов наземной радиометрической съемки и морфологического описания почвенных профилей.

Были рассмотрены следующие аспекты проблемы: вариативность спектральных признаков участков старопахотных почв по данным спутниковых снимков высокого и низкого разрешения (с учетом срока лесовосстановления и сукцессионных стадий); особенности строения профилей почв на выбранных участках (на основе наземной съемки профилей в ИК-диапазоне); временные тренды степени трансформации почв в процессе лесовосстановления.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Натурные исследования были проведены на серии тестовых полигонов в сосновых насаждениях лесостепной зоны Средней Сибири на территории стационара Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН «Погорельский бор» (56°24' с. ш., 92°59' в. д.). Исследования включали несколько этапов: 1) анализ спутниковых данных; 2) наземные полевые работы; 3) камеральную обработку полученных экспериментальных и дешифровочных данных и сопряженный анализ результатов.

Для изучения сукцессионных изменений старопахотных почв подобраны пробные площади, представляющие собой разновозрастные объекты, находящиеся на стадиях: травянистой, несомкнувшегося

лесовозобновления, молодняка, жердняка и средневозрастного насаждения. Ключевые участки выбрали в сходных почвенно-экологических условиях (восемь тестовых полигонов дешифрирования): 1, 5, 8 — нелесные участки на старопашотных почвах; 3, 4 — естественные средневозрастные сосняки и 2, 6, 8 — постагрогенные сообщества, участки лесовосстановления с древостоем сосны 12-, 50- и 7-летнего возраста соответственно. Сукцессионные стадии залежных земель дешифрировались по разновременным спутниковым снимкам за 40-летний период (1975–2015 гг.).

Временной ряд спутниковой информации был представлен съемками Landsat-5, 7, 8 (1975–2015 гг., база данных US Geological Survey; <http://earthexplorer.usgs.gov>); съемками высокого разрешения из каталога Google Earth (2000–2015 гг.); данными TERRA/Modis с разрешением 250–1000 м (1996–2015 гг., база данных Института леса СО РАН и NASA Land Processes Distributed Active Archive Center; [https://lpdaac.usgs.gov/data\\_access/data\\_pool](https://lpdaac.usgs.gov/data_access/data_pool)); съемками высокого разрешения (2,6 м) с российского аппарата «Ресурс-П» (июнь, 2015 г., банк данных Научного центра оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы»).

На основе снимков «Ресурс-П» был реализован векторный слой полигонов постагрогенного восстановления, который в дальнейшем использовался в качестве маски при классификации спутниковых изображений. Долговременный банк данных съемки Landsat (TM, ETM) позволил уточнить датировки, проследить стадии формирования постагрогенных сообществ на 40-летнем интервале и качественно оценить временную динамику спектральных признаков в «вегетационных каналах» (красный и ближний ИК-диапазоны). Расчет NDVI (нормализованной разности альбедо в красном и ближнем ИК-диапазонах) выполнялся на основе продукта TERRA/Modis MOD13Q1 с пространственным разрешением 250 м. Выборка NDVI была усреднена по 16-дневным периодам в течение мая–августа каждого года (по восемь значений за сезон).

В качестве классификационного критерия ( $k$ ) использовали отношение усредненных значений  $\langle \text{NDVI}_i \rangle$  анализируемого участка к среднему  $\langle \text{NDVI}_{\text{фон}} \rangle$  для фонового участка: к естественному лесному  $\left( k = \frac{\langle \text{NDVI}_i \rangle}{\langle \text{NDVI}_{\text{фон/лес}} \rangle} \right)$  или к непокрытому лесом участку/лугу  $\left( k = \frac{\langle \text{NDVI}_i \rangle}{\langle \text{NDVI}_{\text{фон/луг}} \rangle} \right)$ .

