

УДК 631.432+550.837.3:550.822.5
<https://doi.org/10.31251/pos.v9i1.330>



Интегральная диагностика серых почв и их трансформация при агропедогенезе

© 2026 А. А. Козлова ^{1,2}, Ч. Г. Гюлялыев ^{3,4}

¹ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет», ул. Карла Маркса, 1, г. Иркутск, 664003, Россия. E-mail: allak2008@mail.ru

²ФГБУН Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, ул. Улан-Баторская, 1, г. Иркутск, 664033, Россия.

³Институт географии Министерства науки и образования Азербайджанской Республики, ул. Г. Джавида, 31, г. Баку, AZ1143, Азербайджан. E-mail: ch_gulaliyev@yahoo.com

⁴Ленкоранский государственный университет, ул. Ази Асланова, 50, г. Ленкорань, AZ4200, Азербайджан

Цель исследования. Провести интегральную диагностику серых почв и оценить трансформацию их свойств при агрогенном использовании.

Место и время проведения. Исследования проводили на серых почвах (Haplic Phaeozems), расположенных в пределах учебного хозяйства «Молодёжный» Иркутского государственного аграрного университета им. А.А. Ежевского (Иркутская область, юг Восточной Сибири). Объекты исследования представлены целинным и длительно распаханым (свыше 45 лет использования) участками.

Методы. Проведено морфологическое описание почвенных профилей, определение валового химического (рентгенофлуоресцентный анализ) и гранулометрического состава почв, содержания органического углерода, группового состава железа, показателей агрохимических свойств, а также измерение удельного электрического сопротивления почв с использованием прибора LandMapper-03 методом горизонтального электрического профилирования.

Основные результаты. Установлено, что под влиянием агрогенных факторов произошла выраженная трансформация почвенного профиля: гомогенизация верхних горизонтов, упрощение морфологического строения, снижение содержания гумуса и обменных катионов, подкисление пахотного слоя и утяжеление гранулометрического состава. Среди несиликатных форм железа доминировали окристаллизованные. Рентгенофлуоресцентный анализ выявил изменение валового химического состава почв, особенно полуторных оксидов, при снижении содержания кремнезёма, что сопровождалось выравниванием профиля по валовому содержанию элементов и уменьшением дифференциации горизонтов. Анализ подвижных форм питательных элементов показал снижение содержания нитратного азота и фосфора в пахотном слое. Измерения удельного электросопротивления подтвердили его зависимость от содержания ила, гумуса и полуторных оксидов; значения электросопротивления в пахотной почве ниже и менее дифференцированы по профилю, чем в целинной.

Заключение. Агрогенная трансформация серых почв сопровождается гомогенизацией верхнего слоя, уменьшением варибельности физико-химических свойств и выравниванием электрофизических показателей. В результате эрозионных процессов, выноса питательных веществ с урожаем и припахивания нижележащих горизонтов отмечается снижение содержания гумуса и обменных катионов в пахотном слое, его подкисление, а также сокращение доли аморфных форм железа. Результаты демонстрируют важность комплексного подхода, объединяющего традиционные аналитические и геофизические методы, и могут быть использованы при моделировании свойств почв и оптимизации агротехнологий в системах адаптивно-ландшафтного земледелия.

Ключевые слова: пространственная изменчивость; серые почвы (Haplic Phaeozems); агропедогенез; физико-химические свойства; электросопротивление; целина; пашина.

Цитирование: Козлова А.А., Гюлялыев Ч.Г. Интегральная диагностика серых почв и их трансформация при агропедогенезе // Почвы и окружающая среда. 2026. Том 9. № 1. e330. DOI: [10.31251/pos.v9i1.330](https://doi.org/10.31251/pos.v9i1.330)

ВВЕДЕНИЕ

Агропедогенез – сложный процесс, складывающийся из изменений как подвижных (мобильных), так и стабильных (фундаментальных) свойств почв, определяющих вектор направленности эволюции агрогенных почв, их потенциального плодородия (Чупрова, Кураченко, 2018). Агрогенное воздействие может оказывать неоднозначное влияние на свойства почв, как в сторону гомогенизации пахотного горизонта (Муха, 2004), так и в направлении усиления их пространственной гетерогенности (Байбеков, 2003; Караваева и др., 2003; Каюгина, Ерёмин, 2022;

Mulla, Schepers, 1997; Shoshany et al., 2013; Stover, Henry, 2018). Эффективное изучение агрогенной трансформации свойств почв, их пространственной неоднородности требует применения современных геостатистических методов, таких как: кригинг, вариограммный анализ, методы пространственной интерполяции (Goovaerts, 1999; Zhang et al., 2011; Bazzi et al., 2015; Velamala, Pant, 2024). Они позволяют выявить закономерности распределения почвенных характеристик в пространстве, их изменение при агрогенном воздействии, что даст возможность обосновать подходы к дифференцированному землепользованию. Кроме того, зарубежные исследования (McBratney et al., 2003; Zuber, Villamil, 2016) демонстрируют высокую эффективность цифрового картографирования почв.

Актуальность данной темы обусловлена необходимостью адаптации современных подходов к более глубокому пониманию процессов развития почв и их трансформации под влиянием сельскохозяйственной деятельности. Известно, что длительное агрогенное воздействие сопровождается заменой естественной растительности на культурные растения, регулярной обработкой почвы, внесением удобрений, мелиорантов, гербицидов и пестицидов. Эти факторы приводят к упрощению профиля, что ведет, с одной стороны, к снижению естественной variability свойств и формированию агрогумусового горизонта с новыми характеристиками. С другой стороны, изначально малая мощность гумусового горизонта осваиваемых из-под леса почв, влечет неизбежное включение в распашку нижележащих горизонтов, что может способствовать усилению гетерогенности почвенных свойств (Караваева и др., 2003; Лебедева и др., 2005).

Цель исследования – провести интегральную диагностику серых почв и оценить трансформацию их свойств при агрогенном использовании.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования послужили серые почвы (Классификация ..., 2004), что соответствует *Haeplic Phaeozems* (Единый государственный ..., 2014; IUSS Working Group WRB ..., 2015). Почвы расположены на территории учебного хозяйства «Молодёжный» Иркутского государственного аграрного университета имени А. А. Ежевского (Иркутская область, юг Восточной Сибири). Почвы изучали в двух состояниях – целинном и пахотном, что позволило оценить степень их трансформации под воздействием агропедогенеза. Серые почвы региона отличаются сравнительно высоким естественным плодородием, однако, как почвы, сформировавшиеся под лесной растительностью и обладающие маломощным гумусовым горизонтом, они весьма чувствительны к антропогенным нагрузкам. Их интенсивное сельскохозяйственное использование без должного агротехнического сопровождения приводит к заметному уплотнению гумусового горизонта, снижению содержания гумуса и обменных катионов, ухудшению физико-химических и водно-физических свойств (Шапорина и др., 2018; Шапорина, Сайб, 2020; Якименко и др., 2020).

Территория исследования находится на юго-восточной окраине города Иркутска, в пределах лесостепной зоны (рис. 1). Лесостепные участки представлены чередованием берёзовых и берёзово-осиновых лесов с хорошо развитым травяным покровом, под которыми формируются серые почвы. По сравнению с европейской частью России, местные лесостепи отличаются меньшим разнообразием листовых пород и преобладанием светлохвойных и мелколиственных формаций (Копосов, 1983). Серые почвы развиваются на положительных элементах рельефа, сложенных четвертичными отложениями, генетически связанными с юрскими песчаниками, сланцами, а также озёрными и речными наносами. Почвообразование приурочено к вершинам и склонам водоразделов и увалов, террасам среднего и высокого уровней. Для юга Иркутской области характерны, преимущественно, неподзоленные разновидности серых почв с невыраженной текстурной дифференциацией профиля (Кузьмин, 1988).

Для полевых исследований были заложены два почвенных разреза, расстояние между которыми составило около 50 м:

№ 1 (целина) – расположен в злаково-бобовом березняке с примесью осоки стоповидной ($52^{\circ}13'38''$ с. ш., $104^{\circ}25'17''$ в.д., высота 477 м над уровнем моря). Целинная почва характеризуется маломощным гумусовым горизонтом АУ, включающим подстилку и дернину, который вместе с горизонтом АЕЛ составляет 21 см (рис. 1 А). На поверхности почвенных агрегатов наблюдается тонкая кремнеземистая присыпка (скелетаны), признаки подзолистости выражены слабо. Формула профиля: АУ–АЕЛ–БЕЛ–ВТ–С, тип почвы – серая типичная (Классификация ..., 2004).

