

**ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ
ПОЧВ ЧЕРНОЗЕМНОГО РЯДА**

© 2019 Оленченко В.В. ^{1,2}, Смоленцева Е.Н. ³, Заплавнова А.А.²,
Русалимова О.А. ³, Барсуков П.А. ³

Адрес: ¹ФГБУН Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, проспект Академика Коптюга, 3, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: olenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

²Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, ул. Пирогова, 2, г. Новосибирск, 630090, Россия

³ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: barsukov@issa-siberia.ru

Цель исследования: Оценка возможности применения геофизических методов при исследовании строения и свойств почв черноземного ряда.

Место и время проведения. Полевые исследования выполнены в период июнь – октябрь 2018 г. на пахотных почвах (агрочернозем и агростратозем) Буготакского мелкосопочника, который является частью Предсалаирской денудационно-аккумулятивной равнины, расположенной в юго-восточной части Западной Сибири в правобережной части бассейна реки Оби.

Методология. Изучение почв проводили общепринятыми в почвенно-агрохимических исследованиях методами, а также геофизическими методами, включающими магнитометрию, электротомографию и георадиолокацию. Почвенные исследования включали морфологическое описание строения почв, отбор образцов по генетическим горизонтам, анализ физических, физико-химических и химических свойств почв (до 28 показателей), характеризующих потенциальное и эффективное плодородие. Поиск зависимостей между почвенными параметрами и результатами геофизических исследований, а также между отдельными свойствами почв выполняли с помощью стандартных методов математической статистики (корреляционный и регрессионный анализ).

Основные результаты. В условиях близко залегающих коренных пород применение магниторазведки для решения актуальных для почвоведения задач не представляется возможным. При высоких значениях содержания общего углерода в гумусово-аккумулятивных горизонтах изученных почв закономерность снижения удельного электрического сопротивления (УЭС) с увеличением содержания почвенного органического вещества перестает работать. Было установлено, что УЭС зависит от текстуры почвы. Получена закономерность: утяжеление гранулометрического состава вызывает снижение УЭС. Это позволяет обнаружить глубину залегания иллювиальных горизонтов в аккумулятивно-гумусовых и, тем более, в текстурно-дифференцированных почвах. УЭС гумусово-аккумулятивного слоя (ниже 10 см) агрочернозема составляет около 70 Ом·м, а приповерхностный слой почвы 0-10 см (подвергнутый плоскорезной обработке на эту глубину) диагностируется пониженным до 40-45 Ом·м УЭС. Наиболее перспективным является комплексное применение электротомографии и георадиолокации, которое позволяет оценить мощность и нижнюю границу гумусово-аккумулятивного слоя, включая его разделение на агротемногумусовый (пахотный) и темногумусовый горизонты, а также определить глубину залегания иллювиального горизонта и верхнюю границу аккумулятивно-карбонатного горизонта.

Заключение. Полагаем, что геофизические методы будут полезны в почвенно-генетических исследованиях и крупномасштабном почвенном картировании за счет более корректного учета естественной неоднородности распределения в пространстве свойств почв, характеризующих ее потенциальное плодородие. Крупномасштабные почвенные карты являются необходимой основой для решения многих практических задач: мониторинга изменения свойств почв при их деградации в результате эрозии, оценки загрязнения почв поллютантами, проведения почвенной диагностики для определения запаса питательных элементов в почвах и расчета доз удобрений. Поиск эмпирических взаимосвязей между геофизическими параметрами и урожайностью культур в настоящее время представляется довольно амбициозной задачей, поскольку урожайность в большей степени зависит не от «базовых» свойств почв (с которыми геофизические параметры могут коррелировать), а от содержания в почве доступных растениям пулов элементов минерального питания и внешних (не связанных с почвой) факторов: влаго- и теплообеспеченности вегетационного сезона, внесения удобрений и пестицидов.

Ключевые слова: электротомография; георадиолокация; магнитометрия; свойства почв; плодородие; черноземные почвы; Буготокский мелкосопочник, Западная Сибирь

Цитирование: Оленченко В.В., Смоленцева Е.Н., Заплавнова А.А., Русалимова О.А., Барсуков П.А. Применение геофизических методов для оценки строения и свойств почв черноземного ряда // Почвы и окружающая среда. 2019. Том 2. № 1. е57. doi: [10.31251/pos.v2i1.57](https://doi.org/10.31251/pos.v2i1.57)

ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных причин низкой урожайности является истощение естественного плодородия почв в результате их длительного сельскохозяйственного использования при недостаточном уровне применения удобрений. Расчет оптимальных доз удобрений основан на фактическом содержании элементов питания в почве, которое зависит от естественной гетерогенности почвенного покрова и часто проявляется в значительной степени даже в пределах одного поля. Для учета неоднородности почвенного покрова проводят крупномасштабное почвенное картографирование, а уже на его основе выполняют детальное агрохимическое обследование почв, включающее определение запасов питательных элементов. Мировой опыт последних десятилетий показывает эффективность применения геофизических методов оценки поверхностного слоя почв для решения задач почвенного картографирования (Mathe, Leveque, 2003; Shi, Ciorra, 2006; Handbook ..., 2008; Пягай и др., 2009; Rogers et al., 2009; Воронин, 2015; Algeo et al., 2016). Важно отметить, что геофизические методы, по сравнению с традиционным обследованием почв, являются гораздо менее время- и трудозатратными.

Почвенный покров Западной Сибири в силу специфики почвообразующих пород и биоклиматических условий, контролирующих процессы почвообразования, имеет свои особенности, которые следует учитывать при оценке свойств почв с помощью геофизических методов. Работы, посвященные этой тематике, практически отсутствуют в нашем регионе, за исключением нашей недавней публикации (Заплавнова и др., 2018). Из других работ, связанных с применением геофизических методов в Сибири, но лишь косвенно относящихся к теме оценки строения и свойств почв, можно отметить лишь работы по использованию метода малоглубинного индукционного частотного зондирования при изучении подповерхностных неоднородностей в Западной Сибири (Манштейн, 2010) и использование электрофизических методов при изучении электрических свойств черноземных почв в Восточной Сибири (Башкуев, 2014).

Основная цель наших исследований состояла в поиске связи между морфологическими характеристиками почв и их свойствами, характеризующими потенциальное и эффективное плодородие, определяемыми общепринятыми в почвоведении методами, и результатами обследования поверхностного слоя почв геофизическими методами с помощью площадной магнитной съемки, электротомографии и георадиолокации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования выполнены на территории Буготакского мелкосопочника, который является частью Предсалаирской денудационно-аккумулятивной равнины, расположенной на юге Западной Сибири в правобережной части бассейна Оби. Буготакский мелкосопочник представляет собой возвышенную холмистую равнину с абсолютными отметками высот 200-350 м. Основными элементами рельефа являются склоны, преимущественно выпуклой формы (Шапорина и др., 2016). Коренные породы сложены среднедевонской буготакской толщей (D2bg), представленной осадочно-вулканогенным комплексом. В составе этой толщи преобладают миндалекаменные диабазовые и полевошпатовые порфириды, спилиты, их туфы и туфобрекчии. Породы чрезвычайно неравномерно динамометаморфизованы, рассланцованы до альбито-хлоритотремолитовых метаморфических сланцев. Осадочные породы состоят из туфопесчаников и туфоалевролитов с прослоями известняков, часто метаморфизованными до мрамора (Геологическая ..., 1963).

Почвообразующими породами преимущественно являются четвертичные лессовидные карбонатные суглинки мощностью до 10-15 м (Танасиенко, 2004). Эти породы характеризуются высокой пористостью и хорошо выраженной вертикальной столбчатостью. Их особенностью также является высокое содержание фракции крупной пыли (40-50%), почти полное отсутствие крупнопесчаной фракции, высокое содержание карбонатов (до 10% CaCO_3) и отсутствие засоления. По гранулометрическому составу эти породы весьма однородны и относятся к иловато-

крупнопылеватым средним и тяжелым карбонатным суглинкам (Смоленцева и др., 2018). Еще одна особенность данного типа суглинков заключается в их характерном микроморфологическом строении, а именно конгломеративно-ячеистой структуре, когда крупные пылеватые и даже песчаные частицы составляют ядро микроагрегата, вокруг которого глинистые частицы связывают пылеватые, образуя конкреции с губчатой поверхностью (Никитенко, 1963). Дальнейшая цементация происходит под действием минеральных растворов, перемещающихся в виде пленочной влаги или коллоидов. Такие структурные связи между частицами в лессовидном суглинке часто очень слабы и при достаточно длительном воздействии воды, вследствие выщелачивания карбонатного или размягчения глинисто-коллоидального цемента, начинают ослабевать и утрачиваться, что создает условия для легкой размываемости этого материала в поверхностных слоях почвы (Шапорина и др., 2016).

По биоклиматическому районированию исследуемая территория относится к лесостепной зоне. Климат – резко континентальный, характеризуется холодной и продолжительной зимой, довольно жарким и коротким летом и короткой, порой с бурным снеготаянием, весной. Сумма осадков в среднем 400 мм с максимумами до 550 мм, из них доля осадков зимнего периода составляет до 40% (Шапорина и др., 2016).

Наши исследования выполнены на двух ключевых площадках в пределах одного поля (пашня), различающихся залеганием по элементам рельефа (позиции катены):

ЕL – элювиальная позиция катены, расположенная в верхней части склона, т.е. на участке, слабо подверженном водной эрозии,

АК – аккумулятивная позиция катены, расположенная в самой нижней части склона, куда переносится значительное количество смываемых частиц поверхностных горизонтов почв, залегающих выше по склону в результате водной эрозии (особенно после весеннего снеготаяния). Обследование поверхности почвы геофизическими методами ключевой площадки АК включало также расположенный рядом целинный участок с естественной луговой растительностью.

Учитывая, что геофизические методы исследований знакомы не для всех представителей широкой аудитории почвоведов, остановимся на описании этих методов более подробно.

Электротомография относится к электроразведочным методам геофизики и основана на различии почв, горных пород и руд по удельному электрическому сопротивлению (УЭС). С помощью заземленных питающих электродов через исследуемый объект пропускается электрический ток, а с помощью приемных электродов измеряется разность электрических потенциалов и рассчитывается определенный параметр – т.н. кажущееся удельное электрическое сопротивление. Глубина проникновения тока в почву возрастает при увеличении расстояния между питающими электродами («разноса»). Поэтому для получения эффекта зондирования необходимо измерить УЭС при разных «разносах». В технологии электротомографии измерение УЭС выполняется с помощью многоэлектродного кабеля, подключённого к 48 электродам. Специальный электроразведочный прибор коммутирует различные комбинации электродов, изменяя расстояние между ними, при этом варьируется глубинность зондирования и расположение точки (к которой относят значение измерений) вдоль профиля. Измеренные данные обрабатываются в программе автоматической двумерной инверсии, которая подбирает геоэлектрическую модель разреза, с наименьшей ошибкой приближенную к зарегистрированному электрическому полю (Бобачев, Горбунов, 2005; Балков и др., 2012). По распределению УЭС пород в разрезе делают выводы об их влажности, литологическом составе, засоленности. Для почв, подверженных сезонной мерзлоте или многолетнемерзлых почв электротомография позволяет дать грубую оценку уровня льдистости пород, минерального состава, получить представление о зонах деградации многолетнемерзлых пород.

На выбранных нами ключевых площадках зондирование методом электротомографии было выполнено с помощью аппаратуры «Скала-48». Расстояние между электродами составляло 0.2 м, при этом длина одного профиля была равна 9.4 м. Последовательность подключения электродов соответствовала симметричной установке Шлюмберже, а максимальная глубинность исследования в центральной части профиля составила 2.0 м. При площадных исследованиях на площадках EL и АК расстояние между профилями составляло 2.0 м. Обработка данных электротомографии проводилась с помощью программ Res2Dinv и Res3Dinv. При инверсии использовали робастный способ с ограничением гладкости. В результате были построены геоэлектрические разрезы по каждому из профилей и объёмные геоэлектрические модели исследуемых площадок.

Метод **георадиолокации** основан на отражении электромагнитных волн от границ неоднородностей в изучаемой среде, на которых скачкообразно изменяются электропроводность и диэлектрическая проницаемость. Основными величинами, измеряемыми при георадиолокации, являются время пробега электромагнитной волны от источника до отражающей границы и обратно до приемника, а также амплитуды этих отражений. Передающая антенна георадара излучает короткие (единицы и доли наносекунды) электромагнитные импульсы, обеспечивающие высокую разрешающую способность и широкий спектр радиолокационных сигналов. Генерируемый электромагнитный импульс отражается от границ находящихся в среде предметов с контрастными электрическими свойствами (как металлических, так и неметаллических), или иных неоднородностей, отличающихся от вмещающей среды по диэлектрической проницаемости или электропроводности. Такими неоднородностями могут быть пустоты, границы слоев различных пород, области с различной влажностью и т.д. Отраженный сигнал принимается приемной антенной, преобразуется в цифровой вид и записывается для дальнейшей обработки. При перемещении георадара по поверхности исследуемой среды на экран монитора выводится совокупность сигналов (радарограмма или профиль), по которому определяют местонахождение, глубину залегания и протяженность объектов. Глубинность и разрешающая способность георадиолокации зависят от центральной частоты спектра зондирующего импульса и достигает максимального значения (~20 м) при измерениях на сравнительно низких частотах (50-90 МГц) в средах высокого удельного электрического сопротивления, характеризующихся малым затуханием волн (Владов и др., 1997; Владов, Старовойтов, 2004). Результатом георадиолокационного зондирования является георадиолокационный профиль или радарограмма – массив амплитуд отражённых и дифрагированных волн с дополнительной информацией по каждому пикету зондирования, записанный в цифровом виде и визуализируемый в виде временного или вертикального разрезов исследуемой среды. Георадиолокация позволяет определить границы слоев / горизонтов почвы, различающихся по содержанию органического вещества, и их мощность. Для почв, подверженных сезонной мерзлоте или многолетнемерзлых почв с помощью георадиолокации возможно провести картографирование мощности деятельного (активного) слоя, определить верхнюю часть мерзлого слоя почвы / грунта, распределение жильных льдов и таликовых зон.

На ключевых площадках ЕЛ и АК георадиолокацию (ГРЛ) разрезов проводили с помощью георадара ОКО-2 с антенной центральной частоты 700 МГц. На обеих площадках расстояние между профилями ГРЛ составляло 0.5 м; длина профилей – 9.4 м. Обработку данных выполняли с помощью программы Geoscan32. В результате строили радарограммы по профилям и трёхмерную визуализацию георадарного сигнала в виде куба данных.

Магнитометрия (магниторазведка). Метод основан на различии горных пород и почв по магнитным свойствам (остаточной намагниченности, магнитной восприимчивости). Магнитные свойства пород напрямую зависят от содержания минералов железа (в основном магнетита). В окислительной обстановке, где железо переходит в трёхвалентную форму, магнитные свойства понижаются. Магнитное поле измеряется с помощью специальных приборов – магнитометров. В данной работе применяли протонные магнитометры, чувствительным элементом которых является жидкость, богатая протонами (вода, спирт).

Обычно при измерениях используют два магнитометра — пешеходный (который перемещают по участку исследований для измерения поля) и магнитовариационную станцию (неподвижный, расположенный вблизи участка). После измерений производят учёт вариаций — вычитают значения, полученные на магнитовариационной станции из измеренных на участке. Это позволяет устранить изменения поля в процессе измерений (вариации), вызванные внешними источниками, связанными с солнечной активностью. Глубинность исследования методом магнитометрии зависит от размера исследуемого участка, детальности съёмочной сети и точности измерений. По результатам съёмки строят карту магнитных аномалий и численными методами определяют источники этих аномалий, после чего выполняют интерпретацию данных – устанавливается связь между источниками аномалий и геологическими объектами на основании представлений о магнитных свойствах и строении исследуемой среды (Инструкция по магниторазведке..., 1981). Магнитометрия позволяет выявить особенности строения четвертичной толщи. Для почв, подверженных сезонной мерзлоте или многолетнемерзлых почв с помощью магнитометрии возможно выполнить картирование скрытых полигонально-жильных льдов, сделать анализ магнитной восприимчивости образцов и оценить содержание льда и органического вещества в верхней части почвы / грунта (при наличии прецизионной магнитной съёмки).