Дополнительно анализировалась вариативность радиоярких температур по данным в тепловом (11–12 мкм) ИК-диапазоне TERRA/Modis (продукт MOD11A1, пространственное разрешение 1000 м). Усредненные температуры за июнь, июль, август были восстановлены для каждого участка за 2000–2014 гг. Температурные режимы анализировались на трех полигонах: возобновление сосны, контрольный естественный лес, контрольная залежь без возобновления. Предполагалось, что с течением времени по мере лесовосстановления индекс различий температурных режимов ( $\Delta T_{\text{отн}}$ ) будет увеличиваться:

$$\Delta T_{\text{отн}} = \frac{|\langle T_i \rangle - \langle T_{\text{фон}} \rangle|}{\langle T_{\text{фон}} \rangle},$$

где  $\langle T_i \rangle$  — среднемесячная температура участка с различной стадией возобновления сосны;  $\langle T_{\text{фон}} \rangle$  — среднемесячная температура фонового участка, в качестве которого рассматривались покрытый естественным лесом и не покрытый лесом сельскохозяйственный участок.

Серия полевых подспутниковых экспериментов была проведена в течение вегетационного периода (июнь–сентябрь) 2012–2015 гг. Для всех тестовых полигонов были выполнены лесоводственные описания по стандартным методикам [15], заложены серии почвенных разрезов, морфологическое описание почв выполнено по общепринятым методикам [16]. Блок подспутниковых исследований позволил оценить физические свойства почв, распределение радиометрической температуры вдоль профиля ненарушенных и старопашотных почв. В дополнение использовался авторский метод анализа «тепловых портретов» почвенных профилей, полученных методом наземной радиометрической съемки почв в диапазоне ~11 мкм [17].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Дешифровочные признаки участков старопашотных почв.** Анализ отношений усредненных значений NDVI и полученный классификационный критерий ( $k$ ) позволили оценить динамику спектральных признаков исследуемых участков в течение 15-летнего периода восстановления, качественно охарактеризовать направление и скорость лесообразовательного процесса (рис. 1).