№ 2 (пашня) – расположен на склоне пологого увала западной экспозиции с уклоном $2-3^{\circ}$, являющегося наветренной и хорошо увлажняемой частью местности ($52^{\circ}13'35''$ с. ш., $104^{\circ}25'19''$ в.д.,

высота 473 м над уровнем моря). Разрез заложен на свежевспаханной старой пашне, используемой более 45 лет (рис. 1 Б). В процессе распашки и выравнивания поверхности произошло частичное механическое перемешивание верхних горизонтов (AEL и BEL), что привело к формированию гомогенизированного пахотного слоя мощностью 0–35 см; таким образом, в профиле отсутствует их чёткая морфологическая выраженность. Формула профиля: P–BT–C, тип почвы – агрозем текстурно-дифференцированный (Классификация ..., 2004).



Рисунок 1. Местоположение объектов исследования: ● – обозначение точек закладки разрезов; А – фото лесного ландшафта и целинной почвы разреза № 1; Б – фото агроландшафта и пахотной почвы разреза № 2.

Как видно из приведённого морфологического описания разрезов, при распашке целинная почва подверглась значительной трансформации: верхние горизонты не были удалены, а вошли в состав единого гомогенизированного пахотного слоя. Из каждого генетического горизонта почвенного профиля классическим способом были отобраны образцы для лабораторного анализа. Для статистической достоверности показателей подвижных свойств из верхнего слоя (0–20 см) почвенным буром дополнительно отобраны пробы в десятикратной повторности. В образцах почв общепринятыми в почвоведении классическими и современными методами (Агрохимические методы ..., 1975; Теория и практика ..., 2006) с использованием сертифицированного оборудования аккредитованных лабораторий Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН и Института геохимии им. В.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск), а также кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов Иркутского государственного университета определили следующие показатели: валовой химический состав – рентгенофлуоресцентным методом (TXRF); гранулометрический состав – ускоренным пиррофосфатным методом по Качинскому; содержание органического углерода – по

Тюрину; обменные Ca^{2+} и Mg^{2+} – титриметрическим методом по Каппену-Гильковицу; pH водной и солевой суспензий – потенциометрически; гидролитическую кислотность (H^+) – методом Каппена; несиликатное железо (Fe_{nc}) – методом Мера-Джексона; аморфное железо (Fe_{a}) – методом Тамма с последующим атомно-абсорбционным определением; подвижные формы азота (аммонийный – по Несслеру, нитратный – по Грандваль-Ляжу); подвижный фосфор и обменный калий – по методу Кирсанова.

Дополнительно в полевых условиях измеряли стационарное электрическое поле (СЭП) почв с помощью прибора LandMapper-03, используемого для экспресс-оценки электрофизических свойств почвенной толщи и как индикатора неоднородности (Поздняков, 2001, 2009; Поздняков, Гюлалыев, 2004; Березин, Карпачевский, 2009). Измерения проводили методом горизонтального электрического профилирования (ГЭП) до глубины 120 см.

Статистический анализ данных выполнили с использованием программных пакетов Golden Surfer v. 8 и Statistica v. 6.0. Метод интерполяции крикингом применили для построения карт пространственного распределения показателей и определения закономерностей их вариации в условиях различного землепользования. Для оценки различий между целинной и пахотной почвами применили t-критерий Стьюдента (при нормальном распределении), U-критерий Манна-Уитни (для ненормальных распределений), а также однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Корреляционные зависимости вычислили по коэффициентам Пирсона и Спирмена.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Стабильные (фундаментальные) свойства почв представляют собой такие характеристики, которые сохраняются на протяжении длительных периодов времени и определяют направление и интенсивность почвообразовательных процессов (Чупрова, Кураченко, 2018). К числу наиболее информативных относятся валовой химический и гранулометрический состав почвы, так как именно они отражают литогенную основу почвообразования и долговременные трансформации при антропогенном воздействии. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа (табл. 1) позволили установить существенные различия в валовом химическом составе почв, находящихся в условиях целины и длительно используемой пашни.

Таблица 1

Валовой химический состав и содержание ила в целинной и пахотной почвах, %

Горизонт, глубина (см)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	п.п.п	Сум-ма	Ил
Разрез № 1 (целина). Серая типичная													
AY, 3-8	62,1	13,2	5,30	0,82	0,11	2,20	2,08	2,50	1,85	0,30	9,33	99,8	12
AEL, 8-21	62,5	13,5	5,56	0,83	0,11	2,28	2,00	2,46	1,81	0,27	8,47	99,8	12
BEL, 21-32	62,5	12,6	5,25	0,89	0,20	2,03	2,07	2,53	1,71	0,42	9,57	99,9	11
BT, 32-75	65,3	13,6	5,41	0,90	0,10	2,25	2,08	3,21	1,86	0,30	4,79	99,8	12
C, 75-100	60,9	15,1	6,61	0,88	0,10	3,05	2,11	2,70	1,87	0,21	6,37	99,9	20
Разрез № 2 (пашня). Агрозем текстурно-дифференцированный													
P, 0-35	59,5	15,9	6,71	0,91	0,18	2,42	1,93	1,97	1,82	0,28	8,33	99,9	25
BT, 35-65	60,5	16,5	6,38	0,91	0,11	2,61	1,89	2,08	1,95	0,19	6,68	99,8	23
C, 65-84	61,1	16,3	6,16	0,95	0,10	2,55	1,86	1,86	2,01	0,19	6,65	99,7	28

Примечание.

п.п.п. – потеря при прокаливании (характеризует содержание органического вещества и гидратов).

Серая почва целинного участка характеризуется относительно равномерным распределением основных оксидов по профилю, что указывает на слабую выраженность процессов элювиально-иллювиальной дифференциации. В отличие от этого, в пахотной почве, подвергшейся многолетнему агрогенному воздействию, наблюдается перераспределение валовых элементов, сопровождающееся снижением содержания кремнезёма и относительным увеличением концентрации полутонких оксидов (Fe_2O_3 , Al_2O_3), что отражает изменение гидротермического режима и усиление процессов минерализации. Таким образом, полученные результаты подтверждают, что агропедогенез вызывает гомогенизацию верхних горизонтов, усиление минерализованности пахотного слоя и ослабление текстурной дифференциации профиля. Эти изменения свидетельствуют о перестройке структурно-химической организации почвенного тела, направленной в сторону выравнивания элементного состава и увеличения однородности почвенной толщи.

Установлено, что в профиле целинной почвы (разрез № 1) наблюдается относительная однородность распределения большинства химических элементов, за исключением горизонта ВТ, где фиксируется локальное повышение содержания SiO_2 , MnO и P_2O_5 . В нижележащих горизонтах отмечается умеренное накопление полуторных оксидов (Fe_2O_3 и Al_2O_3). При этом классическая элювиально-иллювиальная дифференциация, характерная для текстурно-дифференцированных почв, выражена слабо. Не наблюдается чёткой миграции полуторных оксидов из верхних горизонтов (AEL, BEL) и их аккумуляции в иллювиальном горизонте (BT), что связано с замедленностью процессов оподзоливания в условиях континентального и относительно засушливого климата региона (Кузьмин, 1988; Козлова, 2021).

Профиль пахотной почвы (разрез № 2), находящейся под длительным агрогенным воздействием, характеризуется иным распределением элементов. Отмечается снижение содержания SiO_2 и повышение концентрации полуторных оксидов (Fe_2O_3 и Al_2O_3) по сравнению с целинной почвой, что, вероятно, связано с усилением процессов выветривания и почвообразования, обусловленным изменением гидротермического режима после распашки и увеличением амплитуды его сезонных колебаний (Муха, 2004). По-видимому, в результате длительной сельскохозяйственной эксплуатации произошёл вынос подвижных форм кремния и последующая вторичная аккумуляция соединений железа и алюминия, находящихся в свободном состоянии.