В пределах исследуемого нами участка магнитометрия выполнена с помощью оверхаузеровского магнитометра GEM-19. Измерения выполнены по профилям, расстояние между которыми составляло около 10 м. Привязку профилей на местности осуществляли с помощью GPS. Частота измерений по профилю составляла 1 измерение в 3 секунды. Для учета суточных вариаций геомагнитного поля использовали данные магнитной обсерватории г. Новосибирск. Построение карты аномального магнитного поля выполнено с помощью программы Surfer.

Почвенные образцы были проанализированы общепринятыми в почвенно-агрохимических исследованиях методами. Гранулометрический состав определяли по Качинскому (Шейн, Гончаров, 2006) с пересчетом полученных этим методом результатов на фракции почвенных частиц в соответствии с международной классификацией текстуры почвы (Шейн, 2009). Общие углерод и азот определяли на элементном анализаторе PerkinElmer 2400 Series II (PerkinElmer, США). Анализ карбонатов проводили гравиметрическим способом (Теория ..., 2006), pH водной суспензии – потенциометрическим способом (Теория ..., 2006), удельную электропроводность почвенной суспензии – потенциометрическим способом (Пансю, Готеру, 2014). Обменные катионы (калий, кальций и магний) анализировали по Шолленбергеру, используя ацетатно-аммонийный буфер с pH 7.0 в качестве экстрагента (Теория ..., 2006). Нитратный азот определяли потенциометрическим способом с использованием ионоселективного электрода в экстрагенте 0.015M K₂SO₄ (Гинзбург, 1975; Гамзиков, 2013); легкоподвижный фосфор – в экстрагенте 0.015M K₂SO₄ по Карпинскому-Замятиной (Гинзбург, 1975); подвижный фосфор – в экстрагенте 0.2 н раствора аммония яблочнокислого по Николову (Берхин и др., 1989) обменный калий – в экстрагенте 1M CH₃COONH₄ по Масловой (Теория ..., 2006). Потери при прокаливании (ППП) анализировали при сжигания навески почвы при температуре 550°C (Dean, 1974). В дополнении к этому мы определяли потери массы при температурах 105°C, 130°C и 900°C. Таким образом, нашу модификацию метода определения ППП можно рассматривать как «сокращенную» модификацию термогравиметрического анализа ПОВ (Siewert, 2004).

Статистическая обработка данных выполнена в пакете программ прикладной статистики SNEDECOR V5.80 (Сорокин, 2012).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Морфологическое строение профиля почв

На ключевых площадках были заложены почвенные разрезы, проведено детальное описание морфологического строения профилей почв, отобраны почвенные образцы по генетическим горизонтам.

Морфологическое описание почвы площадки EL (элювиальная позиция катены).

Координаты: 55°03'40" с.ш. 83°51'56" в.д. Рельеф: Присалаирская аккумулятивно-денудационная равнина, Буготакский мелкосопочник. Холмисто-увалистый рельеф, верхняя часть межсопочной седловины. Ровный водораздельный участок. Высота над уровнем моря 305 м. Тип использования: пашня, посев яровой пшеницы. Весной 2018 г. проведена плоскорезная обработка на глубину 10 см. Вскипание от 10%-ной HCl – бурное, с глубины 87-88 см, наличие карбонатов по порам в виде псевдомицелия и редкие сегрегационные формы (белоглазка) в карбонатно-аккумулятивном горизонте.

Название почвы по классификации 1977 г.: Чернозем оподзоленный обычный среднемощный среднегумусный тяжелосуглинистый (Классификация ..., 1977).

Название почвы по классификации 2004 г.: Агрочернозем глинисто-иллювиальный элювиированный маломощный мелкопахотный сильно выщелоченный тяжелосуглинистый. Ствол: Постлитогенные почвы; отдел: Аккумулятивно-гумусовые (Полевой ..., 2008).

Фото профиля почвы	Индексы горизонта, мощность, см	Описание горизонта
	PU' 0-10	Влажный, тёмно-серый (10YR 3/1; very dark gray), порошисто-комковатый, плотноват, тяжелосуглинистый, корни растений, прошлогодние пожнивные остатки. Переход ясный по цвету и плотности, граница ровная.
	PU'' 10-20	Влажный, тёмно-серый (10YR 3/1; very dark gray), окраска однородная, тяжелосуглинистый, крупнокомковатый, плотноват, но плотнее предыдущего, много корней. Переход заметный по структуре и плотности, граница ровная.
	AU 20-38	Влажный, тёмно-серый (10YR 3/1; very dark gray), почти чёрный, окраска однородная, тяжелосуглинистый, зернистокомковатый, есть копролиты, уплотнён, мелкопористый, много корней, ходы червей. Переход заметный по цвету, граница слабоволнистая.
	AUBIel 38-46	Влажноват, пятнистый, на серовато-тёмно-буром фоне (10YR 4/2; dark grayish brown), бурые пятна и вертикальные полосы, тяжелосуглинистый, комковато-мелко-ореховатый, структура однопорядковая, скелетаны на поверхности агрегатов, мелко трещиноват, плотноват, корни растений, ходы червей. Переход ясный по цвету и структуре, граница мелко языковатая.
	BIel 46-60	Влажноват, пятнистый, на тёмно-коричневом (10YR 4/3; dark brown) фоне тёмно-бурые и тёмно-серые вертикальные полосы и пятна, тяжелосуглинистый, комковато-мелкопризматический, структура однодвухпорядковая, трещиноват. Коричневые глинистые тонкие (до 1 мм) кутаны по поверхности агрегатов и по вертикальным стенкам трещин. Поверх кутан лежат пылеватые скелетаны (кремнезёмистая присыпка) заметные при высыхании. Плотный, слабо пористый, единичные корни растений. Ходы корней и червороины с копролитами из материала тёмногумусового горизонта. Переход заметный по структуре и окраске, граница волнистая.
	BI 60-87	Влажноват, фон желтовато-коричневый (10YR 5/3; brown), редкие вертикальные тёмно-серые полосы, легкоглинистый, мелко призматический. Слабые тёмно-коричневые глинистые кутаны по граням агрегатов, но меньше в BIel. Скелетаны отсутствуют. Плотный, единичные корни растений. Переход резкий по вскипанию, граница волнистая.
	BCAmc 87-110	Влажноват, однородно окрашен, палево-светло-коричневый (10YR 6/3; pale brown), легкоглинистый, мелко глыбистый, плотноват, крупно пористый, бурно вскипает от HCl, наличие карбонатов в виде псевдомицелия по порам, а также общая пропитка, единичные корни. Переход резкий по вскипанию, граница волнистая.
BCAnc 110-140	Влажноват, однородно окрашен, желтовато-светлокоричневый (10YR 6/4; light yellowish brown), легкоглинистый, мелко глыбистый, плотноват, крупно пористый, бурно вскипает от HCl, наличие карбонатов в виде псевдомицелия и белоглазки (сегрегационные формы), единичные корни. Переход постепенный, граница слабо волнистая.	

	Сса 140-200	Влажноват, палево-светло-коричневый (10YR/7/3; very pale brown), легкоглинистый, мелко-глыбистый, плотноват, крупнопористый, бурно вскипает от HCl, карбонаты диффузно-рассеянные (пропитка). Лессовидный карбонатный суглинок.
--	----------------	--


Типодиагностическими горизонтами агрочернозема глинисто-иллювиального являются поверхностный агротемногумусовый, расположенный под ним темногумусовый и срединный глинисто-иллювиальный. Переходный горизонт AUBIel и верхняя часть срединного горизонта этого профиля имеют пылеватые скелетаны на поверхности структурных агрегатов, которые диагностируют элювиированный подтип. Карбонаты расположены на глубине 87 см, что соответствует видовому признаку сильно выщелоченный (Смоленцева и др., 2018).

Морфологическое описание почвы площадки АК (аккумулятивная позиция катены).

Координаты: 55°03'37" с.ш. 83°52'06" в.д. Рельеф: Присалаирская аккумулятивно-денудационная равнина, Буготакский мелкосопочник. Холмисто-увалистый рельеф, верхняя часть ложбины стока на склоне южной экспозиции. Высота над уровнем моря 295 м. Тип использования: Пашня, посев пшеницы. Карбонаты в профиле отсутствуют до глубины 300 см.

Название почвы по классификации 1977 г.: Луговато-черноземная оподзоленная мощная малогумусная тяжелосуглинистая намытая (Классификация ..., 1977).

Название почвы по классификации 2004 г.: Агростратозем темногумусовый на агрочерноземе глинисто-иллювиальном мощном мелкопахотном тяжелосуглинистом. Ствол: Синлитогенные почвы; отдел: Стратоземы (Полевой ..., 2008).

Фото профиля почвы	Индексы горизонта, мощность, см	Описание горизонта
	PU [*] 0-10	Влажноват, тёмно-серый (10YR 4/1; dark gray), мелкие светло-бурые пятна, комковато-глыбистый, плотноват, тяжелосуглинистый, корни растений, прошлогодние пожнивные остатки. Переход ясный по плотности, граница ровная.
	RU 22-70	Влажный, с глубиной становится сырым, местами сочится вода, окраска неоднородная, на буровато-тёмносером фоне (10YR 4/2; dark grayish brown) мелкие светло-бурые пятна, глыбистый, плотный, тяжелосуглинистый, корни растений. Переход заметный по цвету и плотности, граница волнистая.
	[AU] 70-90	Влажный, тёмно-серый (10YR 3/1; very dark gray), окраска однородная, крупно комковатый, плотноват, тяжелосуглинистый, редкие корни растений. Переход заметный по окраске, граница волнистая.
	[AUBI] 90-130	Влажноват, неоднородно окрашен, на буром фоне тёмно-серые полосы и пятна, мелко призмочный, по вертикальным поверхностям агрегатов – слабые тёмнокоричневые глинистые кутаны, тяжелосуглинистый, плотноват, мелко трещиноват, мелко пористый, единичные корни растений, крупная кротовина заполнена материалом из нижележащего горизонта. Переход заметный по цвету, граница волнистая.
	[BI] 130-200	Влажноват, желтовато-коричневый (10YR 5/4), редкие вертикальные тёмно-серые полосы, тяжелосуглинистый. Мелко-ореховато-призматический, структура двухпорядковая: призмы распадаются на ореховатые отдельности. Слабые тёмно-коричневые глинистые кутаны по граням агрегатов. Плотный, единичные корни растений.

Типодиагностическими горизонтами агростратозема темногумусового являются поверхностный агротемногумусовый горизонт и расположенный под ним стратифицированный темногумусовый. Для типовой диагностики также было принято во внимание наличие погребенной почвы на глубине 70 см (Смоленцева и др., 2018).

Физические и химические свойства почв

Гранулометрический состав почв определен в соответствии с двумя классификациями элементарных почвенных частиц: по Н.А. Качинскому (принятой в России) (Шеин, Гончаров, 2006) и международной (IUSS Working Group WRB, 2014). В пахотном слое (агротемногумусовый горизонт, PU) обеих почв преобладают фракции крупной пыли (41-45%) и ила (20-25%) (табл. 1). По содержанию мелкой пыли горизонты PU почв отличаются ее содержанием, составляя 19-20% в агрочерноземе и 13-14% в агростратоземе. В агрочерноземе от нижней части темногумусового горизонта (AU) к верхней части иллювиального горизонта (BIel) происходит снижение содержания крупнопылевой фракции на 6% и на 5% – мелкопылевой, а содержание илистой фракции значительно (на 13%) увеличивается. Это свидетельствует о естественных процессах миграции тонкодисперсных частиц в иллювиальный горизонт, что является характерным признаком почвообразования этих почв.

Таблица 1

Гранулометрический состав изученных черноземных почв в соответствии с российской классификацией элементарных почвенных частиц по Н.А. Качинскому

Горизонт почвы	Глубина ^{&} , см	Содержание фракций*, %; размеры частиц, мм							
		1-0.25	0.25-0.05	0.05-0.01	0.01-0.005	0.005-0.001	<0.001	Σ >0.01	Σ <0.01
Агрочернозем									
PU'	0-10	0.07	5.57	42.04	10.64	20.24	21.44	47.7	52.3
PU''	10-20	0.09	3.79	41.48	14.84	19.36	20.44	45.4	54.6
AU	20-30	0.05	1.11	49.84	11.48	18.84	18.68	51.0	49.0
AU	30-38	0.04	3.52	43.12	11.96	16.28	25.08	46.7	53.3
AUBIel	38-46	0.03	4.22	37.40	10.63	14.52	33.20	41.7	58.4
BIel	48-58	0.02	2.98	37.32	9.76	11.44	38.48	40.3	59.7
BI	70-80	0.00	2.16	37.20	10.44	11.56	38.64	39.4	60.6
BCAmc	95-105	0.00	1.70	37.50	11.00	11.40	38.40	39.2	60.8
BCAnc	120-130	0.07	0.53	37.72	11.32	14.88	35.48	38.3	61.7
BCAnc	130-140	0.05	0.35	35.52	12.12	14.40	37.56	35.9	64.1
Cca	150-160	0.08	0.08	33.72	11.76	15.20	39.16	33.9	66.1
Cca	190-200	0.53	0.11	37.80	11.28	14.44	35.84	38.4	61.6
Агростратозем									
PU	0-22	0.09	6.59	44.96	10.00	13.80	24.56	51.6	48.4
RU	30-40	0.09	5.95	43.08	10.96	13.60	26.32	49.1	50.9
RU	40-50	0.17	5.43	44.72	10.60	14.56	24.52	50.3	49.7
RU	50-60	0.06	4.74	45.56	9.24	15.68	24.72	50.4	49.6
RU	60-70	0.14	8.22	43.52	10.44	17.40	20.28	51.9	48.1
[AU]	75-85	0.14	6.98	53.16	9.92	17.96	11.84	60.3	39.7
[AUBI]	100-110	0.02	4.42	47.12	12.00	15.12	21.32	51.6	48.4
[BI]	130-140	0.01	6.75	42.72	9.00	12.64	28.88	49.5	50.5

Примечание.

& – глубина взятия образца; * – % от сухой почвы (высушенной при 105°C); название фракций: 1-0.25 мм – крупный и средний песок, 0.25-0.05 мм – мелкий песок, 0.05-0.01 мм – крупная пыль, 0.01-0.005 мм – средняя пыль, 0.005-0.001 мм – мелкая пыль, <0.001 – ил.

Агростратозем характеризуется значительной мощностью слоя (75 см) с заметной аккумуляцией обогащенного почвенным органическим веществом (ПОВ) материала, который образовался в процессе длительной седиментации твердого стока с расположенных выше по склону почв. Этот слой состоит из агротемногумусового и залегающего под ним стратифицированного темногумусового горизонта. Гранулометрический состав темногумусового горизонта практически не изменяется с глубиной. Являясь намытым, этот горизонт (RU) расположен на погребенном темногумусовом

горизонте [AU]. Последний отличается от вышележащего RU повышенным на 10% содержанием фракции крупной пыли и сниженным на соответствующую величину количеством илистой фракции. В иллювиальном горизонте агростратозема [BI], по сравнению с погребенным темногомусовым горизонтом [AU], происходит снижение на 10% фракции крупной пыли и на 5% – мелкой пыли, а содержание илистой фракции увеличивается на 17%. Это указывает на аналогичный процесс текстурной дифференциации погребенных горизонтов [AU] и [BI] агростратозема, как и в современных горизонтах AU и BI агрочернозема.

При анализе гранулометрического состава почв по международной классификации элементарных почвенных частиц (табл. 2) получены в целом те же закономерности: в агрочерноземе содержание наиболее тонкодисперсной глинистой фракции увеличивается от горизонтов AU к BI на 11%, а в погребенных горизонтах [AU] к [BI] агростратозема – на 20%. Отметим также, что почва агростратозема (по всему профилю) значительно более обогащена фракцией песка, по сравнению с агрочерноземом, где высокое содержание песчаной фракции наблюдается лишь в самой верхней части агротемногомусового горизонта. Наибольший вклад (более 90%) в эту фракцию имеет мелкий песок (табл. 1).