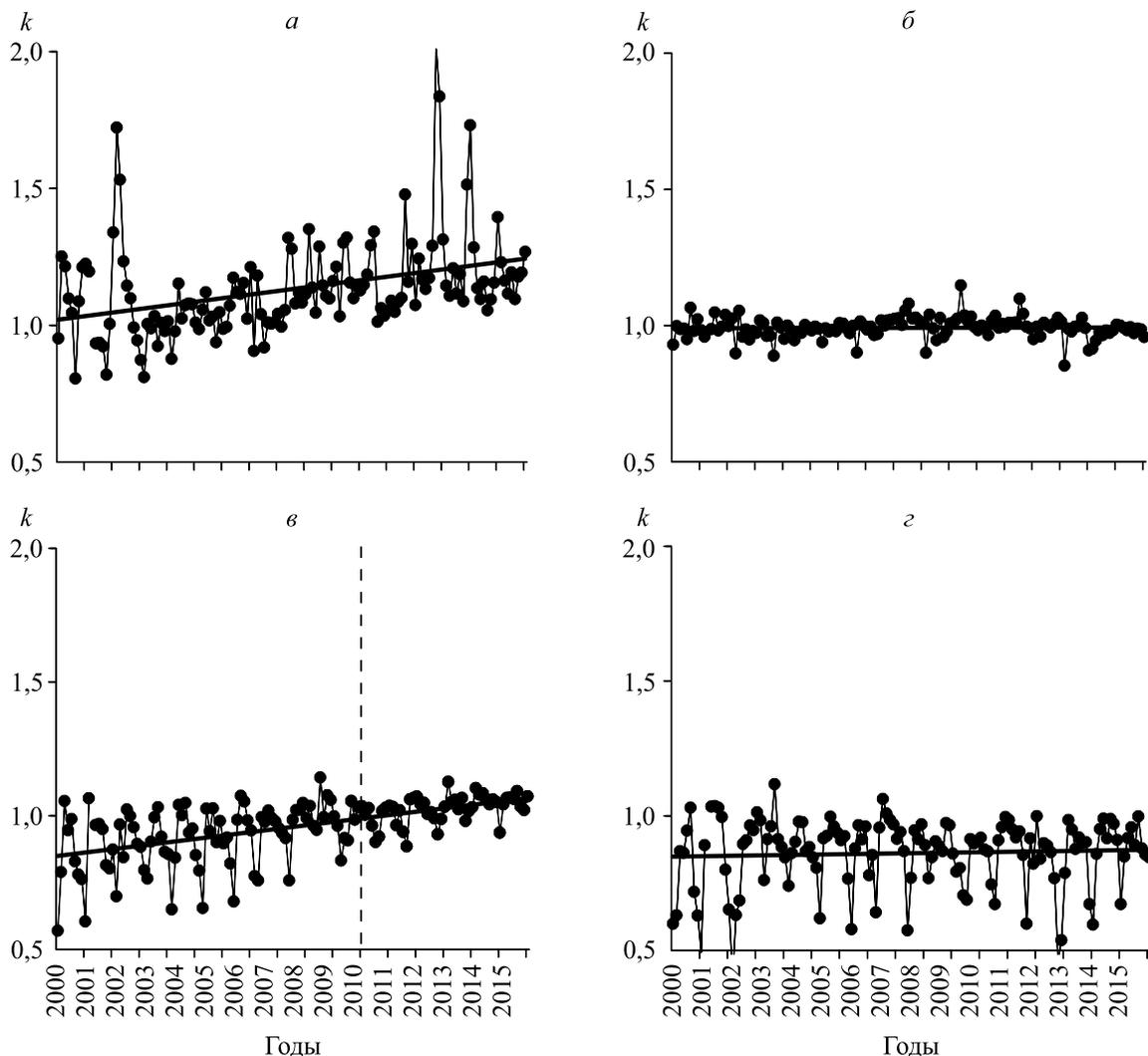


Рис. 1. Динамика отношения NDVI ( $k$ ) на участках старопахотных почв.

*a* — 12-летний сосняк и луг; *б* — 50-летний сосняк и естественный сосняк; *в* — 12-летний сосняк и естественный сосняк; *г* — многолетний луг и естественный сосняк.

Показатель  $k$  для участка несомкнувшегося соснового молодняка и залежи постоянно нарастал (см. рис. 1, *a*) при сохранении высокой внутрисезонной вариабельности значений. Напротив, для пары участков, близких по лесотаксационным характеристикам, таких как 50-летний сосняк на старопахотных почвах и естественный сосновый лес (см. рис. 1, *б*),  $k \rightarrow 1$ . По дешифровочным признакам сомкнутые сосняки 50-летнего возраста можно отнести к фоновым древостоям.

Сосновый сомкнувшийся 12-летний молодняк по своим характеристикам приближается к естественному сосняку (см. рис. 1, *в*). При этом ярко выражена точка фазового перехода между двумя этапами: период роста отношения  $k$  (2000–2009 гг.) и период, когда  $k \sim 1$ , т. е. снижение дешифровочных признаков между двумя участками (2010–2015 гг.). Кроме того, амплитуда сезонного колебания величины  $k$  существенно снижается и приближается к значениям, свойственным участкам с близкими лесотаксационными характеристиками (см. рис. 1, *б, в*). Такой фазовый переход и снижение амплитуды сезонных колебаний связаны с периодом смыкания крон молодняка и формирования однородной подстилающей поверхности, фиксируемой космической съемкой.

Наблюдается постоянный уровень вариабельности  $k$  для естественного леса (участок 3) и луга (участок 5) (см. рис. 1, *г*). Соотношение усредненных NDVI в течение срока наблюдений фактически не изменяется, при постоянных высоких сезонных колебаниях, обусловленных различиями в фенологических режимах в течение вегетационного периода.