Что касается биофильных элементов и органического вещества, то в пахотной почве отмечается устойчивое снижение концентрации CaO и P_2O_5 по сравнению с целинной, что может свидетельствовать о выносе кальция и фосфатов растениями в процессе сельскохозяйственного использования. Потеря при прокаливании (п.п.п.), отражающая содержание органического вещества, также оказалась меньшей в пахотной почве, что указывает на увеличение в ней минеральной составляющей и уменьшение доли органической фазы. В целом, агрогенная трансформация серой почвы сопровождается усилением минеральной основы, перераспределением отдельных элементов, снижением степени профильной дифференциации и формированием более гомогенизированного пахотного слоя. Для более детальной оценки различий между целинной и пахотной почвами был проведён вариационный анализ данных рентгенофлуоресцентного определения валового химического состава (табл. 2).

Таблица 2

Результаты вариационного анализа содержания химических элементов в целинной и пахотной почвах, %

Элемент	Целина			Пашня		
	Среднее	Станд. отклонение	Вариация	Среднее	Станд. отклонение	Вариация
SiO_2	62,98	1,02	1,04	60,37	0,81	0,66
Al_2O_3	13,4	1,12	1,25	16,23	0,38	0,14
Fe_2O_3	5,63	0,18	0,03	6,42	0,27	0,07
TiO_2	0,87	0,03	0,00	0,92	0,02	0,00
MnO	0,13	0,05	0,00	0,13	0,04	0,00
MgO	2,16	0,39	0,15	2,53	0,09	0,01
CaO	2,04	0,05	0,00	1,89	0,11	0,01
Na_2O	2,68	0,31	0,10	2,00	0,06	0,00
K_2O	1,84	0,06	0,00	1,93	0,07	0,00

Полученные значения среднего содержания элементов и коэффициентов вариации демонстрируют как общую сохранность минеральной основы почвы, так и наличие специфических изменений, обусловленных длительным антропогенным воздействием. Высокая степень корреляции между основными элементами подтверждает, что агрогенное использование не приводит к полной перестройке валового химического состава почв, а в большей степени влияет на пространственное распределение и вариабельность отдельных компонентов, сглаживая вертикальные различия и усиливая внутривертикальную однородность.

Для установления характера пространственного распределения отдельных свойств почв использовался метод кригинга (метод ближайшего соседа), позволивший визуализировать изолинии распределения гранулометрического состава и содержания гумуса (рис. 2).

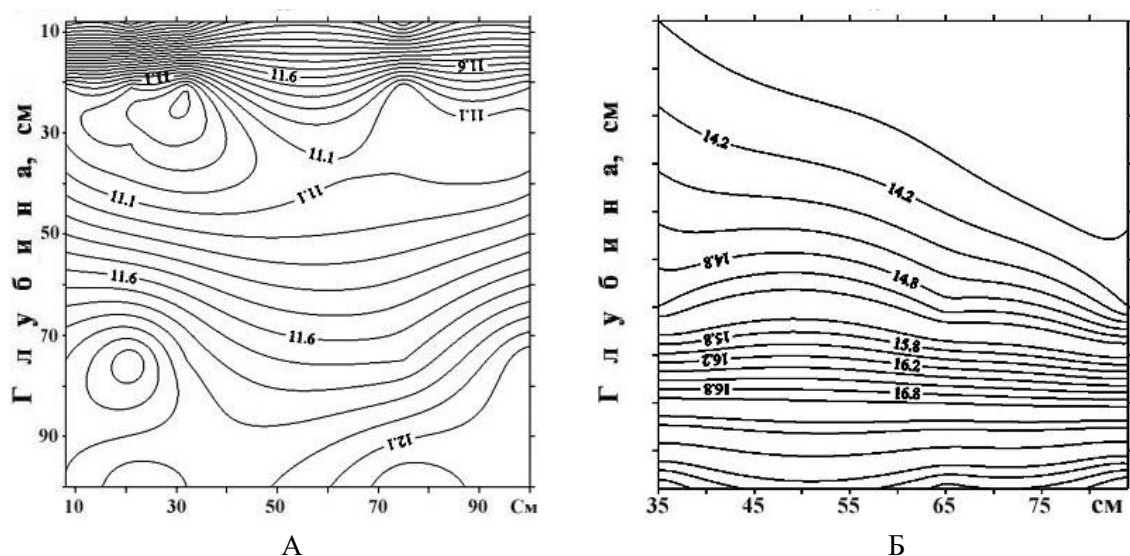


Рисунок 2. Изоплеты пространственного распределения илистой фракции (размером <0,001 мм в %) гранулометрического состава по профилю почв: А – разрез № 1 (целина); Б – разрез № 2 (пашня).

Гранулометрический анализ показал, что как целинная, так и пахотная почвы имеют среднесуглинистый состав, относительно равномерно распределённый по профилю, с преобладанием крупнопылеватой фракции. Однако в целинной почве (рис. 2А) наблюдается более выраженная вариация содержания илистой фракции, особенно в горизонте BEL, где фиксируется её локальное накопление. При этом коэффициент текстурной дифференциации (КТД) составляет менее 1, что указывает на слабую элювиально-иллювиальную дифференциацию профиля и относительную однородность минерального субстрата. В пахотной почве (рис. 2Б) распределение илистой фракции более однородное, что свидетельствует о гомогенизации верхнего слоя вследствие механического перемешивания при обработке почвы. Это указывает на то, что агрогенные процессы (распахивание и механическое воздействие) способствуют гомогенизации пахотного слоя и еще более снижают текстурную дифференциацию профиля почвы.

Подвижные (мобильные) свойства почв характеризует способность химических элементов переходить из твёрдой фазы почвы в жидкую (Чупрова, Кураченко, 2018), перемещаться по профилю вместе с влагой и становиться доступными растениям. К подвижным свойствам относятся актуальная и потенциальная кислотность, содержание обменных катионов, несиликатных форм железа (аморфных и кристаллических), а также уровни подвижных питательных элементов. Реакция среды целинной почвы является слабокислой в дерновом горизонте и постепенно усиливается по мере углубления профиля (табл. 3).

Таблица 3

Некоторые свойства целинной и пахотной почв

Горизонт, глубина (см)	pH H ₂ O	pH KCl	Гумус, %	Обменные катионы, мг-экв/100 г почвы			Fe _{вал} , %	от Fe _{вал} , %		
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	H ⁺		Fe _{нс}	Fe _{окр}	Fe _а
Разрез № 1 (целина). Серая типичная										
AY, 3–8	6,0	5,5	4,40	20,4	9,0	1,83	5,97	38	21	17
AEL, 8–21	4,8	4,0	2,50	19,6	9,0	5,25	5,83	27	12	15
BEL, 21–32	4,8	3,6	1,88	10,6	10,4	3,41	5,68	29	12	17
BT, 32–75	5,3	3,7	0,57	10,2	13,3	1,92	5,99	28	11	17
C, 75–100	5,6	3,8	0,53	15,2	18,2	1,57	7,07	23	6	17
Разрез № 2 (пашня). Агрозем текстурно-дифференцированный										
P, 0–35	5,2	3,9	1,67	20,6	9,4	2,36	7,31	32	25	7
BT, 35–65	5,6	3,8	0,46	14,8	10,1	1,31	6,83	26	22	4
C, 65–84	6,0	4,1	0,45	12,8	13,2	1,05	6,59	24	21	3

Примечание.

Содержание железа: Fe_{вал} – валового, Fe_{нс} – несиликатного, Fe_{окр} – окристаллизованного, Fe_а – аморфного.

В пахотной почве наиболее кислой оказалась верхняя часть пахотного слоя. Это связано с тем, что при освоении данного типа почв в распашку были вовлечены более кислые подповерхностные горизонты. С увеличением глубины реакция среды постепенно смещается в сторону нейтральной, что обусловлено минеральным составом почвообразующих пород и снижением влияния органогенного вещества.

Целинная почва характеризуется наибольшим содержанием гумуса в верхнем дерновом горизонте (до 4,4%), мощность которого составляет около 8 см. Ниже, в горизонте AEL, содержание гумуса резко уменьшается (до 2,5%), а в горизонте BT и материнской породе едва достигает 0,5%. Подобное распределение органического вещества типично для серых почв региона и связано с высокой концентрацией корней растений в верхней части профиля. Более глубокое проникновение корневой системы ограничено низкими температурами почвы.