Таблица 2

Гранулометрический состав изученных черноземных почв в соответствии с международной классификацией элементарных почвенных частиц и сравнение названий гранулометрического состава почв по международной классификации (Шейн, 2009) и по Н.А. Качинскому

Горизонт почвы	Глубина [§] , см	Содержание фракций*, %; размеры частиц, мм			Наименование почв по гранулометрическому составу	
		>0.05	0.002-0.05	<0.002	по международной классификации	по Н.А. Качинскому
Агрочернозем						
PU'	0-10	5.64	64.07	30.29	тяжелый суглинок (иловатый)	суглинок тяжелый
PU''	10-20	3.88	67.19	28.93	тяжелый суглинок (иловатый)	суглинок тяжелый
AU	20-30	1.16	71.86	26.98	тяжелый суглинок (пылеватый)	суглинок тяжелый
AU	30-38	3.56	64.29	32.15	тяжелый суглинок (иловатый)	суглинок тяжелый
AUBIel	38-46	4.25	56.40	39.35	тяжелый суглинок (иловатый)	суглинок тяжелый
BIel	48-58	3.00	53.80	43.20	легкая глина (иловато-пылеватая)	суглинок тяжелый
BI	70-80	2.16	54.43	43.41	легкая глина (иловато-пылеватая)	глина легкая
BCA _{mc}	95-105	1.70	55.19	43.11	легкая глина (иловато-пылеватая)	глина легкая
BCA _{nc}	120-130	0.60	57.66	41.74	легкая глина (иловато-пылеватая)	глина легкая
BCA _{nc}	130-140	0.40	56.03	43.57	легкая глина (иловато-пылеватая)	глина легкая
C _{ca}	150-160	0.16	54.35	45.49	легкая глина (иловато-пылеватая)	глина легкая
C _{ca}	190-200	0.64	57.45	41.91	легкая глина (иловато-пылеватая)	глина легкая
Агростратозем						
PU	0-22	6.68	62.74	30.58	тяжелый суглинок (иловатый)	суглинок тяжелый
RU	30-40	6.04	61.74	32.22	тяжелый суглинок (иловатый)	суглинок тяжелый
RU	40-50	5.60	63.54	30.86	тяжелый суглинок (иловатый)	суглинок тяжелый
RU	50-60	4.80	63.66	31.54	тяжелый суглинок (иловатый)	суглинок тяжелый
RU	60-70	8.36	63.71	27.93	тяжелый суглинок (иловатый)	суглинок тяжелый
[AU]	75-85	7.12	72.98	19.90	тяжелый суглинок (пылеватый)	суглинок средний
[AUBI]	100-110	4.44	67.59	27.97	тяжелый суглинок (иловатый)	суглинок тяжелый
[BI]	130-140	6.76	58.93	34.31	тяжелый суглинок (иловатый)	суглинок тяжелый

Примечание. [§] – глубина взятия образца; * – % от сухой почвы (высушенной при 105°C); название фракций: >0.05 мм – песок, 0.002-0.05 мм – ил, <0.002 мм – глина.

Почвенное органическое вещество (ПОВ) является ключевым параметром, определяющим экологические функции почв, их плодородие, и косвенно – продуктивность агроэкосистем. Количество и характер распределения ПОВ и отдельных его компонентов в пределах почвенной толщи служит важной генетической характеристикой почв (Смоленцева и др., 2018). В нашей работе ПОВ оценивали с помощью ряда показателей – общее содержание углерода и азота, соотношение C/N, потери веса при прокаливании почвы при различных диапазонах температур. Отметим, что органический углерод (или гумус), определяемый по методу Тюрина, следует отличать от общего углерода, определяемого на элементном анализаторе (Наумова, 2018). Приводимые в таблице 3 значения «гумуса» рассчитывали из

общего углерода (умножением на коэффициент 1.724) и поэтому этот показатель является несколько условным – завышенным (по сравнению с гумусом, рассчитываемым через органический углерод), особенно для горизонтов с заметным содержанием карбонатов.

Применение термогравиметрического анализа ПОВ позволило установить, что потери массы при прокаливании в различном диапазоне температур хорошо коррелируют с компонентами ПОВ, отличающимися по устойчивости к микробному разложению, содержанию органического углерода и азота, содержанию глины, карбонатов (Siewert, 2004; Kucerik et al., 2016, 2018). Поскольку у нас отсутствуют инструментальная возможность полноценного применения термогравиметрического метода анализа ПОВ, мы использовали «расширенный» метод анализа потерь при прокаливании, последовательно определяя потери массы при температурах 105°C, 130°C, 550°C и 900°C. Исходя из результатов определения качества ПОВ с помощью термогравиметрического метода (Dean, 1974; Siewert, 2004; Siewert et al., 2012; Kucerik et al., 2016, 2018), можно утверждать, что потери массы в диапазоне температур от 105 до 550°C достаточно хорошо соответствуют содержанию органических углерода и азота, в диапазоне от 550 до 900°C – содержанию карбонатов; в диапазоне от 130 до 550°C характеризуют лабильное и стабилизированное специфическое ПОВ (близкое к понятию гумуса, но не эквивалентное по его абсолютной величине); потери массы при высушивании почвы от воздушно-сухого состояния до 105°C менее строго коррелируют с биологической активностью почвы (определяемой через эмиссию CO₂ при аэробной инкубации), а до 130°C – с количеством физически и химически связанной воды органических веществ, адсорбированных на поверхности частиц глинистых минералов.

В темногомусовом горизонте агрочернозема содержание общего углерода постепенно снижается с глубиной с 5.3% до 3.1%, а фракция {Т130-550°C} – с 12% до 8% (табл. 3).

Таблица 3

Характеристика почвенного органического вещества изученных черноземных почв

Горизонт почвы	Потери от прокаливания [#] в диапазоне температур, %						Элементный анализ [#] , %			
	Т 105°C	Т 105-130°C	Т 130-550°C	Т 550-900°C	Т 105-900°C	Т 900°C	C _{общ}	гумус	N _{общ}	C/N [@]
Агрочернозем										
PU'	3.48	0.63	11.85	0.68	13.15	16.63	5.25	9.05	0.413	14.8
PU''	3.62	0.60	11.01	1.00	12.61	16.23	4.99	8.61	0.381	15.3
AU	4.09	0.66	10.94	0.69	12.29	16.38	4.90	8.44	0.373	15.3
AU	3.56	0.63	8.25	0.67	9.56	13.12	3.12	5.37	0.244	14.9
AUBIel	3.14	0.49	4.91	0.70	6.10	9.24	1.30	2.23	0.125	12.1
BIel	3.21	0.43	4.29	0.65	5.37	8.58	0.75 ^ε	1.29	0.079*	11.0 [§]
BI	3.22	0.48	3.80	0.69	4.97	8.20	0.47 ^ε	0.81	0.057*	9.7 [§]
BCAnc	2.57	0.40	4.03	5.43	9.86	12.43	0.31 ^ε	0.53	0.038*	9.4 ^{&}
BCAnc	2.83	0.43	4.17	3.98	8.58	11.41	0.34 ^ε	0.59	0.043*	9.4 ^{&}
BCAnc	2.74	0.41	4.10	3.99	8.50	11.24	0.35 ^ε	0.61	0.044*	9.4 ^{&}
Cca	1.94	0.42	5.03	4.49	9.94	11.87	0.47 ^ε	0.81	0.058*	9.4 ^{&}
Cca	2.36	0.48	4.23	1.97	6.68	9.04	0.45 ^ε	0.77	0.056*	9.4 ^{&}
Агростратозем										
PU	2.90	0.44	7.61	0.54	8.59	11.49	3.05	5.26	0.258	13.8
RU	3.36	0.47	6.75	0.52	7.74	11.10	2.57	4.43	0.216	13.9
RU	3.21	0.46	6.48	0.54	7.48	10.69	2.52	4.35	0.213	13.8
RU	3.11	0.44	6.67	0.56	7.66	10.77	2.53	4.37	0.211	14.0
RU	3.20	0.42	7.61	0.51	8.53	11.73	2.95	5.08	0.243	14.1
[AU]	3.17	0.48	9.42	0.55	10.44	13.61	4.61 ^ε	7.95	0.420 [¥]	12.8
[AUBI]	2.18	0.31	4.39	0.53	5.24	7.41	1.34 ^ε	2.32	0.165 [¥]	9.5
[BI]	2.81	0.29	3.44	0.57	4.30	7.11	0.49 ^ε	0.85	0.110 [¥]	5.2

Примечание.

[#] – % от воздушно-сухой почвы; [@] – молярное соотношение элементов; ^ε – пересчитано с C_{орг} (определено по методу Тюрина) на C_{общ}, умножив C_{орг} на коэффициент 1.067 (полученный как средний при анализе соотношения C_{орг} и C_{общ} в почвенных разрезах, расположенных между двумя изученными почвами); * – рассчитано исходя из соотношения C/N; [§] – среднее из 4 значений C/N для таких же горизонтов рядом расположенных почвенных разрезов; [&] – содержание C/N в среднем для черноземов выщелоченных и оподзоленных в слоях ниже 50 см (Гамзиков, 2013); [¥] – определено по методу Кьельдаля.

Обогащение ПОВ азотом остается одинаковым по всему горизонту: C/N равен 15. В иллювиальном горизонте происходит резкое снижение содержания общего азота до 0.75% и далее по профилю почвы в нижней части этого горизонта оно падает еще в 2 раза до 0.35%.

Среднее содержание общего углерода в темнугумусовом горизонте агростратозема почти в 1.7 раза ниже, чем в агрочерноземе: 2.7% vs 4.6%. В отличие от агрочернозема, в агростратоземе содержание как общего углерода так и фракции {T130-550°C} в пределах всего темнугумусового горизонта изменяется в меньшей степени. Также слабо изменяется и соотношение C/N равное 14. В погребенном горизонте [AU] содержание общего углерода совпадает со средним содержанием этого элемента в AU горизонте агрочернозема, а фракция {T130-550°C} несколько ниже: 9.4% vs 10.5%.

Содержание общего углерода (включающего углерод карбонатов) в почвообразующей породе – субэральных лессовидных карбонатных суглинках, составило 0.4-0.5%, из которых содержание органического углерода обычно варьирует в пределах 0.1-0.2% (Смоленцева и др., 2018). В резко убывающем по профилю распределении органического вещества почв Буготакского мелкосопочника просматривается специфика фациального «сибирского» признака – общая небольшая мощность гумусового горизонта, но высокое содержание гумуса в верхней части профиля. Такое отличие обусловлено региональной спецификой гидротермического режима черноземной области Западной Сибири, которое отражается, прежде всего, на количественных параметрах гумусово-аккумулятивного процесса и ведет к специфике профильного распределения гумуса и его запасов (Кленов, 1981; Хмелев, 1989).

Глубина залегания карбонатов существенно различалась в профиле изученных почв: в агрочерноземе карбонаты находятся начиная с глубины 87 см, а в агростратоземе карбонаты не были обнаружены в почвенной толще до 300 см. Для карбонатного профиля агрочернозема характерна растянутая миграционная зона с четко выраженной зоной аккумуляции, совпадающей или почти совпадающей с линией вскипания (Смоленцева и др., 2018). В этой почве было обнаружено бимодальное профильное распределение карбонатов, первый максимум которого (11.2% CaCO₃) приурочен к аккумулятивно-карбонатному горизонту ВСА_{тс} на глубине около 95 см, а второй максимум (12.5% CaCO₃) – к почвообразующей породе на глубине около 150 см (табл. 4). На эти же пики точно указывает и фракция ППП {T550-900°C}, характеризующая содержание карбонатов (табл. 3).

Содержание карбонатов существенно влияло на кислотно-щелочные свойства почвенных горизонтов. Если в верхней части профиля агрочернозема реакция среды близка к нейтральной (6.2-6.6 ед. рН), то в нижней части, начиная с горизонта ВСА_{тс}, она резко переходит в щелочную (8.3-8.5 ед. рН). Агростратозем, ввиду отсутствия карбонатов или их крайне низкого содержания, характеризуется реакцией среды близкой к нейтральной во всех горизонтах почвы: рН варьировало в узких пределах от 6.2 до 6.5 (табл. 4).

Обогащенность почвообразующих пород карбонатами не только является причиной щелочной реакции среды в нижних горизонтах почв, но и способствует тому, что в составе почвенного поглощающего комплекса автоморфных почв Предалтайской лесостепной почвенной провинции преобладают кальций и магний (Смоленцева и др., 2018). Это хорошо иллюстрируют полученные нами данные (табл. 5). Рассматривая содержание обменных катионов, выраженное в мг-экв/100 г, было получено, что во всех горизонтах обеих почв преобладает обменный кальций, вклад которого в сумму трех обменных катионов составил 87% для агрочернозема и 81% для агростратозема. Вклад магния был существенно меньше и равен 10% и 15%, соответственно. Вклад калия в сумму обменных катионов был в 3-4 раза меньше, чем магния.

Рассматривая кальций и магний как элементы минерального питания растений, следует отметить, что содержание обоих элементов (в мг/кг) в слое почвы 0-20 см (диагностируемый слой почвы) соответствует градации «очень высокое» в агрочерноземе и «высокое» – в агростратоземе.

Содержание обменных катионов обычно связано с электропроводностью почвы (почвенных суспензий). Через электропроводность рассчитывается общее содержание растворенных веществ. Тенденция изменения двух последних показателей с глубиной в обеих почвах была следующей: постепенное снижение их величин вниз по профилю, включая иллювиальный горизонт VI (табл. 4). В агрочерноземе, отличающимся высоким содержанием карбонатов в нижней части почвенного профиля, величины электропроводности резко увеличиваются, начиная с горизонта ВСА_{тс}: с 94 до 215 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Далее вниз по профилю можно отметить тенденцию постепенного повышения величины электропроводности до 260 $\mu\text{S}/\text{cm}$ в почвообразующей породе на глубине 200 см.

Таблица 4

Физико-химические и химические свойства изученных черноземных почв

Горизонт почвы	pH водный	Электропроводность, $\mu\text{S}/\text{см}$	Общее содержание раств. солей*, мг/кг	Карбонаты (CaCO_3), %	Нитраты, мг N/кг	Фосфор легкоподвижный, мг $\text{P}_2\text{O}_5/\text{кг}$	Фосфор подвижный, мг $\text{P}_2\text{O}_5/\text{кг}$	Калий обменный, мг $\text{K}_2\text{O}/\text{кг}$
Агрочернозем								
PU'	6.49	175	112	0.00	8.32	0.44	32.7	490
PU''	6.49	146	93	1.25	4.77	0.18	13.6	296
AU	6.59	126	81	1.25	2.54	0.11	9.3	227
AU	6.51	99	63	1.66	1.10	0.17	8.5	231
AUBIel	6.45	75	48	0.84	0.50	0.22	6.2	392
BIel	6.24	105	67	0.41	0.62	0.10	5.9	429
BI	6.51	94	60	0.41	0.37	0.06	4.8	296
BCAmc	8.32	215	137	11.21	0.46	0.15	6.3	374
BCAnc	8.31	246	157	9.55	0.65	0.13	4.7	251
BCAnc	8.49	231	148	9.14	0.35	0.06	3.8	318
Cca	8.40	243	156	12.46	0.65	0.08	3.9	301
Cca	8.34	260	166	4.98	0.51	0.09	8.1	318
Агростратозем								
PU	6.28	168	108	0.00	12.47	1.12	92.5	651
RU	6.27	122	78	0.00	3.18	0.23	30.3	464
RU	6.24	123	78	0.00	3.78	0.28	29.3	445
RU	6.30	121	78	0.00	3.02	0.36	35.4	468
RU	6.39	107	69	0.43	3.36	0.22	35.5	330
[AU]	6.50	100	64	0.43	3.58	0.59	44.2	255
[AUBI]	6.43	77	49	0.43	1.28	0.47	58.1	371
[BI]	6.48	58	37	0.43	0.62	0.28	48.5	484

Примечание.

* – в пересчете на NaCl; расчеты на воздушно-сухую почву

Содержание подвижных (доступных растениям) форм всех трех основных элементов минерального питания было максимальным в самой верхней части агрономогумусового горизонта обеих почв (табл. 4). Содержание нитратного азота в слое 0-20 см агрочернозема соответствовало градации «очень низкое», а агростратозема – «низкое» (Гамзиков, 2013). Ниже 20 см количество нитратного азота варьировало в незначительных пределах от 0.1 до 0.4 мг N/кг.