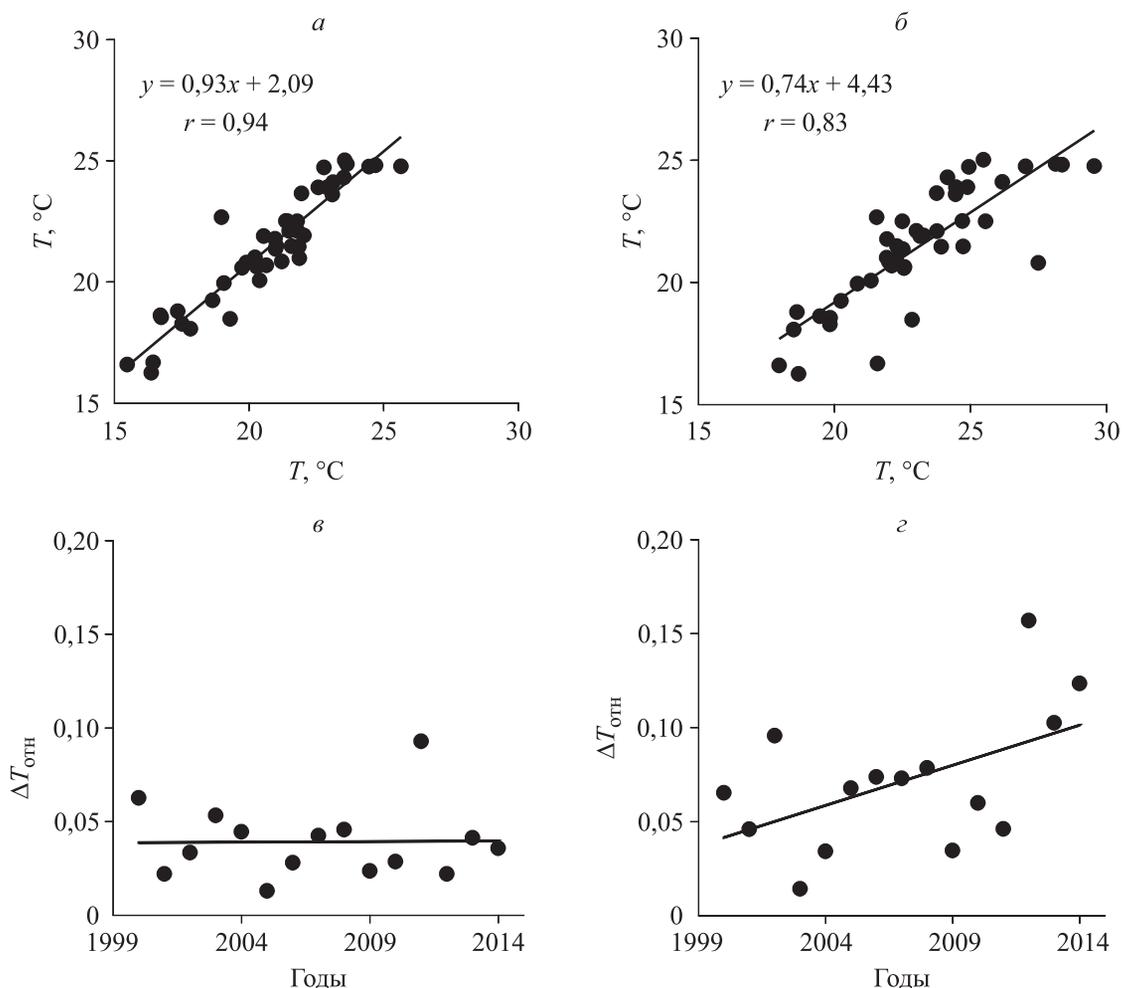


Рис. 2. Корреляционное поле температур летнего периода (июнь–август) на участках старопахотных почв.

*a* — 12-летний сосняк и естественный сосняк; *б* — 12-летний сосняк и луг. Индекс различия температурных режимов ( $\Delta T_{\text{отн}}$ ) участков, усредненный за период июнь–август: *в* — 12-летний сосняк и естественный сосняк, *з* — 12-летний сосняк и луг.

Изменение типа растительности на постагрогенных участках сопровождается закономерным изменением температурного режима почвы, что отражается и на скорости восстановительных процессов в почвах. Косвенно данный факт иллюстрирует динамика индекса различия температурных режимов ( $\Delta T_{\text{отн}}$ ) по спутниковым данным (рис. 2), а прямо — результаты наземной съемки почвенных профилей в ИК-диапазоне (рис. 3).

Существенных различий динамики температур летнего периода (июнь–август) для исследуемых тестовых полигонов не наблюдается. Временной ряд значений радиояростной температуры полигона 12-летнего соснового молодняка тесно коррелирует с данными для естественных сосняков ( $r = 0,94$ ) и луга ( $r = 0,83$ ). Различие проявляется лишь в значении коэффициента регрессии — 0,93 и 0,74 соответственно (см. рис. 2, *a*, *б*).