В агрогенной почве содержание гумуса заметно ниже – менее 2% в пахотном слое. Основной причиной такого снижения является малая мощность гумусового горизонта в исходной целинной почве, что при распашке привело к включению в пахотный слой менее плодородных подстилающих горизонтов. Дополнительно потере гумуса способствуют ускоренные процессы минерализации органического вещества, обусловленные изменением гидротермических условий и выносом углерода с урожаем. В нижних горизонтах количество гумуса становится незначительным, что отражает общую дегумификацию агропочв.

Метод геостатистического анализа (крикинга) подтвердил зависимость содержания гумуса от глубины и характера землепользования. Повышенные значения (в среднем около 4,5%) зафиксированы в органогенных горизонтах целинных почв, где концентрация гумуса быстро снижается с глубиной (рис. 3). В пахотных почвах количество гумуса в верхнем слое не превышает 2 %, что отражает влияние длительной агрогенной трансформации.

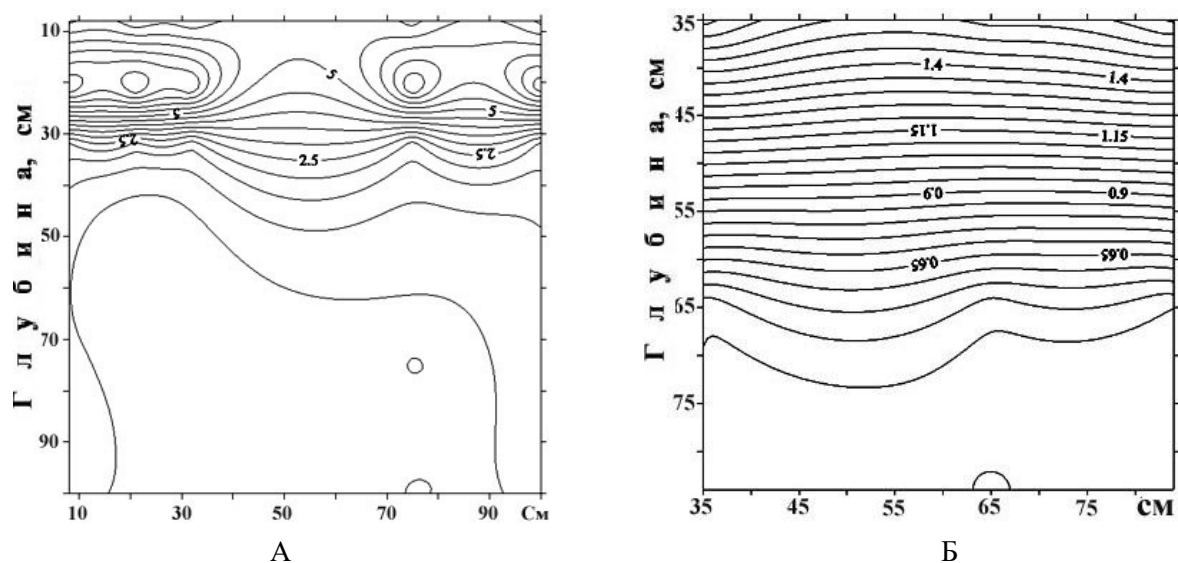


Рисунок 3. Изоплеты пространственного распределения гумуса (%) по профилю почв: А – разрез № 1 (целина); Б – разрез № 2 (пашня).

Изоплеты на рисунке 3 наглядно отражают различия в пространственном распределении гумуса в целинной и пахотной почвах. В агрогенной почве наблюдается существенная (более чем в два раза) потеря гумуса — ключевого компонента, определяющего потенциальное плодородие, — что является следствием длительного и интенсивного сельскохозяйственного использования. Анализ содержания обменных катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^{+}) показал, что в целинной почве концентрация кальция наибольшая в верхнем горизонте АУ, что обусловлено его биофильными свойствами. Вниз по профилю содержание Ca^{2+} снижается, тогда как количество Mg^{2+} , напротив, возрастает, что связано с минеральным составом почвообразующих пород. Высокое содержание гидролитического водорода отмечено в горизонтах AEL и BEL, что отражает накопление водородных ионов в обменном комплексе почвы. Пахотная почва, несмотря на значительно меньшее содержание гумуса, характеризуется близкими к целине величинами обменного кальция и магния в верхнем горизонте. Однако содержание гидролитического водорода у неё заметно ниже, что указывает на частичное

смещение реакции среды в сторону нейтральной. Такой градиент кислотности отражает типичное естественное подкисление профиля верхней элювиальной толщи серых почв, обусловленное вымыванием легко- и труднорастворимых солей, а также обменных оснований.

Особый интерес представляют несиликатные формы железа (Fe_{nc}): окристаллизованное ($Fe_{окр}$) и аморфное (Fe_a), рассчитанные как доля от валового содержания железа ($Fe_{вал}$). В целинной почве наибольшая доля Fe_{nc} от $Fe_{вал}$ зафиксирована в горизонте АУ, что свидетельствует об активных процессах выветривания и почвообразования. Ниже по профилю содержание Fe_{nc} снижается, при этом в гумусовом горизонте преобладают окристаллизованные формы, а в более глубоких — аморфные. В пахотной почве доля несиликатного железа несколько ниже, чем на целине, что, вероятно, связано с усреднением его содержания при механической обработке. При этом увеличивается доля окристаллизованных форм по сравнению с аморфными, что обусловлено изменением гидротермического режима агропочв в сторону повышения контрастности условий.

Полученные данные по содержанию подвижных форм питательных элементов позволяют объективно оценить уровень плодородия серых почв при различном типе землепользования (табл. 4).

Таблица 4

Содержание питательных элементов в целинной и пахотной почвах, мг/кг

Горизонт, глубина (см)	Подвижный азот		Подвижный фосфор	Обменный калий
	аммонийный	нитратный	по Крисанову	
Разрез № 1 (целина). Серая типичная				
АУ, 3–8	41	20	66	187
АЕЛ, 8–21	57	15	54	112
ВЕЛ, 21–32	27	30	56	63
ВТ, 32–75	20	15	54	74
С, 75–100	12	0	56	82
Разрез № 2 (пашня). Агрозем текстурно-дифференцированный				
Р, 0–35	35	8	48	93
ВТ, 35–65	20	13	69	118
С, 65–84	37	13	51	126

Дерновый горизонт целинной почвы характеризуется повышенным содержанием аммонийного и максимальным — нитратного азота. Это связано с хорошей прогреваемостью горизонта, обеспечивающей активную деятельность микробного сообщества и, следовательно, интенсивное разложение органического вещества. Максимум аммонийного азота отмечен в горизонте АЕЛ, что объясняется высокой миграционной способностью этой формы азота. Вниз по профилю количество обеих форм подвижного азота закономерно снижается, достигая в горизонте С минимальных значений, тогда как нитратный азот полностью отсутствует.

Содержание подвижного фосфора в целинной почве относительно невелико и постепенно уменьшается с глубиной. Аналогичная тенденция наблюдается и для обменного калия, максимальные значения которого приурочены к верхним горизонтам; с глубиной его количество снижается более чем в 2,5 раза.

В пахотной почве содержание аммонийного азота значительно ниже, чем в целинной. Количество нитратного азота уменьшилось более чем в два раза по сравнению с целиной. Это, вероятно, связано с выносом азота с урожаем, отсутствием поступления свежего органического материала и активной миграцией подвижных форм азота вниз по профилю.

Агропочва характеризуется низкой обеспеченностью подвижным фосфором в пахотном слое, в отличие от целинной почвы, для которой характерен средний уровень обеспеченности данным элементом (ГОСТ 26207-91). С глубиной содержание подвижного фосфора уменьшается примерно в три раза. Количество обменного калия в пахотном слое соответствует средней обеспеченности этим элементом, однако вниз по профилю его содержание заметно возрастает, что, по-видимому, обусловлено высокой подвижностью калия в минеральной части почв.