Содержание легкоподвижного фосфора в слое 0-20 см агрочернозема соответствовало градации «низкое», а агростратозема – «среднее» (Берхин и др., 1989). Вниз по профилю почвы содержание этого пула питательного элемента снижается. Можно отметить несколько большую величину легкоподвижного фосфора (0.6 мг $\text{P}_2\text{O}_5/\text{кг}$) в погребенном горизонте [AU]. В среднем по всем горизонтам, содержание легкоподвижного фосфора в агростратоземе было в 3 раза выше, чем в агрочерноземе.

Содержание подвижного фосфора в слое 0-20 см агрочернозема соответствовало градации «среднее», а агростратозема – «высокое» (Берхин и др., 1989). В целом, тенденции изменения этого пула элемента питания по профилю почв соответствовали таковой для легкоподвижного фосфора. Однако разница в содержании подвижного фосфора в двух исследуемых почвах была более контрастной: содержание фосфора в среднем по всем горизонтам агростратозема было в 5.2 раза выше, чем в агрочерноземе.

Содержание обменного калия в слое 0-20 см обеих почв характеризуется как «высокое» (Якименко, 2003). Этот пул распределен более равномерно по профилям почв. Небольшое повышение его содержания наблюдалось в верхней части иллювиального горизонта BIel (до 429 мг $\text{K}_2\text{O}/\text{кг}$) агрочернозема и верхней части погребенного иллювиального горизонта [BI] (до 484 мг $\text{K}_2\text{O}/\text{кг}$) агростратозема.

Обменные катионы изученных черноземных почв

Горизонт почвы	мг-экв/100 г				мг/кг			
	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	сумма	K	Mg	Ca	сумма
Агрочернозем								
PU'	1.04	4.17	22.4	27.6	407	507	4489	5402
PU''	0.63	4.16	22.4	27.2	246	506	4489	5241
AU	0.48	3.62	22.4	26.5	189	440	4486	5114
AU	0.49	3.25	20.9	24.6	192	395	4182	4768
AUBIel	0.83	2.72	17.9	21.5	325	331	3587	4243
BIel	0.91	2.71	18.5	22.1	356	330	3698	4384
BI	0.63	2.72	18.9	22.2	246	331	3787	4363
BCAnc	0.79	1.81	25.4	28.0	310	220	5083	5613
BCAnc	0.53	1.82	25.8	28.2	208	221	5171	5600
BCAnc	0.68	1.81	24.9	27.4	264	221	4997	5482
Cca	0.64	1.81	26.3	28.8	250	220	5280	5750
Cca	0.68	1.80	25.4	27.8	264	219	5082	5565
Агростратозем								
PU	1.38	3.62	17.5	22.5	541	441	3497	4478
RU	0.98	3.25	16.9	21.1	385	396	3385	4166
RU	0.94	3.26	17.4	21.6	369	396	3496	4261
RU	0.99	3.26	17.5	21.7	388	396	3499	4283
RU	0.70	3.26	17.9	21.9	274	397	3585	4256
[AU]	0.54	2.27	18.9	21.7	212	276	3784	4271
[AUBI]	0.79	2.26	13.0	16.0	308	275	2598	3180
[BI]	1.03	3.25	13.0	17.2	402	396	2598	3395

Примечание.

Расчеты приведены на воздушно-сухую почву.

Результаты обследования поверхностного слоя почвы геофизическими методами

В результате проведения магниторазведки обследуемого участка, включающего ключевые площадки EL и АК, были получены план изолиний и график аномального магнитного поля (рис.1). Амплитуда изменения аномального магнитного поля T_a в пределах площадки составляла около 250 нТл. Такой высокий уровень аномального поля связан с особенностями геологического строения территории. В северо-западной части площадки, где девонские слабомагнитные породы подходят близко к поверхности, поле имеет минимальные значения. Коренные породы погружаются на юго-восток, при этом возрастает мощность высокомагнитных покровных суглинков. Это выражается в увеличении амплитуды магнитного поля. На фоне сильных изменений T_a , связанных с геологическими особенностями, было невозможным отследить слабые аномалии магнитного поля, вызванные неоднородностью состава почвы. Как показали наши исследования в левобережной части Новосибирской области, где глубина залегания палеозойского основания достигает сотни метров, амплитуда таких аномалий составляет ± 5 нТл (Заплавнова и др., 2018). Таким образом, применение магниторазведки для решения почвенно-генетических и почвенно-агрохимических задач в условиях близкого к поверхности (в пределах первого десятка метров) залегания коренных пород и их неоднородного геологического строения не представляется возможным.

Ключевая площадка EL (элювиальная позиция катены)

На рисунке 2 приведён фрагмент геоэлектрического разреза ключевой площадки EL по результатам 2-D инверсии. Профиль пересекает место раскопа почвенного разреза, фото которого приведено рядом с разрезом УЭС. Гумусово-аккумулятивный слой почвы, визуально выделяемый на фото почвенного разреза (рис. 2, а) до глубины 40 см, отличается повышенными значениями УЭС (60-70 Ом·м). Ниже залегают светло-коричневые породы, обедненные ПОВ, с УЭС 25-30 Ом·м. По гранулометрическому составу (табл. 2), верхняя часть слоя почв до глубины около 50 см сложена тяжёлым суглинком, а подстилающей породой является глина лёгкая. То есть УЭС разреза определяется гранулометрическим / литологическим составом. Гумусово-аккумулятивный

слой почвы выделяется по содержанию общего углерода $C_{\text{общ}}$, которое достигает 5%. В подстилающих материнских породах содержание общего углерода снижается до 0.3-0.5 %. Изменение УЭС разреза с глубиной коррелирует с содержанием общего углерода (рис. 3, в) с коэффициентом корреляции равным 0.97 (табл. 6). Однако эта корреляция является опосредованной через гранулометрический / литологический состав почв.

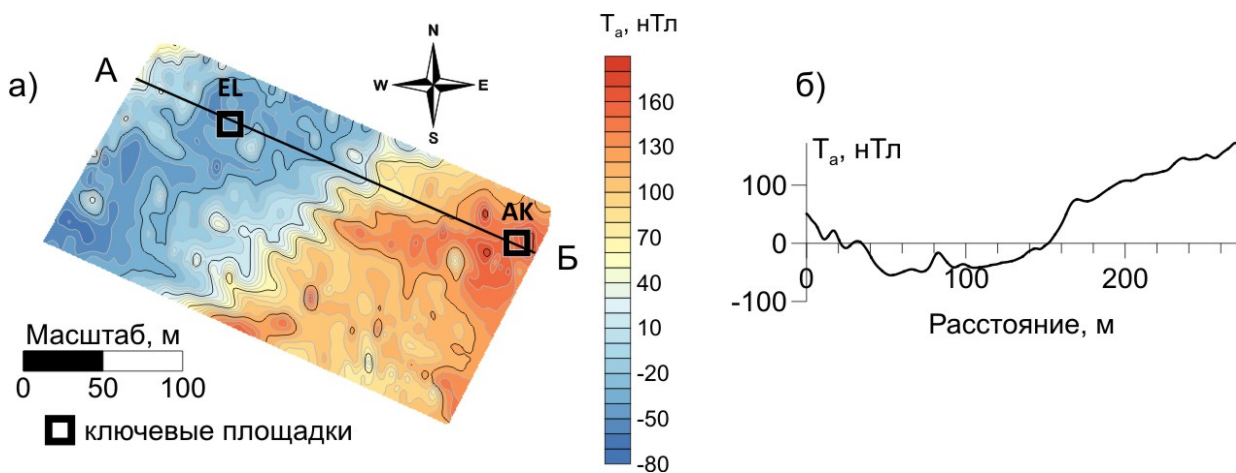


Рисунок 1. План изолиний (а) и график аномального магнитного поля по линии А-Б (б) обследуемого участка с ключевыми площадками EL (элювиальная позиция катены) и АК (аккумулятивная позиция катены).

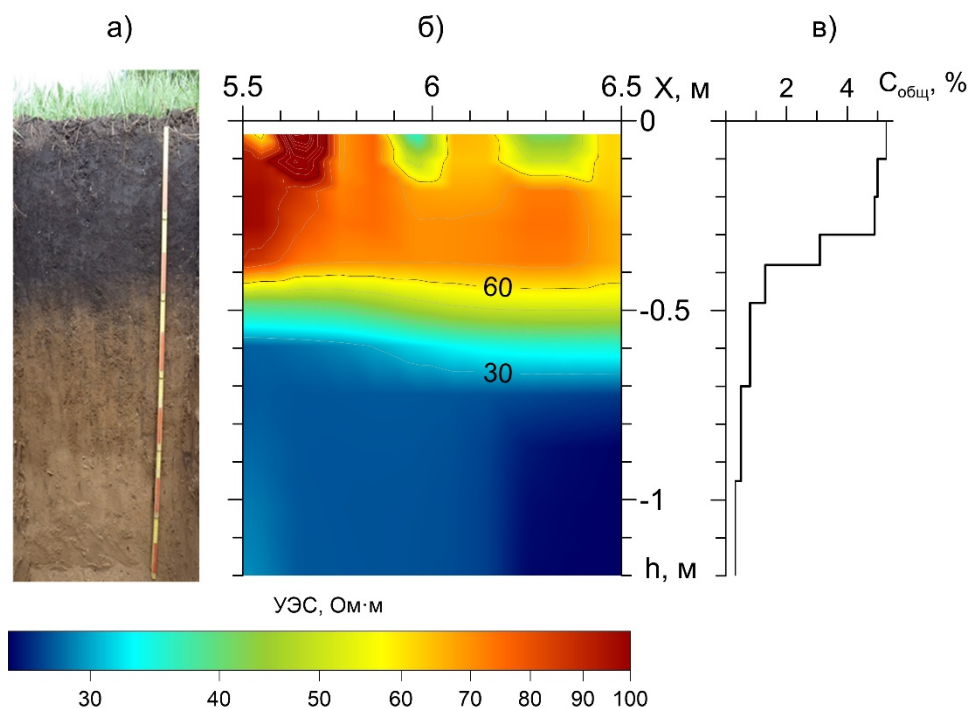


Рисунок 2. Фотография почвенного профиля (а), геоэлектрический разрез (б) и содержание общего углерода в почве (в) на ключевой площадке EL (элювиальная позиция катены).

Корреляция УЭС и общим углеродом почвенного органического вещества и глубиной ($n = 10$)

	Глубина	УЭС
УЭС	-0.90	
$C_{\text{общ}}$	-0.89	0.97

На рисунке 3 приведена радарограмма по профилю, пересекающему место почвенного разреза на ключевой площадке EL. Глубина радарограммы рассчитана для средней диэлектрической проницаемости пород разреза равной 19.3, которая была определена по гиперболе дифракции от локального объекта (Владов, Старовойтов, 2004). Обработка радарограммы включала применение режекторного фильтра для верхней части разреза, который подавил проявление зондирующего импульса. На глубине 10 и 20 см проявлялись отражающие границы в почвенном толще. Эти рефлекторы соответствовали границам горизонтов PU', PU'' и AU. Из характеристики горизонтов (гранулометрический состав (табл. 1 и 2) и объемная массы почвы) следует, что слои PU' и PU'' различаются по плотности сложения, что вероятно является причиной различия в значениях их диэлектрической проницаемости (ϵ).

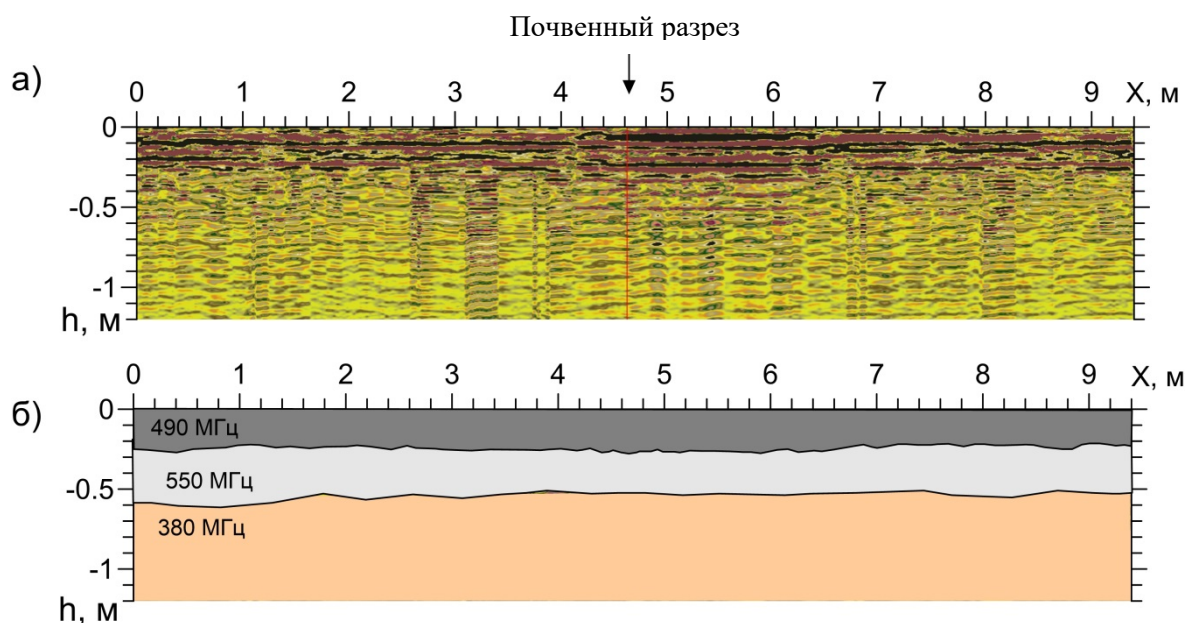


Рисунок 3. Радарограмма (а) через почвенный разрез на ключевой площадке EL (элювиальная позиция катены) и её послойная интерпретация (б).

Верхняя часть радарограммы до глубины 20-25 см имеет высокоамплитудные отражения, характеризующие гумусово-аккумулятивный пахотный слой. Максимум спектра частот в этом слое приходится на 490 МГц. В интервале глубин 20-60 см выделяется слой, отличающийся по амплитудо-частотным характеристикам. Спектр частот отражённого сигнала в этом слое смещается к частоте 550 МГц. В основании разреза центральная частота отражённого георадарного сигнала смещается в область низких частот до 380 МГц.

Сопоставление георадиолокационного и почвенного разрезов представлено на рисунке 4. Хорошо заметно, что гумусово-аккумулятивный горизонт, прослеживаемый до глубины 35-40 см, отчётливо выделяется на радарограмме.

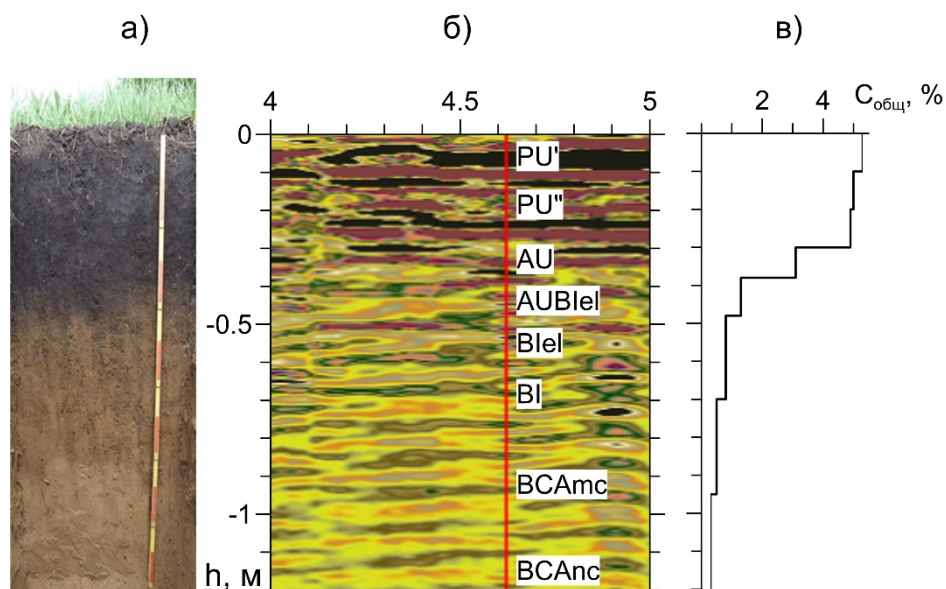


Рисунок 4. Сопоставление строения почвенного профиля (а), георадиолокационного разреза (б) и распределения общего углерода по глубине (в) на ключевой площадке EL (элювиальная позиция катены).