Значимые различия выявляются при анализе индекса  $\Delta T_{\text{отн}}$ , характеризующего временную динамику температурного режима. Величина индекса фактически оставалась постоянной на всем временном интервале при сравнении температурных режимов сосняков на ранних стадиях восстановления (участок 12-летнего сосняка) и участка естественного леса (см. рис. 2, *в*). Степень различия температурных режимов восстанавливающегося соснового участка и луга характеризуется качественно иным распределением с выраженным трендом роста (см. рис. 2, *в*, *з*).

**Свойства и степень трансформации почв.** Различия дешифровочных признаков (NDVI и температурного режима) определили локализацию наземных обследований. Для выделенных участков проанализированы особенности строения профилей почв.

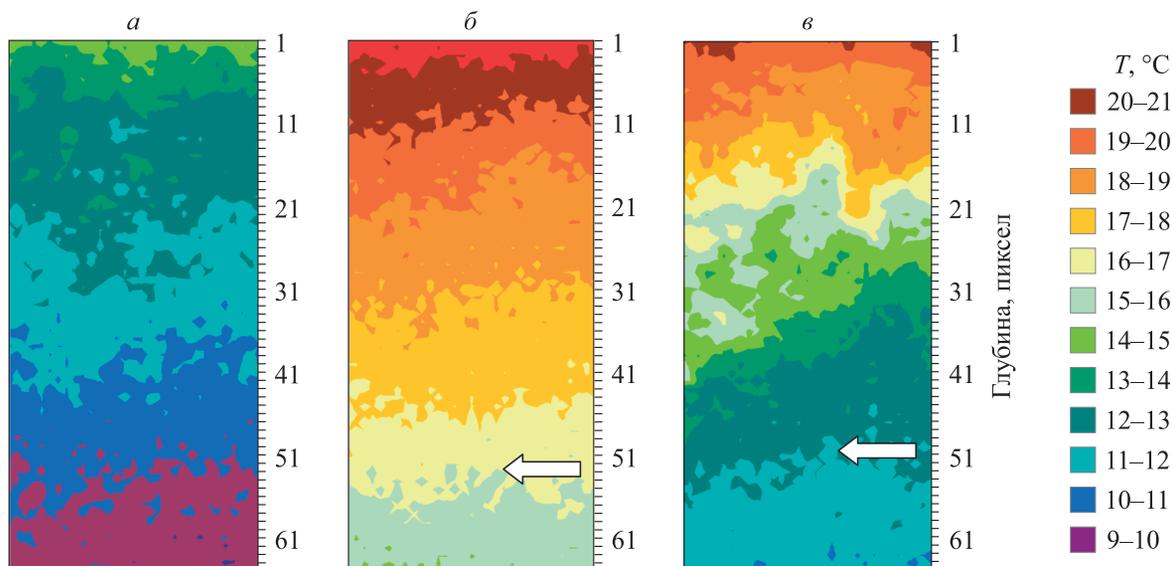


Рис. 3. Тепловые «портреты» профилей серой почвы (съемка в ИК-диапазоне) в естественном сосняке (а), старопашотной почвы на лугу (б), старопашотной почвы под 50-летним сосняком (в).

Стрелками указаны границы пахотного горизонта. 1 пиксел = 0,5 × 0,5 см.

Фоновые исходные почвы на исследуемой территории представлены темно-серыми, серыми, дерново-подзолистыми, имеющими типичное строение почвенного профиля. После сельскохозяйственного освоения лесной территории почвы приобрели специфичное строение (пахотный горизонт) и могут быть отнесены к отделу агроземов [18, 19]. Анализ старопашотных почв в постагрогенный период показал, что степень трансформации почвенного профиля на зарастающих древесной растительностью участках значительно выше, чем на старопашотных почвах на стадии луга. Пахотный горизонт в почвенном профиле на лугу длительное время сохраняется (пахотный слой имеет мощность 25–30 см, комковатую структуру, ясно выраженную границу с нижележащим текстурным горизонтом и макроморфологическую однородность). Основные изменения затрагивают область проникновения корней травянистой растительности, в результате чего формируется дерновый горизонт в верхней (5–10 см) толще реликтового пахотного горизонта профиля с плотностью сложения 1,10–1,25 г/см<sup>3</sup>.