Для подтверждения различий по основным агрохимическим показателям был выполнен расчет описательной статистики. Полученные значения характеризуют закономерности изменения кислотности, содержания гумуса и питательных элементов в верхнем (0–20 см) слое целинной и пахотной почв. Обобщенные данные представлены в таблице 5.

Таблица 5

Описательная статистика свойств целинной и пахотной почв (слой 0–20 см, n=10)

Показатель	Целина			Пашня		
	среднее	стандартное отклонение	коэффициент вариации, %	среднее	стандартное отклонение	коэффициент вариации, %
pH (H ₂ O)	6,05	0,35	5,8	5,24	0,18	3,4
pH (KCl)	5,50	0,39	7,1	3,91	0,21	5,3
Гумус, %	4,40	0,40	8,9	1,67	0,24	15,1
N-NH ₄ , мг/кг	41,1	8,7	21,1	35,0	9,7	27,6
N-NO ₃ , мг/кг	20,5	7,0	33,3	7,8	4,5	62,7
P-P ₂ O ₅ , мг/кг	66,0	20,7	31,3	48,0	16,2	33,7
K-K ₂ O, мг/кг	187,0	23,1	12,4	93,0	16,3	17,6

Специфика строения профиля и свойств исследуемых целинной и пахотной почв учхоза «Молодёжный» заметно отразились на их удельном стационарном электрическом сопротивлении и его пространственном распределении (рис. 4).

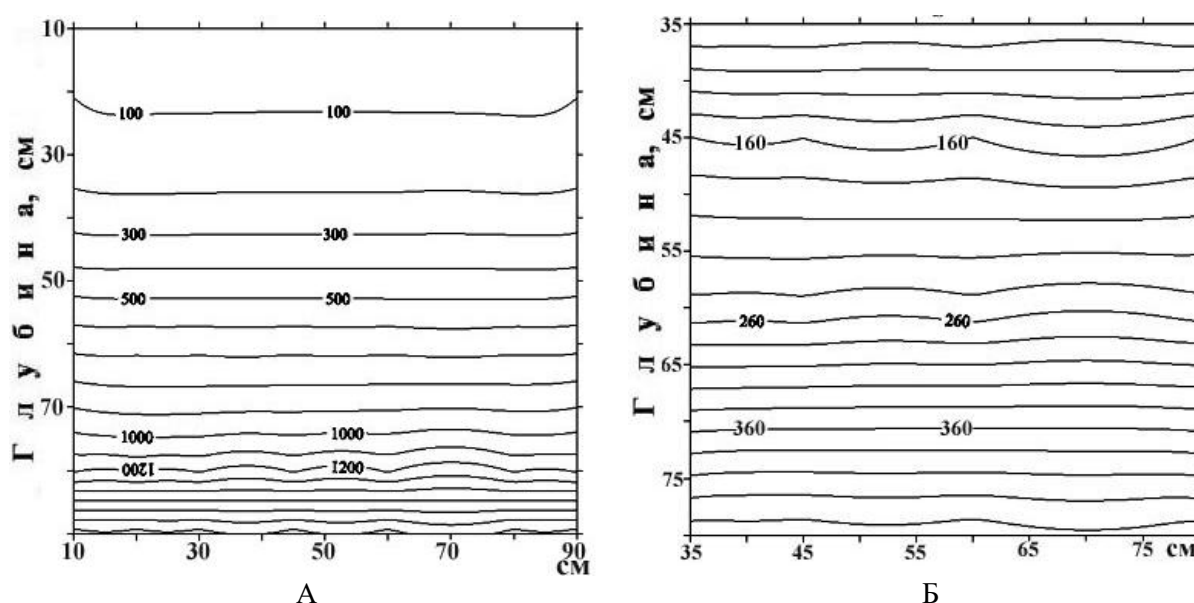


Рисунок 4. Изоплеты пространственного распределения стационарного электрического поля (СЭП, Ом·м) по профилю почв: А – разрез № 1 (целина); Б – разрез № 2 (пашня).

Согласно исследованиям А.П. Позднякова (2001, 2009), профильные кривые параметров СЭП основных типов почв соответствуют их дифференциации на генетические горизонты и отражают проявление характерных почвообразовательных процессов. В профиле исследуемых почв установлено увеличение электрических параметров, величина которых прямо пропорциональна содержанию кремнезёма (SiO₂), гумуса и кислотности почвы и обратно пропорциональна содержанию суммы обменных катионов, ила и полуторных оксидов (R₂O₃). На рисунке 4А, где показано профильное распределение СЭП в целинной почве, отчётливо выделяется максимум в горизонте BEL, характеризующемся низким содержанием гумуса и, особенно, ила. Несмотря на сравнительно высокое содержание гумуса в горизонтах АУ и АЕL, удельное электрическое сопротивление в них несколько снижается, а в горизонтах ВТ и С достигает минимальных значений. При распашке почвы значения электросопротивления снижаются ещё больше (рис. 4Б), достигая минимума в пахотном слое агропочвы.

ОБСУЖДЕНИЕ

Специфической особенностью серых почв региона является их развитие в средних и нижних частях склонов под пологом светлохвойно-мелколиственных (сосново-берёзовых) лесов, которые представляют собой производные, вторичные формации (Копосов, 1983). Поэтому почвы,

сформировавшиеся под такими сообществами, также не могут рассматриваться как первичные образования. Несоответствие некоторых свойств почв современному растительному покрову обусловлено различной скоростью их эволюции. Почва, являясь более консервативным телом природы, по темпам своего развития отстаёт от растительного покрова (Александровский, Александровская, 2005). На территории, прилегающей к лесостепной зоне и по долинам рек, господствовавшие ранее моховые и кустарничковые леса (в том числе, темнохвойные) под воздействием хозяйственной деятельности человека были заменены светлохвойными и мелколиственными лесами с развитым травяным покровом. Уничтожение таёжной растительности привело к необратимым изменениям природной среды в направлении усиления аридности климата, изменения водного и теплового режимов, а, следовательно, и характера почвообразования. С поселением травянистой растительности в почвах активизировался дерновый процесс, способствующий накоплению органического вещества. При этом возросла роль гуминовых кислот в составе гумуса, увеличилось содержание обменных оснований, а реакция среды стала менее кислой (Кузьмин, 1988).

Стабильные (фундаментальные) свойства почв, такие как валовой химический и гранулометрический состав, соответствуют прежним условиям почвообразования и типу растительности, под влиянием которых формировался дифференцированный по подзолистому типу профиль исследуемых почв. Современная фаза почвообразования характеризуется пониженной теплообеспеченностью и увлажнённой, что препятствует промывному режиму и нисходящей миграции частиц и веществ, т. е. развитию выраженной элювиально-иллювиальной дифференциации (Кузьмин, 1988; Козлова, 2021). В исследуемых почвах наблюдается слабая элювиально-иллювиальная дифференциация элементного состава по профилю, преобладание силикатных форм железа в его валовой фракции и относительно низкое содержание несиликатных соединений. Среди несиликатных форм доминируют окристаллизованные, тогда как верхние горизонты обогащены аморфными формами железа. Наряду с этим, слабая оподзоленность, умеренная кислотность, обогащённость гумусом и обменными основаниями верхних горизонтов отражают влияние современных процессов почвообразования и растительного покрова. Криогенные условия региона способствуют снижению растворимости многих химических элементов, что приводит к накоплению в почве легко- и труднорастворимых соединений и уменьшению химического стока. Это, в свою очередь, обуславливает слабокислую, нейтральную или слабощелочную реакцию среды верхних гумусированных горизонтов, постепенное увеличение щелочности вниз по профилю, заторможенность подзолистого процесса и высокую степень насыщенности почвенного поглощающего комплекса обменными катионами (Кузьмин, 1988). Характерной особенностью лесостепных почв региона, связанной с местными условиями почвообразования, является сосредоточение основной массы корней растений и запасов органического вещества в верхней полуметровой части профиля, что обусловлено низкими температурами в нижележащих горизонтах. В серых почвах преобладают полуразложившиеся растительные остатки, не достигшие стадии полной гумификации, формирующие так называемый «грубый» гумус типа модер (Козлова и др., 2021).