Трёхмерная визуализация данных георадиолокации представлена на рисунке 5. Темногумусовые горизонты PU' и PU'' выделяются максимальной амплитудой отраженного сигнала. Таким образом, метод георадиолокации позволяет решать задачу определения мощности плодородного (гумусово-аккумулятивного) слоя в пахотных агроэкосистемах.

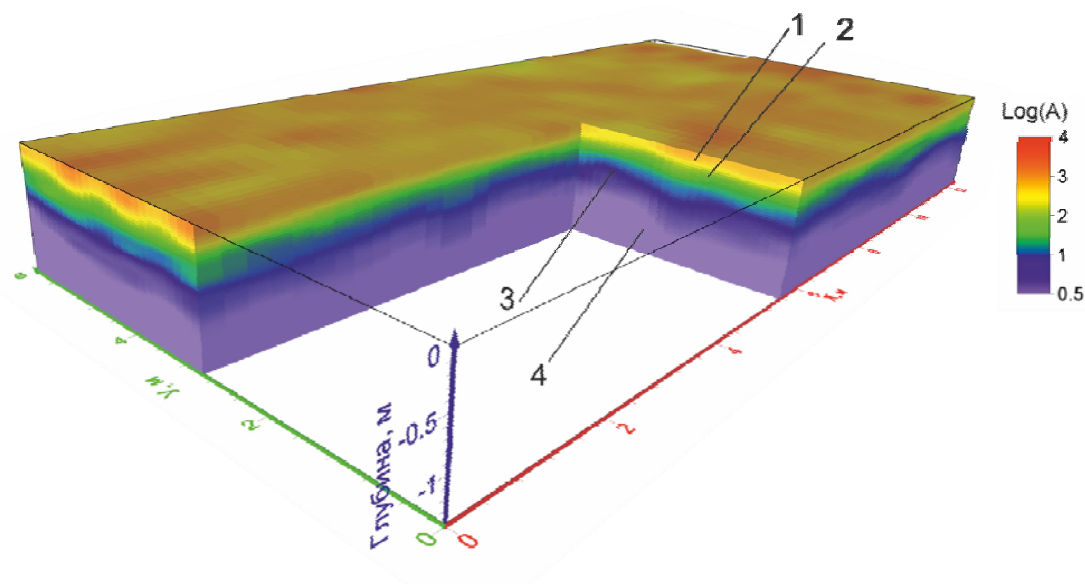


Рисунок 5. Трёхмерная визуализация данных георадиолокации на ключевой площадке EL (элювиальная позиция катены): 1 – горизонт PU', 2 – горизонт PU'', 3 – горизонты AU+AUBlel+Bl, 4 - горизонт BCAmc.

Результаты площадных исследований методом электротомографии приведены в виде трёхмерной геоэлектрической модели обследованного участка (рис. 6). Гумусово-аккумулятивный слой выделяется повышенным УЭС на фоне иллювиального и переходного к материнской породе горизонтов.

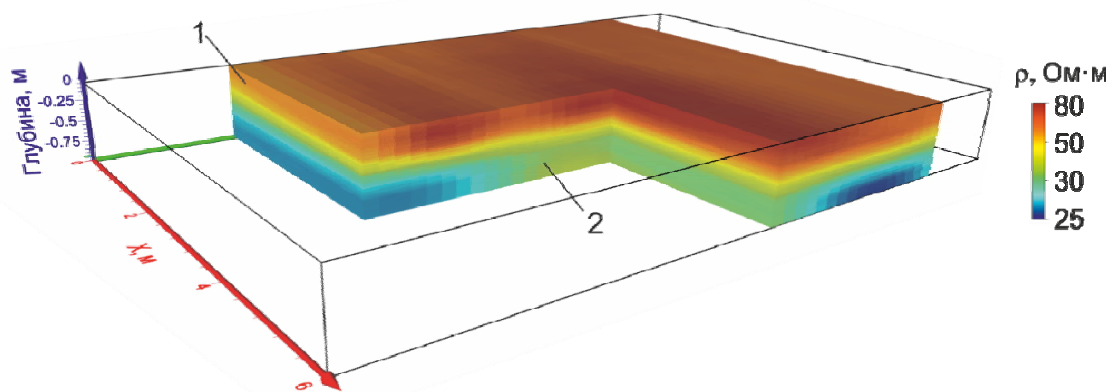


Рисунок 6. Объёмная геоэлектрическая модель ключевой площадки EL (элювиальная позиция катены) по данным электротомографии: 1 - гумусово-аккумулятивный слой; 2 – иллювиальные и переходные к почвообразующим горизонты с низким содержанием ПОВ.

Таким образом, основными закономерностями проявления строения и состава почвенного профиля в геофизических полях на ключевой площадке EL являются повышенные значения УЭС (60-70 Ом·м) в гумусово-аккумулятивном слое по отношению к подстилающим породам, высокая амплитуда георадарного сигнала и наличие отражающих границ георадарного сигнала на границах горизонтов PU', PU'' и AU. Повышенное УЭС гумусово-аккумулятивный слоя связано с его суглинистым литологическим составом. Залегающая ниже легкая глина имеет более низкие значения УЭС по сравнению с гумусово-аккумулятивным слоем УЭС.

Ключевая площадка АК (аккумулятивная позиция катены)

Почвенный разрез ключевой площадки АК отличается мощным (до 90 см) гумусово-аккумулятивным слоем (состоящим из нескольких темногоумусовых горизонтов) и наличием погребенной почвы на глубине 70 см. На рисунке 7 представлены фрагмент геоэлектрического разреза по данным электротомографии (б) и распределение содержания общего углерода (в) в почве ключевой площадки АК. На разрезе УЭС до глубины 40 см контрастно выделяется слой пониженного (30-50 Ом·м) электросопротивления. Возможно, пониженное УЭС почвы до глубины 40 см связано с её высокой влажностью. Ниже по профилю до глубины 1.0-1.2 м слой почвы имеют относительно высокое УЭС, равное 60-70 Ом·м. Порядок значений УЭС погребённого темногоумусового горизонта такой же, как и в гумусово-аккумулятивном слое почвы на ключевой площадке EL. Хорошо заметно соответствие области повышенных значений УЭС глубине залегания погребенного темногоумусового горизонта [AU], который характеризуется высоким содержанием общего углерода (рис. 7 б, в). С глубины 0.9-1.2 м УЭС понижается до 50 Ом·м, что связано с тяжелосуглинистым составом горизонта VI. С этой же глубины отмечается и значительное снижение $C_{общ}$ (рис. 7 в).

На рисунке 8 показан геоэлектрический разрез ключевой площадке АК через место раскопа почвенного разреза, которое выделяется аномалией пониженного УЭС в приповерхностной части разреза в интервале профиля 4.6-4.5 м. Хорошо заметно существенное различие значений УЭС (ρ) пахотных и целинных почв. В области пашни ρ изменяется в пределах 40-70 Ом·м, на целине – в диапазоне 100-200 Ом·м. Целинные почвы, хотя и содержат больше ПОВ, но гранулометрический состав их темногоумусового горизонта в значительной мере облегчен по сравнению с рядом расположенной пахотной почвой и отличается повышенным в 2 раза содержанием фракции мелкого песка, повышенной долей крупной пыли и пониженным в 2 раза содержанием илистой фракции (Смоленцева и др., 2018).

Дополнительными факторами, вызывающим такое значительное отличие электрофизических свойств целинного участка и пашни, хорошо заметное на объемной геоэлектрической модели ключевой площадке АК (рис. 9), могут быть изменение литологического состава почвы (что естественно предположить, учитывая изменение гранулометрического состава), а также структуры и микроагрегатного состава почвы, плотность сложения, возможно качества ПОВ.

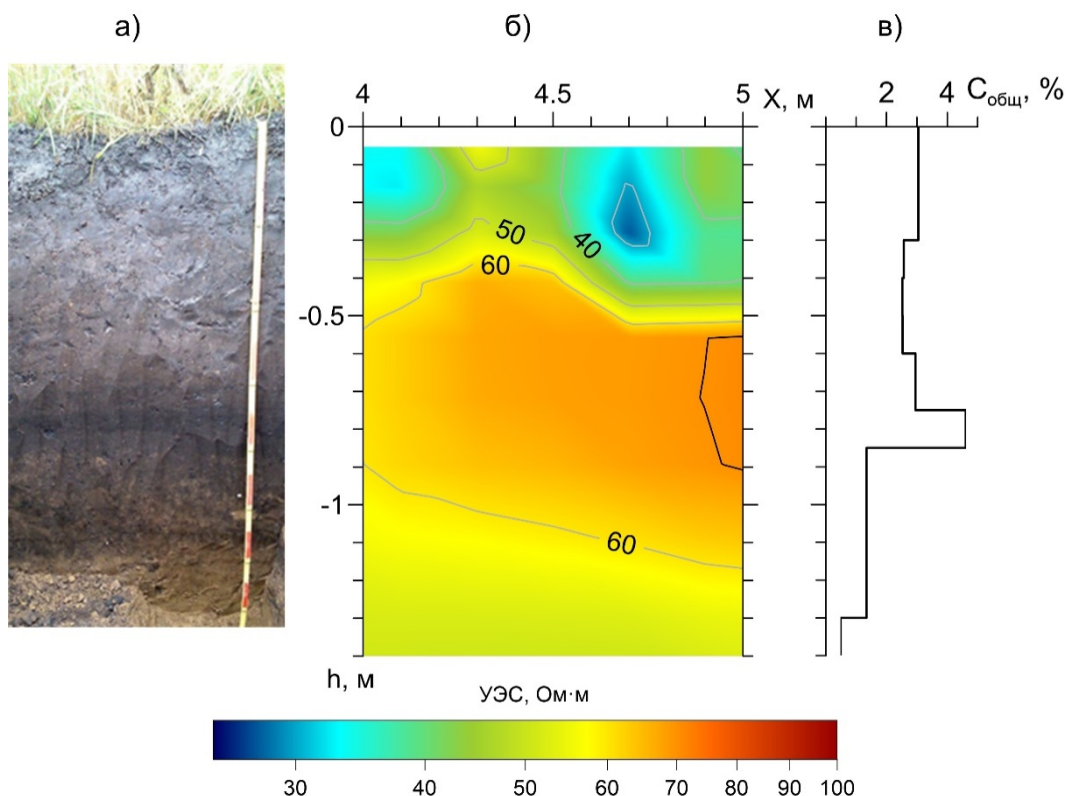


Рисунок 7. Фотография почвенного профиля (а), геоэлектрический разрез (б) и содержание органического углерода по глубине (в) на ключевой площадке АК (аккумулятивная позиция катены).

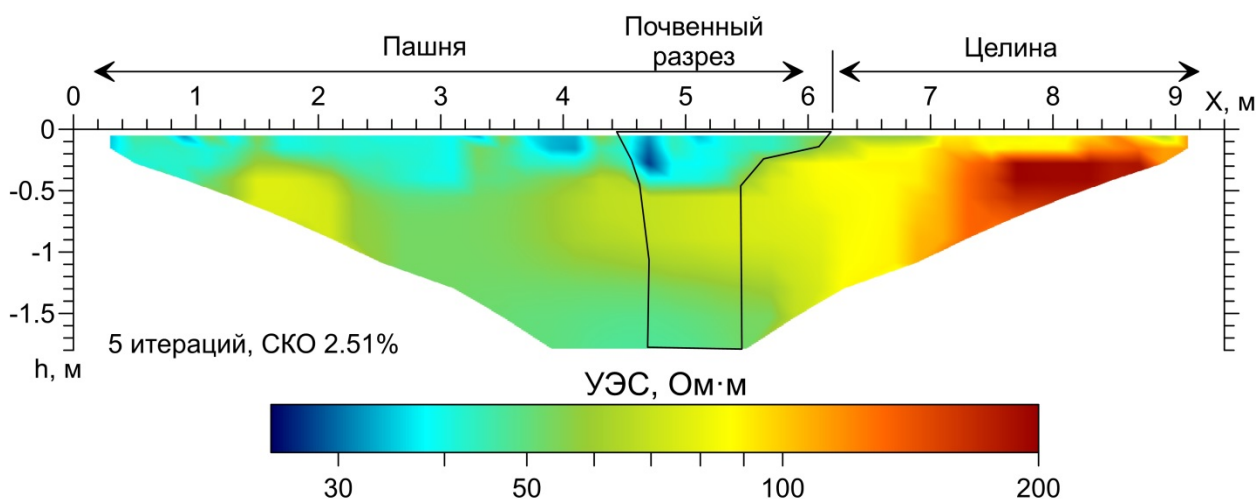


Рисунок 8. Геоэлектрический разрез на ключевой площадке АК (аккумулятивная позиция катены) по данным электротомографии.

В свою очередь, на пашне верхняя часть почвенной толщи до глубины 30 см имеет более низкие значения УЭС – около 30 Ом·м, что наиболее вероятно обусловлено большей влажностью этого слоя, а нижняя часть темногумусового горизонта выделяется слегка повышенным электросопротивлением – 50-70 Ом·м.

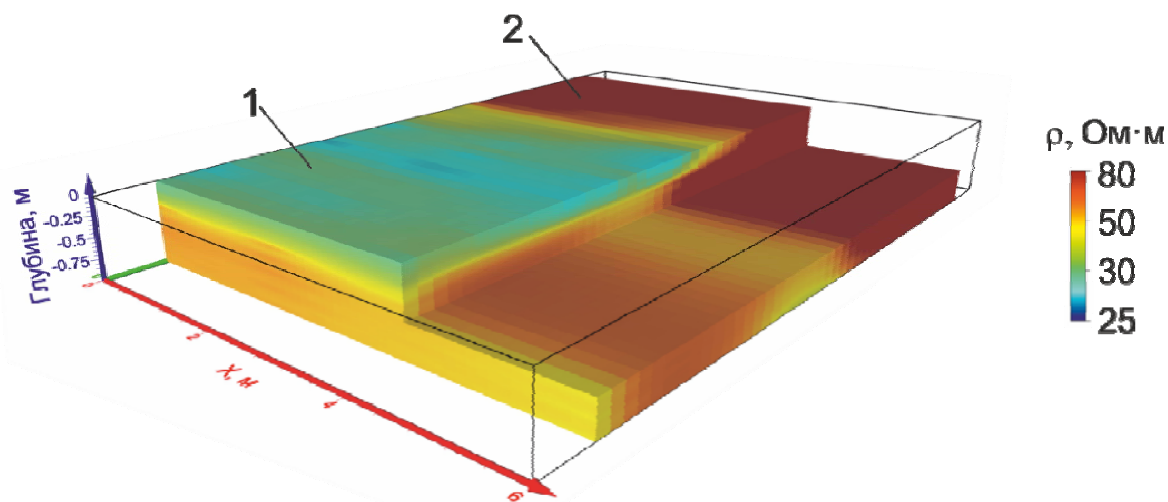


Рисунок 9. Объёмная геоэлектрическая модель ключевой площадки АК (аккумулятивная позиция катены) по данным электротомографии: 1 - пашня; 2 – целинный участок.

По данным георадиолокации на ключевой площадке АК (рис. 10) отчетливо выделяется темногумусовый горизонт PU+RU (рис. 10, {1}), а также фрагментарная граница погребенного агротемногумусового горизонта [AU] (рис. 9, {2}). Место раскопа почвенного разреза также отмечается высокоамплитудной аномалией отраженного сигнала в верхней части разреза.