Заращение залежей лесом и формирование дендроценозов определяют дальнейшее образование органогенных и органо-аккумулятивных горизонтов. Под воздействием молодняков сосны в возрасте от 7 до 12 лет на поверхности почвы залежей лесостепной зоны Красноярского края начинает фрагментарно формироваться подстилка мощностью 1–2 см, плотностью 0,20–0,25 г/см<sup>3</sup>, снижается плотность верхнего (10 см) слоя почвы (от 1,12 г/см<sup>3</sup> на залежи 7 лет до 0,78 г/см<sup>3</sup> на 12-летней). По мере роста древостоев, смены состава растительного сообщества и изменения микроклиматических условий трансформация старопашотных почв усиливается. На бывших залежных землях в восстановившемся 50-летнем сосняке наблюдается значительная дифференциация старопашотного горизонта. Органо-генный горизонт стратифицирован на подгоризонты, имеет неровные границы с выраженными крупными локусами в нижней части данного горизонта, сформированными в результате проникновения в нижележащие слои почвы крупных древесных корней. Наблюдается переорганизация почвенной толщи в пределах вновь образованного дернового горизонта, улучшение структурного состояния почвы и увеличение пористости, снижение плотности до 0,68 г/см<sup>3</sup>. Бывшая пахотная почва приобретает строение, близкое к структуре естественной серой почвы, т. е. почвообразование идет по лесному типу. Однако даже в течение 50-летней трансформации в почвенном профиле еще сохраняются признаки агрогенного воздействия. При экспертном морфологическом анализе нижняя граница реликтового пахотного горизонта не прослеживается, так как она существенно размыта. Детектировать ее позволяют материалы наземной радиометрической съемки в тепловом диапазоне, на которых один из порогов температурного поля соответствует границе слоя на характерной для пахотного горизонта глубине (см. рис. 3).

Анализ тепловых полей почвенных профилей позволил зафиксировать существенные отличия в степени прогревания почвенного профиля как следствие различий по физическим свойствам почв и особенностей теплопереноса. Кроме того, температурные градиенты иллюстрируют большую дифференциацию почвенного профиля под восстанавливающимися сосняками по сравнению с почвами естественного леса (см. рис. 3, а, в).

Таким образом, лесовосстановление на залежных землях приводит к формированию в профиле генетических горизонтов, аналогичных фоновым лесным почвам. Как следствие, активируются процессы восстановления экологических функций почв. В настоящее время с учетом масштабов сокращения площадей сельскохозяйственных земель и зарастания их лесом можно говорить о том, что в перспективе возможно восстановление зональной структуры почвенного покрова.

Анализ тепловых полей почвенных профилей по данным наземной ИК-съемки позволил выявить изменения в строении профилей и структуры горизонтов, которые мы связываем с особенностями различных вариантов зарастания — луговой или лесной растительностью (см. рис. 3).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вариативность дешифровочных спектральных признаков участков старопашотных почв на спутниковых снимках высокого и низкого разрешения определяется сроком лесовосстановления и сукцессионными стадиями. Классификационный критерий ( $k$ ) на основе вегетационного индекса теряется к 50-летнему возрасту насаждения,  $k \rightarrow 1$  для пары участков, близких по лесотаксационным характеристикам. В целом процесс лесовосстановления сопровождается ростом отношения  $k$  анализируемого полигона и контрольной залежи и значительным снижением амплитуды сезонных колебаний.

Динамика температур, усредненных за период июнь–август, участков зарастающей сосной залежи и луга характеризуется трендами роста индекса различия температурных режимов  $\Delta T_{\text{отн}}$ , что не проявляется в случае сравнения для участков 12-летнего (и старше) сосняка и естественного соснового древостоя. В старопашотных почвах на стадии луга сохраняется строение пахотного горизонта. Изменения наблюдаются только в виде формирования дернового горизонта в верхней (5–10 см) толще профиля.

В долгосрочной перспективе (не менее 50 лет) бывшие пахотные почвы под сосняками лесостепи приобретут строение, характерное для естественных серых почв, т. е. почвообразование будет происходить по лесному типу. При этом в почвенном профиле под восстанавливающимися сосняками сохраняются признаки агрогенного воздействия в виде ровной нижней границы пахотного горизонта.