Слабая изменчивость удельного электрического сопротивления по профилю исследуемых почв подтверждает низкую степень их дифференциации на горизонты и в большей мере определяется гранулометрическим составом, чем содержанием гумуса. В более ранней работе авторов (Козлова, Гюлалыев, 2014) была установлена общая закономерность для почв юга Иркутской области: величина СЭП в большей степени зависит от гранулометрического состава. Оказалось, что чем тяжелее механический состав почвы, тем ниже её электросопротивление при схожем количестве гумуса. Таким образом, снижение значений СЭП по профилю исследуемых почв, в отличие от S-образного характера его распределения, типичного для текстурно-дифференцированных почв (Березин, Карпачевский, 2009), указывает на отсутствие либо слабую выраженность элювиально-иллювиальной дифференциации профиля целинной почвы.

Агропедогенез способствует существенной трансформации серых почв региона. В них наблюдается ярко выраженное явление проградации – изменения свойств в сторону остепнения, сопровождающееся увеличением мощности гумусового горизонта и установлением нейтральной реакции среды, что обеспечивает повышенную устойчивость почв к агрогенному воздействию. Однако низкое содержание гумуса и неизбежное включение в распашку малоплодородных, часто кислых, нижележащих горизонтов приводит к упрощению строения профиля агропочвы и ухудшению её свойств. Эти изменения существенно влияют на электрофизические показатели:

значения удельного электросопротивления заметно снижаются и выравниваются по профилю, что может рассматриваться как диагностический признак при оценке состояния агрогенных почв. Поскольку выявлена статистически значимая зависимость между удельным электрическим сопротивлением и содержанием ила, гумуса и полуторных оксидов, взаимосвязь этих параметров может быть описана регрессионным уравнением следующего вида:

$$ER = a + b_1 \cdot H + b_2 \cdot CL + b_3 \cdot Fe_2O_3 + b_4 \cdot Al_2O_3 + \varepsilon,$$

где: ER – удельное электросопротивление почвы; H – содержание гумуса (%); CL – содержание ила (%); Fe_2O_3 , Al_2O_3 – содержание оксидов (%); a, b_{1-4} – эмпирические коэффициенты, ε – ошибка модели.

Построенная модель может быть использована для экспресс-оценки свойств почвенного профиля с применением электрофизических методов без необходимости проведения полного комплекса лабораторных анализов. Достоверность модели подтверждается высокой степенью корреляции между переменными ($r > 0,85$; $p < 0,01$).

Профильное распределение (рис. 5) наглядно отражает изменение удельного электрического сопротивления почвы на различных глубинах и горизонтах, позволяя оценить пространственную вариабельность этого показателя. Минимальные и максимальные значения характеризуют крайние уровни электросопротивления почвы в пределах профиля. Минимумы соответствуют участкам с наибольшей проводимостью, что обычно связано с повышенным содержанием влаги или органического вещества. Максимальные значения, напротив, фиксируются в более плотных и сухих горизонтах с низким содержанием влаги либо при повышенной степени минерализации.

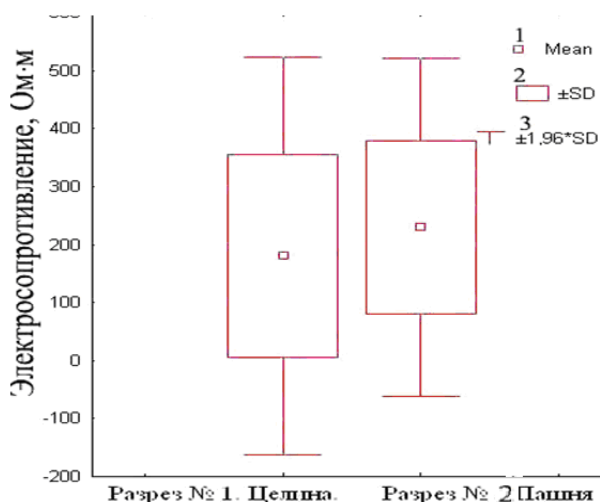


Рисунок 5. Профильное распределение удельного электрического сопротивления (СЭП) в целинной и пахотной почвах: 1 – минимальные и максимальные значения; 2 – среднее \pm стандартное отклонение; 3 – медианное значение.

ВЫВОДЫ

1. Проведённые исследования серых почв учебного хозяйства «Молодёжный» Иркутского государственного аграрного университета им. А.А. Ежевского выявили существенные различия между целинной почвой и её агрогенным аналогом.

2. Для целинной почвы характерна слабая элювиально-иллювиальная дифференциация по содержанию полуторных оксидов и ила. Формирование её профиля в большей степени связано с литогенной неоднородностью и разновозрастностью горизонтов, чем с активными почвообразовательными процессами, которые в условиях сурового климата региона существенно замедлены. Преобладание в валовом железе силикатных форм и низкая доля несиликатных соединений, слабая оподзоленность, умеренная кислотность, обогащённость гумусом и обменными основаниями верхних горизонтов отражают влияние современного почвообразования, растительного покрова и криогенных процессов. Слабая изменчивость электрического сопротивления по профилю подтверждает низкую степень его дифференциации и зависит, преимущественно, от гранулометрического состава, а не от содержания гумуса.

3. Агрогенное преобразование почв приводит к гомогенизации верхнего слоя, снижению variability физико-химических свойств и выравниванию показателей электросопротивления. В результате усиления эрозионных процессов, выноса питательных веществ с урожаем и припахивания малоплодородных нижележащих горизонтов отмечено существенное снижение содержания гумуса, обменных катионов и питательных элементов, подкисление пахотного слоя, утяжеление его гранулометрического состава, а также уменьшение доли несиликатных форм железа, в основном представленных кристаллическими структурами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведённых исследований расширяют представления о закономерностях формирования и трансформации серых почв в условиях интенсивного агрогенного воздействия и позволяют определить пути их рационального использования.

Электрофизические методы, в частности измерение удельного электрического сопротивления, доказали свою эффективность и экономическую целесообразность для оперативной диагностики состояния пахотных почв. Они позволяют своевременно выявлять начальные признаки деградации и снижения плодородия, что делает их перспективными инструментами мониторинга в агроландшафтах.

Анализ пространственного распределения гумуса, ила и электросопротивления создаёт основу для построения цифровых почвенных карт, применимых в системах точного земледелия. Такие карты могут использоваться для зонирования полей по агрофизическим и агрохимическим свойствам, оценки потенциальной продуктивности сельскохозяйственных культур и оптимизации применяемых агротехнологий.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена за счет средств государственного задания Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН (FWEM-2026-0002).

ЛИТЕРАТУРА

- Агрохимические методы исследования почв: Руководство / Под ред. А.В. Соколова. Москва: Наука, 1975. 656 с.
- Александровский А.Л., Александровская Е.И. Эволюция почв и географическая среда. Москва: Наука, 2005. 223 с.
- Байбеков Р.Ф. Влияние длительного применения удобрений на агроэкологическое состояние подзолистых и черноземных почв Европейской части России: Автореферат диссертации ... д-р с-х. наук. Москва, 2003. 36 с.
- Березин Л.В. Карпачевский Л.О. Лесное почвоведение. Омск: Издательство ФГОУ ВПО ОМГАУ, 2009. 374 с.
- ГОСТ 26207-91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. Москва: Издательство стандартов, 1993. 8 с.
- Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. Москва, 2014. [Электронный ресурс]. URL: <https://egrpr.soil.msu.ru> (дата обращения 04.08.2025).
- Караваева Н.А., Лебедева И.И., Скворцова Е.Б., Герасимова М.И. Генетическая концепция пахотных горизонтов и опыт их типизации // Почвоведение. 2003. № 12. С. 1413–1421.
- Каюгина С.М., Ерёмин Д.И. Пространственная неоднородность агрофизических свойств серых лесных почв Северного Зауралья // Вестник аграрной науки. 2022. № 3(96). С. 25–30. <https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2022.3.25>
- Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Козлова А.А. Разнообразие почв Южного Предбайкалья в условиях палеокриогенного микрорельефа, их трансформация при агропедогенезе: Автореферат диссертации ... д-р биол. наук. Иркутск, 2021. 43 с.
- Козлова А.А., Гюлалыев Ч. Г. Удельное электрическое сопротивление целинных и освоенных почв юга Иркутской области // Живые и биокосные системы. 2014. № 6. <http://www.jbks.ru/archive/issue-6/article-9>
- Козлова А.А., Белозерцева И.А., Лопатина Д.Н. Почвы Южного Предбайкалья: разнообразие и закономерности распространения // География и природные ресурсы. 2021. Том 42. № 1. С. 103–114. <https://doi.org/10.15372/GIPR20210112>
- Копосов Г.Ф. Генезис гор Прибайкалья. Новосибирск: Наука, 1983. 255 с.