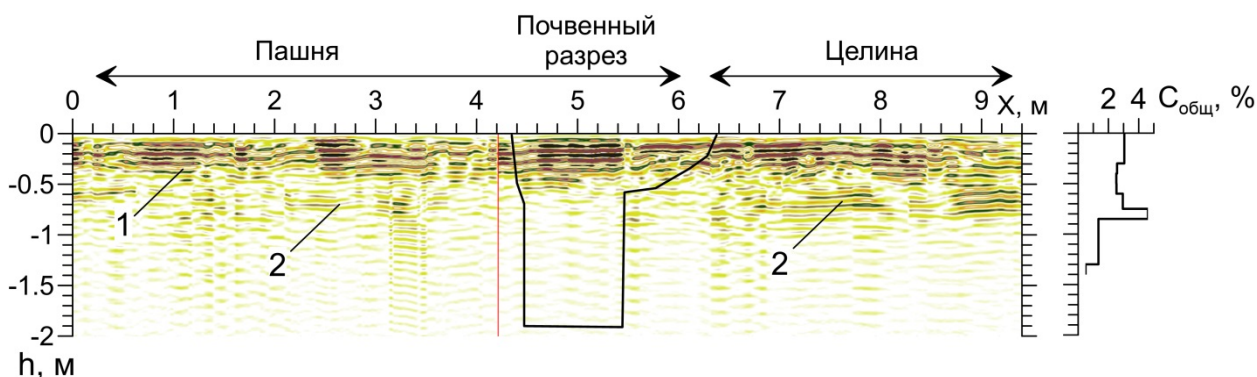


Рисунок 10. Георадиолокационный разрез ключевой площадки АК (аккумулятивная позиция катены): {1} – темногумусовые горизонты PU+RU; {2} – отражающая граница от погребенного темногумусового горизонта [AU].

На рисунке 11 показана визуализация данных георадиолокации ключевой площадки АК. В объемной модели высокоамплитудным сигналом в части разреза, расположенного на пашне, выделяется агротемногумусовый PU и темногумусовый стратифицированный RU горизонты, которые переходят в темногумусовый горизонт AU на целинном участке. Различие в составе целинных и пахотных почв не выражается в амплитудных характеристиках георадарного сигнала. Однако, можно отметить заметное снижение мощности гумусово-аккумулятивного слоя на целинном участке. На глубине 1-2 м в глинисто-иллювиальном горизонте амплитуда георадарного сигнала сильно затухает.

Таким образом, в результате геофизических исследований на ключевой площадке АК (аккумулятивная позиция катены) установлено следующее. По данным электротомографии почвы пашни отличаются пониженным УЭС от целинных почв. Наиболее вероятно это объясняется различиями в гранулометрическом составе почв. Уровень УЭС пахотных почв составляет 60-70 Ом·м, но в агротемногумусовом горизонте (до глубины 30 см) понижается до 30 Ом·м. На георадарных данных хорошо прослеживаются границы темногумусового горизонта, глинисто-иллювиального горизонта и переходного горизонта между ними, а также погребенного

темногумусового горизонта. Этот метод не позволяет выявить существенные различия в содержании гумуса в агротемногумусовом горизонте и погребенном горизонте пахотной почвы и темногумусовом горизонте целины. Однако метод георадиолокации дает возможность установить различия в мощности гумусово-аккумулятивного слоя.

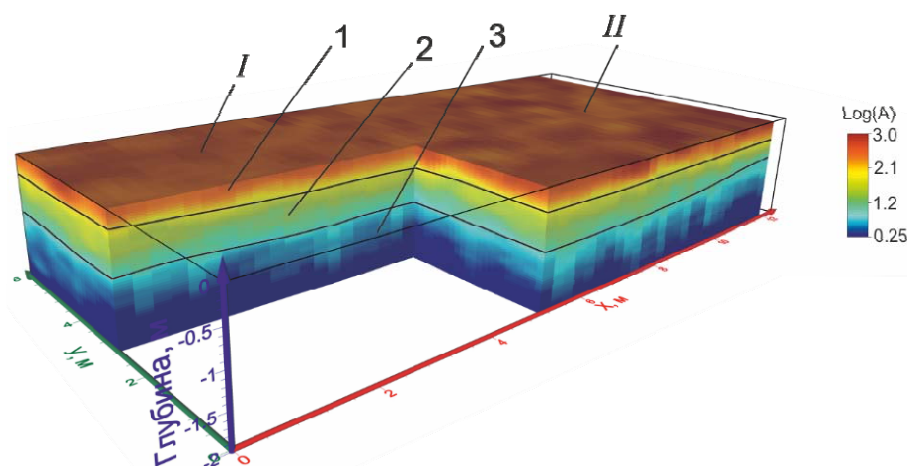


Рисунок 11. Трёхмерная визуализация данных георадиолокации на ключевой площадке АК (аккумулятивная позиция катены): I – пашня; II – целина; {1} – агротемногумусовый горизонт PU; {2} – темногумусовый стратифицированный горизонт RU; {3} – погребенные темногумусовый и глинисто-иллювиальный горизонты [AU] + [AUBI], переходящие ниже в почвообразующую породу.

ОБСУЖДЕНИЕ

Корреляционно-регрессионный анализ свойств почв

Корреляционный анализ свойств изученных почв показал, что многие из них тесно связаны между собой (табл. 7). Это касается ряда предсказуемых положительных или отрицательных корреляционных связей и между различными фракциями элементарных почвенных частиц, между свойствами, характеризующими ПОВ, между легкоподвижной и подвижной формами фосфора и другими. Отметим, что при расчете корреляций из массива данных исключены свойства почв, полученные простым пересчетом из других показателей: «гумус» vs $C_{общ}$; общее содержание растворимых солей vs электропроводность; обменные катионы, выраженные в мг/кг vs обменных катионов, выраженных в мг-экв/100 г, калий обменных катионов vs обменный калий по методу Масловой.

Однако ряд установленных взаимосвязей или же их отсутствие между свойствами почв является труднообъяснимыми. В качестве таких зависимостей необходимо отметить отрицательную корреляционную связь между количеством наиболее тонкодисперсных частиц <0.001 мм и <0.002 мм, с одной стороны, и содержанием общего углерода и фракцией ППП {T130-550°C}, с другой стороны. Представляются труднообъяснимыми положительные связи между общим углеродом и обменным магнием, между подвижными пулами азота, фосфора и калия с мелким песком и, напротив, отрицательные связи с илистой фракцией. Видимо здесь ведущими выступают иные факторы, оставшиеся за рамками проведенного исследования.

Электропроводность почвенной суспензии отрицательно коррелировала с мелким песком и крупной пылью, и положительно – с глиной, реакцией среды, содержанием карбонатов и обменного кальция. Множественный линейный регрессионный анализ с пошаговым включением значимых и исключением незначимых переменных (вышеперечисленных свойств почвы) позволил свести зависимость электропроводности только к двум свойствам почвы: водный pH и обменный кальций. Было получено уравнение линейной регрессии:

$$\{\text{Электропроводность}\} = a + b * \{\text{pH}_{\text{водный}}\} + c * \{\text{Ca}_{\text{обменный}}\}$$

Коэффициенты множественной корреляции и детерминации этой зависимости составили 0.91 и 0.83, соответственно. Все три коэффициента уравнения регрессии были достоверны и равны следующим величинам: $a = -245.37$, $b = 35.25$ и $c = 7.28$.

Таблица 7

Матрица парных корреляций свойств почв по Пирсону ($n = 20$)

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	0.60													
4	....	....										
5	....	0.49	....										
6	-0.67	-0.92	....	-0.73										
7	0.81	0.96	....	....	-0.92									
8	-0.81	-0.96	....	....	0.92	-1								
9	1	0.61	....	....	-0.68	0.81	-0.81							
10	0.46	0.93	....	0.74	-0.96	0.85	-0.85	0.47						
11	-0.71	-0.94	....	-0.66	0.99	-0.95	0.95	-0.72	-0.95					
12	....	....	....	0.45	-0.5	....	....	....	0.48	-0.48				
13	....	....	....	0.64	....	....	....	....	....	....	0.75			
14	....	0.58	....	0.87	-0.78	0.56	-0.56	....	0.77	-0.73	0.69	0.78		
15	-0.69	-0.62	....	....	0.63	-0.71	0.71	-0.69	-0.53	0.66	-0.56	....	....
16	....	....	0.47	0.77	....	....	....	....	0.49	....	....	0.70	0.82	....
17	....	....	....	0.78	-0.48	....	....	....	0.53	....	0.55	0.77	0.87	....
18	0.47	0.70	....	0.84	-0.86	0.69	-0.69	0.48	0.84	-0.83	0.71	0.71	0.98	-0.53
19	0.55	0.77	....	0.82	-0.91	0.76	-0.76	0.55	0.88	-0.88	0.66	0.62	0.95	-0.58
20	....	0.48	....	0.65	-0.63	0.48	-0.48	....	0.61	-0.6	0.72	0.75	0.84	-0.47
21	-0.73	-0.62	....	....	0.63	-0.73	0.73	-0.73	-0.52	0.66	-0.59	....	....	0.98
22	-0.77	-0.61	....	....	0.62	-0.73	0.73	-0.76	-0.5	0.66	-0.60	....	....	0.93
23	-0.66	-0.52	....	....	0.47	-0.62	0.62	-0.64	....	0.51	....	....	....	0.79
24	0.58	....	....	0.49	-0.6	0.54	-0.54	0.58	0.50	-0.59	0.74	0.53	0.73	-0.70
25	-0.76	-0.51	0.46	....	....	-0.65	0.65	-0.75	....	0.49	....	....	....	0.76
26	-0.67	-0.46	0.47	....	....	-0.58	0.58	-0.66	....	....	....	0.48	....	0.67
27	0.53	....	....	....	-0.53	0.5	-0.5	0.54	....	-0.53	....	....	0.62	....
28	0.61	0.54	....	....	-0.52	0.63	-0.63	0.61	....	-0.55	....	....	....	....
29	0.73	0.60	....	....	-0.56	0.71	-0.71	0.73	0.45	-0.61	....	....	....	-0.48
30	0.52	....	-0.49	....	....	....	....	0.52	....	....	....	....	....	....

Парная зависимость между электропроводностью и обменным кальцием хорошо описывается уравнением с коэффициентом детерминации 0.92:

$$\{\text{Электропроводность}\} = a / (b + \{\text{Ca}_{\text{обменный}}\}),$$

где $a = -1368.8$, $b = 31.4$.

Для парной зависимости между электропроводностью и водным рН можно использовать такую же форму регрессионного уравнения:

$$\{\text{Электропроводность}\} = a / (b + \{\text{pH}_{\text{водный}}\}),$$

где $a = -379.8$, $b = -10.0$. Для этого уравнения также получен высокий коэффициент детерминации, равный 0.79.

Нелинейный регрессионный анализ данных содержания карбонатов и фракции потерь при прокаливании от 550°C до 900°C позволил установить высокую достоверную зависимость этих

показателей, что полностью совпадает с выводом, полученным при анализе этой зависимости для широкого ряда почв (Siewert, 2004; Siewert et al., 2012; Kucerik et al., 2016). В нашем случае следующее уравнение регрессии хорошо описывает эту зависимость с коэффициентом детерминации, близком к идеальному (0.96):

$$\{CaCO_3\} = a + b * Ln(\{T550-900^\circ C\}),$$

где a = 2.91, b = 4.92.

Продолжение таблицы 7

	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
17	0.99													
18	0.72	0.79												
19	0.66	0.72	0.99											
20	0.62	0.69	0.84	0.78										
21	....	....	-0.54	-0.58	-0.48									
22	....	....	-0.56	-0.59	-0.52	0.95								
23	....	....	....	....	....	0.80	0.87							
24	....	0.45	0.76	0.73	0.68	-0.73	-0.77	-0.48						
25	0.55	0.48	....	....	....	0.78	0.81	0.87	....				
26	0.66	0.60	....	....	....	0.68	0.69	0.83	....	0.98				
27	....	....	0.64	0.64	0.57	....	....	....	0.64	....	....	
28	....	....	....	0.45	....	....	....	....	....	....	....	0.83		
29	....	....	....	....	....	-0.50	-0.50	....	....	-0.65	-0.59	0.71	0.91	
30	....	....	....	....	....	....	....	....	....	-0.49	....	0.62	0.64	0.68

Примечание.

Пороги достоверности коэффициентов корреляции при уровне значимости 0.05 и 0.01 равны: 0.444 и 0.561, соответственно. В таблице указаны только достоверные (p < 0.05) коэффициенты корреляции. Между свойством {1} и всеми другими свойствами почв достоверных коэффициентов корреляции не получено. Обозначение свойств почв, перечисленных в таблице:

	Гранулометрический состав, % фракций с размерами частиц, мм:	Потери при прокаливании (%) при температуре:		21	Карбонаты, CaCO ₃ , %	
		12	до 105°C	22		pH водный
1	1-0.25 мм	13	105-130°C	23	Электропроводность, μS/cm	
2	0.25-0.05 мм	14	130-550°C	Обменные катионы (мг-экв/100 г):		
3	0.05-0.01 мм	15	550-900°C	24	Mg ²⁺	
4	0.01-0.005 мм	16	105-900°C	25	Ca ²⁺	
5	0.005-0.001 мм	17	до 900°C	26	сумма	
6	<0.001 мм	Элементный состав:		Подвижные (доступные растениям) элементы минерального питания:		
7	>0.01 мм – физ. песок			27	Нитраты, мг N/kg	
8	<0.01 мм – физ. глина			18	C _{общ.} , %	
9	>0.05 мм	19	N _{общ.} , %		28	P легкоподвижный, мг P ₂ O ₅ /кг
10	0.002-0.05 мм	20	C / N		29	P подвижный, мг P ₂ O ₅ /кг
11	<0.002 мм			30	K обменный, мг K ₂ O/kg	

Содержание общего углерода, которое включает преимущественно органический углерод (особенно в гумусово-аккумулятивных горизонтах), и в значительно меньшей степени углерод карбонатов, коррелировало отрицательно или положительно с большим рядом почвенных характеристик (табл. б). К ним относятся три наиболее тонкодисперсные фракции элементарных

почвенных частиц, потери при прокаливании при всех диапазонах температур, карбонаты, водный рН, обменный магний и нитраты. При выполнении множественного линейного регрессионного анализа (с различными алгоритмами расчета) были получены достоверные коэффициенты уравнения регрессии только для шести показателей свойств почв. Последующий множественный линейный регрессионный анализ с пошаговым включением значимых и исключением незначимых переменных для массива данных этих шести показателей позволил получить следующее уравнение регрессии с достоверными коэффициентами регрессии только для четырех почвенных характеристик:

$$\{C_{\text{общ}}\} = a + b * \{F<0.001\text{мм}\} + c * \{T130-550^{\circ}\text{C}\} + d * \{\text{CaCO}_3\} + e * \{T105-900^{\circ}\text{C}\}$$

Коэффициент детерминации этого уравнения равен 0.997. Поскольку фракция $\{T105-900^{\circ}\text{C}\}$ тесно связана с $\{T130-550^{\circ}\text{C}\}$ и $\{\text{CaCO}_3\}$, то мы исключили $\{T105-900^{\circ}\text{C}\}$ из массива данных и получили более простое уравнение регрессии практически без снижения величины коэффициента детерминации ($R^2 = 0.996$):

$$\{C_{\text{общ}}\} = a + b * \{T130-550^{\circ}\text{C}\} + c * \{F<0.001\text{мм}\} + d * \{\text{CaCO}_3\},$$

где $a = -0.073$, $b = 0.528$, $c = -0.38$ и $d = -0.040$.

Что касается свойств почвы, оказывающих прямое действие на рост и развитие растений, а также ряд сопряженных с ними показателей (гранулометрический состав и ПОВ), то проведенный корреляционный анализ позволил установить следующие зависимости:

для нитратного азота положительные связи – с $\{F0.25-0.05\text{мм}\}$, $\{T130-550^{\circ}\text{C}\}$, $\{C_{\text{общ}}\}$, $\{N_{\text{общ}}\}$, $\{C/N\}$, $\{Mg_{\text{обменный}}\}$, $\{P_{\text{легкоподвижный}}\}$, $\{P_{\text{подвижный}}\}$ и $\{K_{\text{обменный}}\}$, и отрицательные – с $\{F<0.001\text{мм}\}$;

для легкоподвижного фосфора положительные связи – с $\{F0.25-0.05\text{мм}\}$, $\{F0.05-0.01\text{мм}\}$, $\{N_{\text{общ}}\}$, $\{N-NO_3\}$, $\{P_{\text{подвижный}}\}$ и $\{K_{\text{обменный}}\}$, и отрицательные – с $\{F<0.001\text{мм}\}$;

для подвижного фосфора положительные связи – с $\{F0.25-0.05\text{мм}\}$, $\{F0.05-0.01\text{мм}\}$, $\{N-NO_3\}$, $\{P_{\text{легкоподвижный}}\}$ и $\{K_{\text{обменный}}\}$, и отрицательные – с $\{F<0.001\text{мм}\}$; $\{\text{CaCO}_3\}$, $\{pH\}$ и $\{Ca_{\text{обменный}}\}$;

для обменного калия положительные связи – с $\{F0.25-0.05\text{мм}\}$, $\{N-NO_3\}$, $\{P_{\text{легкоподвижный}}\}$, $\{P_{\text{подвижный}}\}$ и $\{K_{\text{обменный}}\}$, и отрицательные – с $\{F0.01-0.005\text{мм}\}$ и $\{Ca_{\text{обменный}}\}$.