*Работа выполнена по теме базового проекта (0356-2016-0706) при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (14-04-00858, 17-04-00589 А, 17-41-240475\_p\_a).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уткин А. И., Гульбе Т. А., Гульбе Я. И., Ермолова Л. С. О наступлении лесной растительности на сельскохозяйственные земли в Верхнем Поволжье // Лесоведение. — 2002. — № 5. — С. 44–52.
2. Люри Д. И., Горячкин С. В., Караваева Н. А., Щенисенко Е. А., Нефедова Т. Т. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. — М.: ГЕОС, 2010. — 416 с.
3. Коровин Г. Н., Нефедьев В. В., Зукерт Н. В., Голованов А. С. Ретроспективный анализ породно-возрастной структуры лесов // Разнообразие и динамика лесных экосистем России. — М.: КМК, 2012. — Кн. 1. — С. 16–53.
4. Шишкин А. С., Огнев Р. Ю. Освоение косулей заброшенных сельскохозяйственных угодий в Восточном Забайкалье // География и природ. ресурсы. — 2013. — № 3. — С. 185–188.
5. Телеснина В. М. Постагрогенная динамика растительности и свойств почвы в ходе демулационной сукцессии в южной тайге // Лесоведение. — 2015. — № 4. — С. 293–306.
6. Владыченский А. С., Телеснина В. М., Иванько М. В. Изменение гумусного состояния лесных почв европейской территории и Сибири при выводе из сельскохозяйственного использования // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. — 2006. — № 3. — С. 3–10.
7. Барталев С. А., Исаев А. С., Лупян Е. А. Современные приоритеты развития мониторинга бореальных экосистем по данным спутниковых наблюдений // Сиб. экол. журн. — 2005. — Т. 12, № 6. — С. 1039–1054.
8. Dobos E., Micheli E., Baumgardner M. F., Biehl L., Helt T. Use of combined digital elevation model and satellite radiometric data for regional soil mapping // Geoderma. — 2000. — Vol. 97. — P. 367–391.

9. **Ali R. R., Koth M. M.** Use of satellite data and GIS for soil mapping and capability assessment // Nature and Science. — 2010. — Vol. 8 (8). — P. 104–115.
10. **Osicska-Skotak K.** Studies of soil temperature on the basis of satellite data // International Agrophysics. — 2007. — Vol. 21 (3). — P. 275–284.
11. **Кравцова В. И.** Космические методы исследования почв. — М.: Аспект Пресс, 2005. — 190 с.
12. **Савин И. Ю., Симакова М. С.** Спутниковые технологии для инвентаризации и мониторинга почв в России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2012. — Т. 9, № 5. — С. 104–115.
13. **Маринина О. А., Терехин Э. А., Кириленко Ж. А., Курлович Д. М., Ковальчик Н. В.** Особенности дистанционного выявления залежных участков и проблемы целевого использования земель сельскохозяйственного назначения // Современные проблемы науки и образования. — 2013. — № 5. — С. 535.
14. **Сорокина Н. П., Козлов Д. Н., Кузнецова И. В.** Оценка постагрогенной трансформации дерново-подзолистых почв: картографическое и аналитическое обследование // Почвоведение. — 2013. — № 10. — С. 1193–1205.
15. **Анучин Н. П.** Лесная таксация: Учебник для вузов. — М.: Лесн. пром-сть, 1981. — 552 с.
16. **Добровольский В. В.** Практикум по географии почв с основами почвоведения: Учебное пособие для вузов. — М.: Гуманитарный центр «ВЛАДОС», 2001. — 144 с.
17. **Пономарёва Т. В., Пономарёв Е. И.** Радиометрическая съемка почвенного профиля в инфракрасном диапазоне // Почвоведение. — 2016. — № 2. — С. 219–226.
18. **Шишов Л. Л., Тонконогов В. Д., Лебедева И. И., Герасимова М. И.** Классификация и диагностика почв. — Смоленск: Ойкумена, 2004. — 342 с.
19. **IUSS Working Group WRB.** 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports N 106. — Rome: FAO, 2015 [Электронный ресурс]. — <http://www.fao.org/3/a-i3794e.pdf> (дата обращения 30.01.2017).

*Поступила в редакцию 8 февраля 2017 г.*