- Кузьмин В.А. Почвы Предбайкалья и Северного Забайкалья. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1988. 175 с.
- Лебедева И.И., Тонконогов В.Д., Герасимова М.И. Антропогенное почвообразование и новая классификация почв // Почвоведение. 2005. № 10. С.1158–1164.
- Муха В.Д. Естественнo-антропогенная эволюция почв (общие закономерности и зональные особенности). Москва: КолосС, 2004. 271 с.
- Поздняков А.И. Полевая электрофизика почв. Москва: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. 87 с.
- Поздняков А.И. Электрофизические методы исследования почв. Методическое пособие. Москва: МГУ, 2009. 38 с.
- Поздняков А.И., Гюлалыев Ч.Г. Электрофизические свойства некоторых почв. Москва-Баку: Адильоглы, 2004. 240 с.
- Теория и практика химического анализа почв / под ред. Л.А. Воробьевой. Москва: ГЕОС, 2006. 400 с.
- Чупрова В.В., Кураченко Н.Л. Устойчивость почв к экзогенным воздействиям: учеб.-метод. пособие. Красноярск, 2018. 171 с.
- Шапорина Н.А., Сайб Е.А. Вариабельность агрофизических показателей комплекса склоновых почв Предсалаирья // Почвы и окружающая среда. 2020. Том 3. №2. с118. <https://doi.org/10.31251/pos.v3i2.118>
- Шапорина Н.А., Чичулин А.В., Чумбаев А.С. Пространственная вариабельность водно-физических свойств темно-серой лесной почвы в условиях Предсалаирья // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 10. С.144–149. <https://doi.org/10.17513/mjpf.12433>
- Якименко В.Н., Конарбаева Г.А., Бойко В.С., Тимохин А.Ю. Изменение содержания фтора в почвах лесостепи Западной Сибири при их сельскохозяйственном использовании // Агрохимия. 2020. № 4. С. 38–46. <https://doi.org/10.31857/S0002188120040122>
- Bazzi C.L., Souza E.G., Khosla R., Uribe-Opazo M.A., Schenatto K. Profit maps for precision agriculture // International Journal of Agriculture and Natural Resources. 2015. Vol. 42. No. 3. P. 385–396. <https://doi.org/10.7764/S0718-16202015000300007>
- Goovaerts P. Geostatistics for natural resources evaluation. New York: Oxford University Press, 1999. 483 p.
- IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2014, update 2015. 181 p.
- McBratney A.B., Santos M.L.M., Minasny B. On digital soil mapping // Geoderma. 2003. Vol. 117. No. 1–2. P. 3–52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
- Mulla D.J., Schepers J.S. Key Processes and Properties for Site-Specific Soil and Crop Management // The state of site specific management for agriculture. Book Series: ASA, CSSA, and SSSA Books, 1997. P. 1–18. <https://doi.org/10.2134/1997.stateofsitespecific.c1>
- Shoshany M., Goldshleger N., Chudnovsky A. Monitoring of agricultural soil degradation by remote-sensing methods: A review // International Journal of Remote Sensing. 2013. Vol. 34. No. 17. P. 6152–6181. <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.793872>
- Stover H.J., Henry H.A.L. Soil homogenization and microedges: perspectives on soil-based drivers of plant diversity and ecosystem processes // Ecosphere. 2018. Vol. 9. No. 6. e02289. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2289>
- Velamala R.R., Pant P.K. Modeling the Spatial Variability of Soil Nutrients-A Case from Soil Health Card Project, India // International Journal of Environment and Geoinformatics. 2024. Vol. 11. No. 3. P. 90–105. <https://doi.org/10.30897/ijegeo.1465671>
- Zhang C., Tang Ya, Xu X., Kiely G. Towards spatial geochemical modelling: use of geographically weighted regression for mapping soil organic carbon contents in Ireland // Applied Geochemistry. 2011. Vol. 26. No. 7. P. 1239–1248. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.04.014>
- Zuber S.M., Villamil M.B. Meta-analysis approach to assess effect of tillage on microbial biomass and enzyme activities // Soil Biology and Biochemistry. 2016. Vol. 97. P. 176–187. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.03.011>

Поступила в редакцию 22.08.2025

Принята 24.11.2025

Опубликована 12.01.2026

Сведения об авторах:

Козлова Алла Афонасьевна – доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет» (г. Иркутск, Россия); ведущий специалист лаборатории геохимии ландшафтов и географии почв ФГБУН Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН (г. Иркутск, Россия); allak2008@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9481-4798>

Гюлалыев Чингиз Гюлалы оглы – доктор аграрных наук, старший научный сотрудник, руководитель географического стационара Института географии Министерства науки и образования Азербайджанской Республики (г. Баку, Азербайджан); доцент, профессор кафедры аграрных наук Ленкоранского государственного университета (г. Ленкорань, Азербайджан); ch_gulaliyev@yahoo.com; <https://orcid.org/0000-0002-4973-2339>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Integral diagnostics of grey soils and their transformation during agropedogenesis

© 2026 A. A. Kozlova ^{1, 2}, Ch. G. Gulaliyev ^{3, 4}

¹Irkutsk State University, Karl Marx St., 1, Irkutsk, Russia. E-mail: allak2008@mail.ru

²V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Batorskaya St., 1, Irkutsk, Russia.

³Institute of Geography, Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, 31 G. Javid Street, Baku, Azerbaijan. E-mail: ch_gulaliyev@yahoo.com

⁴Lankaran State University, Azi Aslanov St., 50, Lankaran, Azerbaijan

The aim of the study. Integrated diagnostics of grey soils, as well as transformation of their properties during agrogenic use.

Location and time of the study. Soils located at the teaching farm "Molodezhny" of the Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky were the objects of the study.

Methods. The morphological description of soil profiles was performed. Determination of particle size distribution, organic matter content, macroelement composition using X-ray fluorescence analysis, group composition of iron, indicators of agrochemical properties were used in the study. Measurements of specific electrical resistance using the LandMapper-03 device were also carried out.

Results. The obtained data indicated a drastic transformation of the soil profile under the influence of agrogenic factors: homogenization of the upper horizons and simplification of the profile, a sharp decrease in humus and exchangeable cations content, acidification of the arable horizon of the agrosoil and heavier granulometric composition. The crystallized forms of iron prevailed among its non-silicate forms. X-ray fluorescence analysis showed that in arable soils there was a redistribution of bulk chemical elements, especially in sesquioxides with a decrease in the silica content. Agrogenic processes contributed to decreasing the difference in chemical composition and horizon differentiation and increasing homogeneity. The content of the mobile forms of nutrients revealed a decrease in the nitrate nitrogen and phosphorus in the arable horizons, which may indicate nutrients deficiency and imbalance. Measurements of the stationary electrical resistance of soils (SER) showed its dependence on the content of silt, humus and sesquioxides. In arable soils, the SER values were significantly lower than in the virgin soils and less differentiated along the profile, most likely due to mechanical mixing and reduced profile differentiation.

Conclusions. Agrogenic soil transformation leads to homogenization of the upper soil layer, reduced variability of physicochemical properties and lower differentiation of electrical resistance indicators. Due to increased erosion processes, removal of nutrients by crops, plowing of low-fertility underlying horizons, the following occurred: a significant decrease in the content of humus, exchangeable cations, nutrients; noticeable acidification of the arable horizon, heavier granulometric composition, a decrease in the proportion of non-silicate iron, represented mainly by crystalline forms. The results confirm the importance of an integrated approach to assessing the soil status, combining traditional methods of analysis with geophysical tools. The identified patterns can be used in modeling soil properties and optimizing agricultural technologies within the framework of adaptive-landscape farming systems. The work emphasizes the importance of preserving the natural status of soils and the need to monitor their degradation in agroecosystems.