Зависимость содержания легкоподвижного фосфора от подвижного хорошо описывается уравнением квадратичной параболы с коэффициентом детерминации 0.87:

$$\{P_{\text{легкоподвижный}}\} = a + b * \{P_{\text{подвижный}}\}^2,$$

где $a = 0.137$, $b = 0.000117$.

Таким образом, сравнительно небольшой массив данных позволил выявить положительные или отрицательные корреляционные связи между почвенными характеристиками, а для ряда свойств почв – установить форму этих зависимостей с помощью регрессионного анализа.

Сравнение результатов изучения строения и свойств почв геофизическими и традиционными методами

Ключевые площадки ЕЛ и АК отличаются по урожайности. На площадке ЕЛ урожайность зерна составила 24.2 ц/га, а на площадке АК была значительно выше – 37.0 ц/га. Урожайность, особенно при отсутствии применения средних и высоких доз удобрений, зависит от естественного плодородия почв. Одним из его показателей, хотя и действующих опосредованно на продуктивность растений, является мощность гумусово-аккумулятивного (наиболее плодородного) слоя почвы и содержание в нем ПОВ. Этот слой существенно отличался в двух изученных почвах: гумусово-аккумулятивный слой агростратозема (площадка АК) был в 2 раза больше, чем в агрочерноземе (площадка ЕЛ). Это различие хорошо фиксируется также и на разрезах электротомографии. Горизонты аккумуляции ПОВ, в целом отличались повышенными значениями УЭС по отношению к расположенным ниже иллювиальным и переходным к материнской породе горизонтам. Однако на площадке АК в приповерхностной части разреза агростратозема выделяется слой пониженного до 30 Ом·м электросопротивления в верхнем слое почвы 0-30 см. Природа пониженного УЭС этого слоя, вероятно, связана с особенностями его формирования. Он состоит из материала, привнесенного с поверхностных слоев почв,

расположенных выше по склону. В процессе переноса твердого стока вниз по склону, различные фракции почвенных частиц очевидно седиментируются дифференцированно по разным позициям катены. Вследствие этого, гранулометрический состав агростратозема, расположенного в аккумулятивной позиции, отличается от такового поверхностных слоев агрогумусового горизонта агрочернозема. Наиболее заметные отличия проявляются в пониженном содержании мелкой пыли и повышенном – илистых частиц в агростратоземе (табл. 1). Причем доля ила (самой тонкодисперсной фракции) возрастает с глубиной в этой почве до погребенного темногумусового горизонта [AU]. Интересно отметить, что в пахотном горизонте PU (0-22 см) агростратозема отмечается аномально высокое содержание подвижного фосфора и обменного калия (рис. 12 и табл. 4). Наиболее вероятно это связано с отличающимся минералогическим составом этих почв, обогащенных фосфором и калием, на что косвенно указывает повышенное содержание илистой фракции в гумусово-аккумулятивном слое этой почвы.

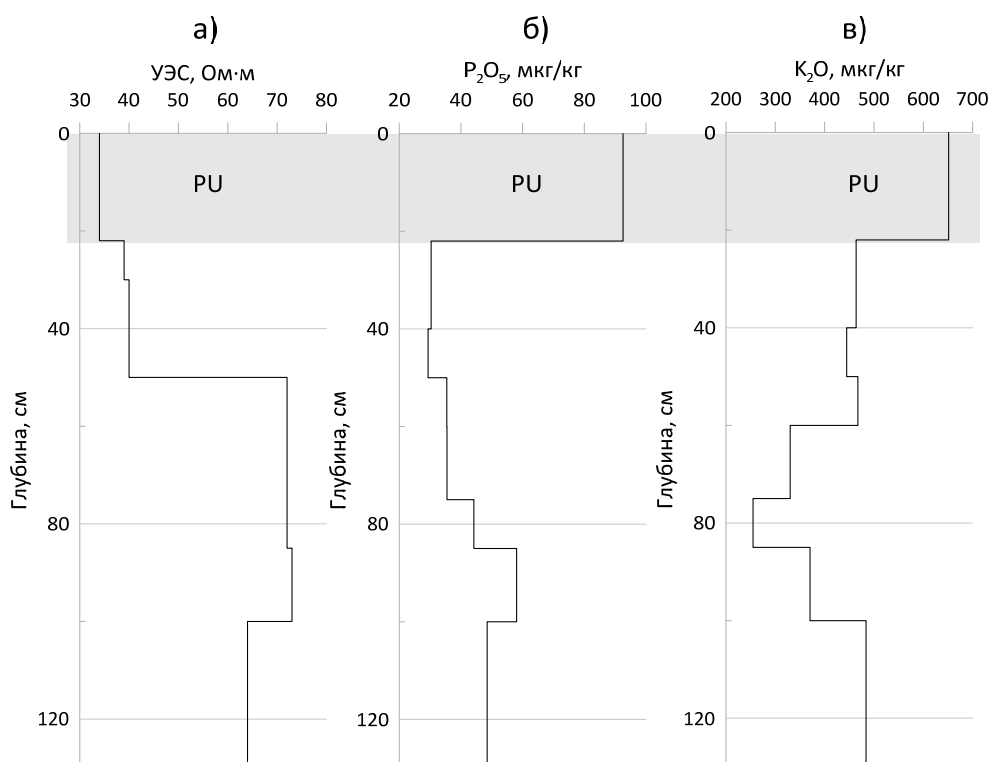


Рисунок 12. Распределение УЭС по данным электротомографии (а), содержание пула подвижного фосфора (б) содержание пула обменного калия (в) в агростратоземе на ключевой площадке АК (аккумулятивная позиция катены).

Таким образом, высокая урожайность яровой пшеницы, произрастающей на агростратоземе (в отличие от агрочернозема) может быть, в частности, объяснена увеличенным содержанием подвижного фосфора и обменного калия в горизонте PU, который характеризуется пониженным до 34 Ом·м электросопротивлением. Дополнительным фактором, повышающим урожайность культур, может быть более высокая влагообеспеченность почвы, находящейся в аккумулятивной позиции катены, особенно в весенний и раннелетний период в результате перераспределения по склону влаги после снеготаяния.

Сравнение гумусово-аккумулятивных горизонтов изученных почв по содержанию общего углерода показало, что в почве аккумулятивной позиции (потенциально более плодородной) этот показатель несколько ниже (2.5-3.0%), чем в почве элювиальной позиции (3.1-5.3%). Отсутствие достоверной корреляции $S_{\text{общ}}$ с урожайностью не является неожиданным, поскольку эти два показателя находятся не в прямой, а косвенной зависимости. Урожайность в значительно большей степени зависит от содержания влаги и доступных растениям форм элементов минерального питания.

Мы ожидали, что разное содержание общего углерода на ключевых площадках будет влиять и на УЭС почв, поскольку ранее установлена зависимость снижения УЭС при повышении содержания ПОВ (Коснырева, 2007; Handbook ..., 2008). Однако в ряде более поздних работ

(Поздняков А.И., Елисеев П., 2012; Поздняков и др., 2015) было показано, что зависимость УЭС от содержания общего углерода носит экспоненциальный характер, и наибольшее изменение ρ происходит в диапазоне от 0 до 2 % общего углерода, а при более высоких величинах $C_{\text{общ}}$ общего углерода УЭС изменяется. В верхних горизонтах наших почв электросопротивление меняется слабо. Вероятно, поэтому варьирование содержания углерода на площадках EL и АК не влияет на их УЭС и изменение его величины зависит от других факторов.

На площадке EL УЭС гумусово-аккумулятивного слоя (ниже 10 см) агрочернозема составил около 70 Ом·м, но в приповерхностной части почвенного профиля до глубины 10 см фрагментарно выделяется тонкий слой пониженного до 40-45 Ом·м электросопротивления (рис. 13). Этот слой представляет собой агротемногумусовый горизонт PU', который был подвергнут плоскорезной обработке как раз на глубину 10 см (см. выше «Морфологическое описание почвы ключевой площадки EL»).

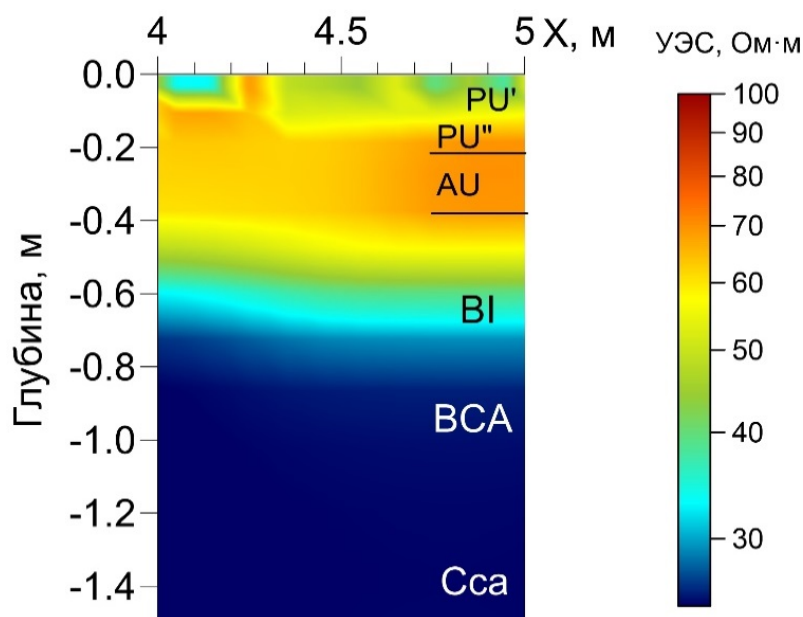


Рисунок 13. Фрагмент геоэлектрического разреза ключевой площадки EL (элювиальная позиция катены).

В этом же горизонте PU' отмечается максимальное содержание обменного калия до 490 мкг/кг, сопоставимое с содержанием этого пула в горизонтах PU и RU агрочернозема (330-650 мкг/кг). То есть высокое содержание подвижного фосфора и обменного калия в пахотном слое сопровождается пониженными значениями УЭС.

Корреляционный анализ связей УЭС гумусово-аккумулятивных горизонтов (PU, RU, AU) и некоторых показателей физических и химических характеристик почв показал отсутствие достоверной связи между УЭС и гранулометрическим составом почв, а также содержанием общего углерода, обменных кальция и магния (рис. 14). Слабая обратная связь установлена между УЭС и содержанием подвижного фосфора и обменного калия. Известно (Поздняков, Елисеев, 2012; Поздняков и др., 2015), что УЭС почв связано экспоненциальной зависимостью с емкостью катионного обмена (ЕКО), которая в свою очередь тесно связана с содержанием обменных катионов (прежде всего с Ca и Mg). Обе изученные почвы характеризуются высоким содержанием суммы катионов (Ca, Mg, K) по всем горизонтам и соответственно следует ожидать высокое значение ЕКО в этих почвах. В соответствии с экспоненциальным законом, УЭС слабо меняется при высоких значениях ЕКО. Вероятно, этим и объясняется отсутствие связи УЭС и содержания обменных Ca и Mg при высоких концентрациях последних в изученных почвах (рис. 14).

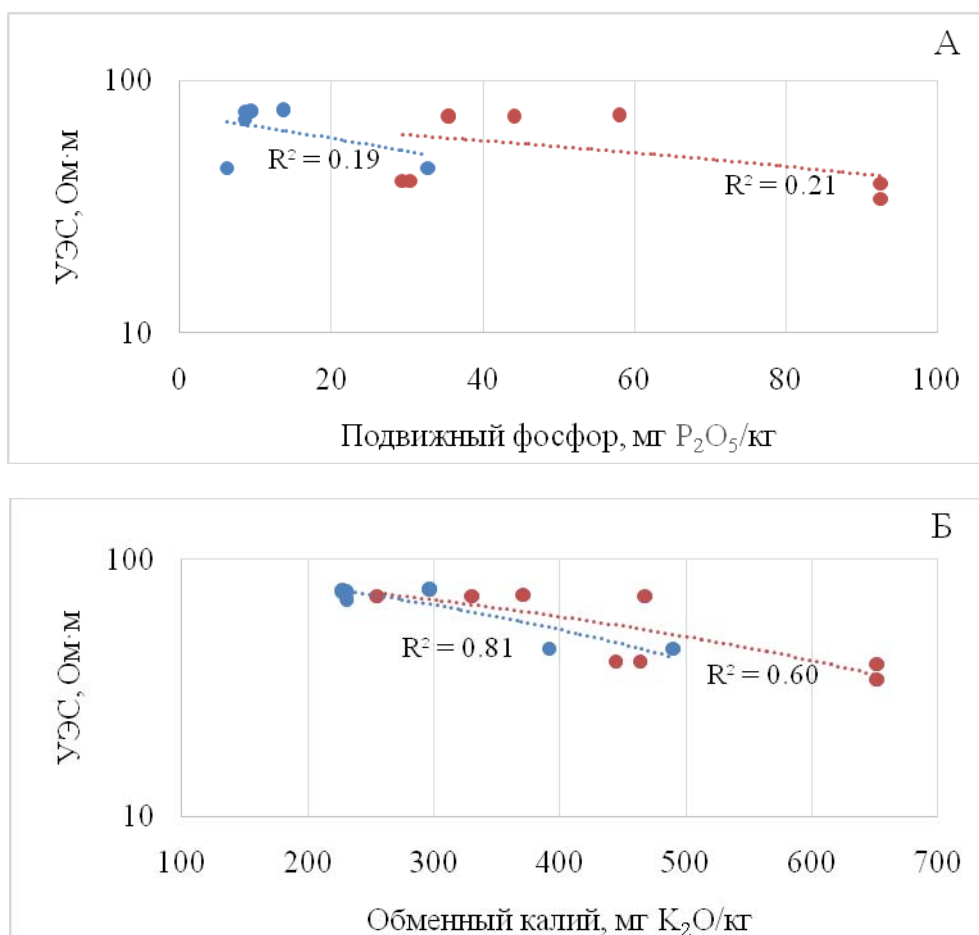


Рисунок 14. Зависимости величины УЭС от содержания подвижного фосфора (А) и обменного калия (Б) в различных почвенных горизонтах агрочернозема (синие линии и точки) и агростратозема (красные линии и точки).

ВЫВОДЫ

В результате геофизических исследований почв черноземного ряда Буготакского мелкосопочника установлено следующее.

Применение магниторазведки для решения почвенно-генетических и почвенно-агрохимических задач в условиях близко залегающих коренных пород (в пределах первого десятка метров) не представляется возможным, так как аномалии магнитного поля, обусловленные неоднородным геологическим строением, существенно выше по амплитуде, чем вариации магнитного поля, связанные с вещественным составом почв.

Метод георадиолокации позволяет оценить мощность и глубину залегания гумусово-аккумулятивного слоя почв в целом и, в том числе, выделить агротемногумусовый (пахотный) горизонт, погребенный темногумусовый горизонт, а также выявить границы залегания глинисто-иллювиального горизонта и переходного горизонта АВ.

Сравнение почв, расположенных на пашне и целинном участке показало, что по данным электротомографии гумусово-аккумулятивные горизонты пахотных и целинных почв существенно отличаются по величине удельного электрического сопротивления (более высокие значения получены в целинных почвах), но различие в вещественном составе целинных и пахотных почв в амплитудных характеристиках георадарного сигнала не выражено. Однако георадиолокационный метод позволяет установить изменение мощности гумусово-аккумулятивного слоя в пространстве на целинном участке.