Keywords: *spatial variability; grey soils (Haplic Phaeozems); agropedogenesis; physicochemical properties; soil electrical resistance; virgin land; arable land.*

How to cite: Kozlova A.A., Gyulaliyev Ch.G. Integral diagnostics of grey soils and their transformation during agropedogenesis. *The Journal of Soils and Environment*. 2026. 9(1). e330. DOI: [10.31251/pos.v9i1.330](https://doi.org/10.31251/pos.v9i1.330) (in Russian with English abstract).

FUNDING

The study was financially supported by the V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS (FWEM-2026-0002).

REFERENCES

- Agrochemical methods of soil research: Manual / A.V. Sokolov (ed.). Moscow: Nauka Publ., 1975. 656 p. (in Russian).
- Aleksandrovsky A.L., Aleksandrovskaya E.I. Soil evolution and geographical environment. Moscow: Nauka Publ., 2005. 223 p. (in Russian).
- Baibekov R.F. Influence of long-term use of fertilizers on the agroecological state of podzolic and chernozem soils of the European part of Russia. Abstract of Dissertation ... Dr. of Agricultural Sci. Moscow, 2003. 36 p. (in Russian).
- Berezin L.V., Karpachevsky L.O. Forest soil science. Omsk: Publishing House of the Omsk State Agrarian University, 2009. 374 p. (in Russian).
- GOST 26207-91. Soils. Determination of mobile phosphorus and potassium compounds by the Kirsanov method modified by TsINAO. Moscow: Publishing House of Standards, 1993. 8 p. (in Russian).
- Unified State Register of Soil Resources of Russia. Version 1.0. Moscow, 2014. [Electronic resource]. URL: <https://egrpr.soil.msu.ru> (accessed on 04.08.2025). (in Russian).
- Karavaeva N.A., Lebedeva I.I., Skvortsova E.B., Gerasimova M.I. Genetic concept of plow horizons and an experience in their typification. *Eurasian Soil Science*. 2003. Vol. 36. No. 12. P. 1261–1268.
- Kayugina S.M., Eremin D.I. Spatial heterogeneity of agrophysical properties of gray forest soils of the Northern Trans-Urals. *Bulletin of Agrarian Science*. 2022. No. 3(96). P. 25–30. (in Russian). <https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2022.3.25>
- Classification and diagnostics of soils of Russian / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimov. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian).
- Kozlova A.A. Soil diversity of the Southern Cis-Baikal region under paleocryogenic microrelief conditions, their transformation during agropedogenesis: Abstract of Dissertation ... Dr. of Biol. Sci. Irkutsk, 2021. 43 p. (in Russian).
- Kozlova A.A., Gyulaliyev Ch.G. Specific electrical resistance of virgin and developed soils in the south of the Irkutsk region. *Live and Bio-Abiotic Systems*. 2014. No. 6. (in Russian). <http://www.jbks.ru/archive/issue-6/article-9>
- Kozlova A.A., Belozertseva I.A., Lopatina D.N. Soils of southern Cisbaikalia: diversity and spatial distribution patterns.
- Koposov G.F. Genesis of the mountains of the Baikal region. Novosibirsk: Nauka Publ., 1983. 255 p. (in Russian).
- Kuzmin V.A. Soils of the Cis-Baikal region and Northern Transbaikalia. Novosibirsk: Nauka. Siberian Branch, 1988. 175 p. (in Russian).
- Lebedeva I.I., Tonkonogov V.D., Gerasimova M.I. Anthropogenic pedogenesis and the new classification system of Russian soils. *Eurasian Soil Science*. 2005. Vol. 38. No. 10. P. 1026–1031.
- Mukha V.D. Natural-anthropogenic evolution of soils (general patterns and zonal features). Moscow: KolosS, 2004. 271 p. (in Russian).
- Pozdnyakov A.I. Field electrophysics of soils. Moscow: MAIK "Science/Interperiodica", 2001. 87 p. (in Russian).
- Pozdnyakov A.I. Electrophysical methods of soil research. Methodical manual. Moscow: Moscow State University, 2009. 38 p. (in Russian).
- Pozdnyakov A.I., Gyulaliyev Ch.G. Electrophysical properties of some soils. Moscow-Baku: Adilioglu, 2004. 240 p. (in Russian).
- Theory and practice of chemical analysis of soils / edited by L.A. Vorobyeva. Moscow: GEOS, 2006. 400 p. (in Russian).
- Chuprova V.V., Kurachenko N.L. Soil resistance to exogenous influences: textbook-method. manual. Krasnoyarsk, 2018. 171 p. (in Russian).

- Shaporina N.A., Sayb E.A. Variability of agrophysical properties of hillslope soils in the Cis-Salair region (West Siberia). The Journal of Soils and Environment. 2020. Vol. 3. No. 2. e118. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v3i2.118>
- Shaporina N. A., Chichulin A. V., Chumbaev A. S. Spatial variability of water-physical properties of dark gray forest soil in the Cis-Salair region. International Journal of Applied and Fundamental Research. 2018. No. 10. P. 144–149. (in Russian). <https://doi.org/10.17513/mjpf.12433>
- Yakimenko V.N., Konarbaeva G.A., Boyko V.S., Timokhin A.Yu. Change of fluorine content in soils of the forest-steppe of Western Siberia at their agricultural use. Agrokhimia. 2020. No. 4. P. 38–46. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0002188120040122>
- Bazzi C.L., Souza E.G., Khosla R., Uribe-Opazo M.A., Schenatto K. Profit maps for precision agriculture. International Journal of Agriculture and Natural Resources. 2015. Vol. 42. No. 3. P. 385–396. <https://doi.org/10.7764/S0718-16202015000300007>
- Goovaerts P. Geostatistics for natural resources evaluation. New York: Oxford University Press, 1999. 483 p.
- IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2014, update 2015. 181 p.
- McBratney A.B., Santos M.L.M., Minasny B. On digital soil mapping. Geoderma. 2003. Vol. 117. No. 1–2. P. 3–52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
- Mulla D.J., Schepers J.S. Key Processes and Properties for Site-Specific Soil and Crop Management. The state of site specific management for agriculture. Book Series: ASA, CSSA, and SSSA Books, 1997. P. 1–18. <https://doi.org/10.2134/1997.stateofsitespecific.c1>
- Shoshany M., Goldshleger N., Chudnovsky A. Monitoring of agricultural soil degradation by remote-sensing methods: A review. International Journal of Remote Sensing. 2013. Vol. 34. No. 17. P. 6152–6181. <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.793872>
- Stover H.J., Henry H.A.L. Soil homogenization and microedges: perspectives on soil-based drivers of plant diversity and ecosystem processes. Ecosphere. 2018. Vol. 9. No. 6. e02289. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2289>
- Velamala R.R., Pant P.K. Modeling the Spatial Variability of Soil Nutrients-A Case from Soil Health Card Project, India. International Journal of Environment and Geoinformatics. 2024. Vol. 11. No. 3. P. 90–105. <https://doi.org/10.30897/ijgeo.1465671>
- Zhang C., Tang Ya, Xu X., Kiely G. Towards spatial geochemical modelling: use of geographically weighted regression for mapping soil organic carbon contents in Ireland. Applied Geochemistry. 2011. Vol. 26. No. 7. P. 1239–1248. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.04.014>
- Zuber S.M., Villamil M.B. Meta-analysis approach to assess effect of tillage on microbial biomass and enzyme activities. Soil Biology and Biochemistry. 2016. Vol. 97. P. 176–187. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.03.011>

Received 22 August 2025

Accepted 24 November 2025

Published January 2026

About the authors:

Alla A. Kozlova – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Soil Science and Land Resources Assessment, Irkutsk State University (Irkutsk, Russia); Leading specialist of the Laboratory of Landscape Geochemistry and Soil Geography in the V.B. Sochava Institute of Geography, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia); allak2008@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9481-4798>

Chingiz G. Gulaliyev – Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Head of the Geographical Station, Institute of Geography, Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan (Baku, Azerbaijan); Associate Professor, Professor, Department of Agricultural Sciences, Lankaran State University (Lankaran, Azerbaijan); ch_gulaliyev@yahoo.com; <https://orcid.org/0000-0002-4973-2339>

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)