При высоких значениях содержания общего углерода в гумусово-аккумулятивном слое (что наблюдалось в обеих изученных почвах) закономерность снижения УЭС с увеличением содержания ПОВ перестает работать. В этом случае ведущую роль в изменении УЭС очевидно приобретают такие факторы как гранулометрический и литологический состав почвы, а также определенный вклад, вероятно, вносят структура и микроагрегатный состав почв, плотность их

сложения, и качество ПОВ. При анализе обеих почв (выявлении различий между гумусово-аккумулятивным слоем и иллювиальным горизонтом, между стратифицированным темногумусовым горизонтом и погребенным горизонтом, между гумусово-аккумулятивными горизонтами пахотной и целинной почв) прослеживается одинаковая закономерность: повышение содержания илистой фракции и снижением доли крупной пыли сопровождается снижением электрического сопротивления, т.е. утяжеление гранулометрического состава вызывает (сопровождается) снижение УЭС.

По данным электротомографии УЭС гумусово-аккумулятивного слоя (ниже 10 см) агрочернозема составляет около 70 Ом·м, а приповерхностный слой почвы 0-10 см (подвергнутый плоскорезной обработке на эту глубину) диагностируется пониженным до 40-45 Ом·м УЭС. Агротемногумусовый (пахотный) горизонт агростратозема выделяется пониженным УЭС до 30-45 Ом·м, что также может быть связано с обработкой почвы. Наряду с этим, этот горизонт отличается повышенным содержанием подвижного фосфора и обменного калия. Обеднённые этими веществами почвенные горизонты характеризуются несколько повышенным УЭС.

Темногумусовые горизонты (AU, RU) агростратозема имеют повышенное до 60-70 Ом·м электросопротивление на фоне низкоомной почвообразующей породы, классифицируемой как легкие глины по гранулометрическому составу. УЭС темногумусового горизонта на целинном участке значительно выше, чем в пределах пашни.

Для оценки плодородия гумусово-аккумулятивных горизонтов почв с помощью геофизических методов рекомендуется проводить картирование полей методом электротомографии на глубину до 30 см. В целом, наиболее перспективным мы считаем комплексное применение электротомографии и георадиолокации, которое позволяет оценить мощность и нижнюю границу гумусово-аккумулятивного слоя, включая его разделение на агротемногумусовый (пахотный) и темногумусовый горизонты, а также выделить глубину залегания иллювиального горизонта и верхнюю границу аккумулятивно-карбонатного горизонта.

Электропроводность почвенной суспензии отрицательно коррелировала с мелким песком и крупной пылью, и положительно – с содержанием глинистых (<0.002 мм) частиц, карбонатов, обменного кальция и реакцией среды. Электропроводность, анализируемая в лабораторных условиях, и электросопротивление, определяемое в полевых условиях, существенно различаются, что связано с разным вкладом объёмной и поверхностной проводимости в суммарную проводимость в образцах в виде пасты и в породах ненарушенного сложения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области: грант № 17-44-540892 p_a.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балков Е.В., Панин Г.Л., Маништейн Ю.А., Маништейн А.К., Белобородов В.А. Опыт применения электротомографии в геофизике // *Геофизика*. 2012. № 6. С. 54-63.
2. Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б. Электрические свойства черноземных почв Аларской степи // *Вестник Бурятского государственного университета*. 2014. № 3. С. 156-160.
3. Бобачев А.А., Горбунов А.А. Двумерная электроразведка методом сопротивлений и вызванной поляризации: аппаратура, методики, программное обеспечение // *Разведка и охрана недр*. 2005. № 12. С. 52-54.
4. Берхин Ю.И., Чагина Е.Г., Янцен Е.Д. Диагностика условий фосфорного питания сельскохозяйственных культур в Западной Сибири // *Агрохимия*. 1989. № 6. С. 112-116.
5. Владов М.Л., Золотарёв В.П., Старовойтов А.В. *Методическое руководство по проведению георадиолокационных исследований*. Москва, 1997. 66 с.
6. Владов М.Л., Старовойтов А.В. *Введение в георадиолокацию*. Учебное пособие. М.: Из-дo МГУ, 2004. 153 с.
7. Воронин А.Я. Критерии идентификации строения и функциональных свойств почвенного профиля в георадиолокационных исследованиях с использованием георадара "Лоза-В" // *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*. 2015. № 80. С. 106-126.
8. Гамзиков Г.П. *Агрохимия азота в агроценозах*. Новосибирск: СО РАСХН, 2013. 790 с.
9. *Геологическая карта СССР масштаба 1:200000. Серия Кузбасская. Лист N-44-XII. Объяснительная записка*. Составители: Т.Ф. Васютинская, Д.В. Михайловский. Редактор А.Б. Гинцингер // Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр. Москва, 1963. С. 116.
10. Гинзбург К.Е. Методы определения фосфора в почве // *Агрохимические методы исследования почв / Под ред. А.В. Соколова*. Москва: Наука, 1975. С. 106-190.
11. Заплавнова А.А., Оленченко В.В., Цибизов Л.В., Барсуков П.А. Оценка плодородия почв на основе

- комплексного геофизического картирования // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. 2018. Т. 3. С. 124–133. doi: [10.18303/2618-981X-2018-3-124-132](https://doi.org/10.18303/2618-981X-2018-3-124-132)
12. *Инструкция по магниторазведке (наземная магнитная съемка, аэромагнитная съемка, гидромагнитная съемка)* / Под ред. Ю.С. Глебовского. М-во геологии СССР. Л.: Недра, 1981. 263 с.
13. *Классификация и диагностика почв СССР*. Составители: В.В. Егоров, В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова, Н.Н. Розова, В.А. Носин, Т.А. Фриев. М.: Колос, 1977. 224 с.
14. Кленов Б.М. *Гумус почв Западной Сибири*. М.: Наука, 1981. 142 с.
15. Коснырева М.В. *Разработка комплекса геофизических методов для решения прикладных задач почвенного картирования*. Дисс. на соискание ученой степени к.г.-м.н. Москва, 2007. 135 р.
16. Манштейн Ю.А. *Методика исследования подповерхностных неоднородностей на основе малоуглубинного индукционного частотного зондирования*. Дис. на соискание ученого звания к.т.н. Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 2010. 111 с.
17. *Наумова Н.Б.* К вопросу об определении содержания органического углерода в почве // *Почвы и окружающая среда*. 2018. №1(2). С.98-103. doi: [10.31251/pos.v1i2.13](https://doi.org/10.31251/pos.v1i2.13)
18. Никитенко Ф.А. Лёссовые породы Новосибирского Приобья и их инженерно-геологическая характеристика // *Труды НИИЖТа*. Новосибирск, 1963. Вып. 34. 285 с.
19. Пансю М., Готеру Ж. *Анализ почвы: минералогические, органические и неорганические методы анализа: справочник*. Санкт-Петербург: Профессия. 2014. 799 с.
20. *Поздняков А.И., Елисеев П.И.* Зависимость удельного электрического сопротивления от некоторых свойств антропогенно-преобразованных легких почв агроландшафтов гумидной зоны // *Вестник ОГУ*. 2012. № 10 (146). С. 98-104.
21. Поздняков А.И., Елисеев П.И., Поздняков Л.А. *Электрофизический подход к оценке некоторых элементов окультуренности и плодородия легких почв гумидной зоны* // *Почвоведение*, 2015. № 7. С. 832–842. doi: [10.7868/S0032180X15050068](https://doi.org/10.7868/S0032180X15050068)
22. *Полевой определитель почв России*. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
23. *Пягай Э.Т., Белобров В.П., Молчанов Э.Н., Сео Мунг Чул, Сон Йон Куи* Использование георадара в почвенных исследованиях // *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*. 2009. Т. 64. С. 34-40.
24. *Смоленцева Е.Н., Чумбаев А.С., Соколова Н.А.* Почвы Предальтайской лесостепной почвенной провинции Западной Сибири (на примере Буготакского мелкосопочника). Путеводитель полевой почвенной экскурсии Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 50-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН «Почвы в биосфере» (Новосибирск, 10-14 сентября 2018 г.) / Под ред. Б.А. Смоленцева. Новосибирск: ИПА СО РАН, 2018. 49 с.
25. Сорокин О.Д. *Прикладная статистика на компьютере*, 2-е издание. Новосибирск, 2012. 282 с.
26. *Танасиенко А.А.* Эрозия – ландшафты и почвы Присалаирской дренированной равнины // *Путеводитель научных полевых экскурсий IV съезда Докучаевского общества почвоведов РАН*. Новосибирск, 2004. С. 12-31.
27. *Теория и практика химического анализа почв* (Под редакцией Л.А. Воробьевой) М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
28. *Хмелев В.А.* Лёссовые черноземы Западной Сибири. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1989. 200 с.
29. *Шапорина Н.А., Чичулин А.В., Танасиенко А.А.* Латеральная изменчивость агрофизических показателей и неоднородность гидротермического поля в почвенном покрове склоновых поверхностей Предсалаирья // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. №. 12-7. С. 1270-1275.
30. *Шеин Е.В., Гончаров В.М.* *Агрофизика*. Ростов н/Д: Феникс. 2006. 400 с.
31. *Шеин Е.В.* Гранулометрический состав почв: проблемы методов исследования, интерпретации результатов и классификаций // *Почвоведение*. 2009. № 3. С. 309-317.
32. *Algeo J., Van Dam R.L., Slater L.* Early-Time GPR: A Method to Monitor Spatial Variations in Soil Water Content during Irrigation in Clay Soils // *Vadose Zone Journal*. 2016. Vol. 15(11). P.1-9. doi: [10.2136/vzj2016.03.0026](https://doi.org/10.2136/vzj2016.03.0026)
33. *Handbook of agricultural geophysics* / Eds. Allred B.J., Daniels J.J., Ehsani M.R. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008. 410 p.
34. *Dean Jr. W.E.* Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: comparison with other methods // *J. Sediment. Res.* 1974. Vol. 44. №1. P. 242–248. doi: [10.1306/74D729D2-2B21-11D7-8648000102C1865D](https://doi.org/10.1306/74D729D2-2B21-11D7-8648000102C1865D)
35. *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. № 106. FAO, Rome, 2014. 181 p.
36. *Kucerik J., Demyan M.S., Siewert C.* Practical application of thermogravimetry in soil science. Part 4. Relationship between clay, organic carbon and organic matter contents // *J. Therm. Anal. Calorim.* 2016. Vol. 123. No. 3. P. 2441–2450. doi: [10.1007/s10973-015-5141-8](https://doi.org/10.1007/s10973-015-5141-8)
37. *Kucerik J., Tokarski D., Demyan M.S., Merbach I., Siewert C.* Linking soil organic matter thermal stability with contents of clay, bound water, organic carbon and nitrogen // *Geoderma*. 2018. Vol. 316. P. 38–46. doi: [10.1016/j.geoderma.2017.12.001](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.001)
38. *Mathé V., Lévêque F.* High resolution magnetic survey for soil monitoring: detection of drainage and soil tillage effects // *Earth. Planet. Sci. Lett.* 2003. Vol. 212. Iss.1-2. P. 241-251. doi: [10.1016/S0012-821X\(03\)00241-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00241-3)
39. *Rogers C.D.F., Chapman D.N., Entwisle D.* et al. Predictive mapping of soil geophysical properties for GPR

- utility location surveys // *5th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar*, Granada, Spain. 2009. P. 60-67.
40. Shi R., Cioppa M.T. Magnetic survey of topsoils in Windsor – Essex County, Canada. // *Journal of Applied Geophysics*. 2006. Vol. 60. Iss. 3-4. P. 201-212. doi: [10.1016/j.jappgeo.2006.03.002](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2006.03.002)
41. Siewert C. Rapid screening of soil properties using thermogravimetry // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2004. Vol.68. No.5. P. 1656–1661. doi: [10.2136/sssaj2004.1656](https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1656)
42. Siewert C., Demyan M.S., Kucerik J. Interrelations between soil respiration and its thermal stability // *J. Therm. Anal. Calorim.* 2012. Vol. 110. No. 1. P. 413–419. doi: [10.1007/s10973-011-2099-z](https://doi.org/10.1007/s10973-011-2099-z)

Поступила в редакцию 18.01.2019; принята 06.02.2019

Опубликована 11.02.2019

Сведения об авторах:

Оленченко Владимир Владимирович - кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующий лабораторией геоэлектрики ФГБУН Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (г. Новосибирск, Россия); olenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Смоленцева Елена Николаевна – научный сотрудник лаборатории географии и генезиса почв ФГБУН Института почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); esmolenceva@issa-siberia.ru

Заплавнова Анна Алексеевна - лаборант лаборатории естественных полей ФГБУН Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (г. Новосибирск, Россия); zaplavnovaAA@ipgg.sbras.ru

Русалимова Ольга Александровна – младший научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Института почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); rusalimova@issa-siberia.ru

Барсуков Павел Анатольевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Института почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); barsukov@issa-siberia.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи



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

USING GEOPHYSICAL METHODS TO ASSESS THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF CHENOZEMIC SOILS

© 2018 Olenchenko V.V. ^{1,2}, Smolentseva E.N. ³, Zaplavnova A.A. ¹,

Rusalimova O.A. ³, Barsukov P.A. ³

Addresses: ¹ Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics SB RAS, Koptuga 3, Novosibirsk 630090 Russia, E-mail: olenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

² Novosibirsk State University, Pirogova 2, Novosibirsk 630090 Russia

³ Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, Lavrentieva 8/2, Novosibirsk 630090 Russia, E-mail: barsukov@issa-siberia.ru

The aim of the study. To assess the potential of geophysical methods to investigate the structure and properties of chernozemic soils.

Location and time of the study. The field work was carried out during June-October 2018 on the two arable soils, namely Luvic Greyzemic Chernozem (Siltic) and Haplic Phaeozem (Siltic, Colluvic, Pachic) over Haplic Phaeozem (Siltic, Luvic), in the Bugotak Hills, which is part of the Cis-Salair denudation-accumulation plain on the right side of the Ob River in the south-east of West Siberia.

Methodology. Soils were studied by the standard soil and agrochemical techniques as well as by such geophysical methods as magnetometry, electrotomography and ground-penetrating radar. Soil morphology was described, and soil samples were collected from soil genetic horizons. Physical, physicochemical and chemical (altogether up to 28) properties, pertaining to soil potential and actual fertility were determined.

Relationships between soil properties and geophysical parameters were studied using correlation and multiple regression analyses.

Main results. *The study showed that when underlying solid rock is rather close to the surface, the magnetometry cannot be used to solve urgent issues in soil science. When soil total carbon (STC) in humus-accumulating layer was high, the relationship of the decrease in electrical resistivity (ER) with the increase in STC did not work anymore. The ER was found to depend on soil texture, as the heavier soil granulometry resulted in decreased ER. This regularity allows establishing the depth of illuvial horizons in humus-accumulating soils and a fortiori texture-differentiated ones. The ER in the humus-accumulation layer of the Luvic Greyzemic Chernozem (Siltic) was estimated as 70 ohm-m, while the 0-10 cm thick soil layer after subsurface cultivator could be determined by the ER values decreased to 40-45 ohm-m. The combined use of electrotomography and ground-penetrating radar was found to be the most promising for soil studies as such combination allows estimating the thickness of the humus-accumulating layer and its lower boundary, as well as discriminating between agro-dark-humus (arable) and dark-humus horizons, establishing the depth of the illuvial horizon and the upper boundary of the carbonate horizon.*

Conclusion. *We believe that geophysical methods can be beneficial for soil genesis research and large-scale soil mapping because of their ability to account for natural heterogeneity of spatial variation of soil potential fertility properties. Large scale soil maps provide a fortiori indispensable basis to solve many agricultural and environmental problems such as monitoring soil properties' changes because of soil degradation due to erosion, estimating pollution degree, assessing soil nutrients' content and calculating fertilization rates, etc. Establishing even empirical relationships between soil geophysical parameters and crop yields currently seems to be a rather ambitious task, as crop yields are mostly determined not by "basic" soil characteristics (which may correlate with geophysical parameters), but by plant available mineral nutrients and such external factors as photosynthetically active solar radiation, precipitation, fertilizer and pesticide application.*

Keywords: *electrotomography; ground-penetrating radar; magnetometry; soil properties; soil fertility; Chernozemic soils; Bugotak Hills; West Siberia*

How to cite: *Olenchenko V.V., Smolentseva E.N., Zaplavnova A.A., Rusalimova O.A., Barsukov P.A. Using geophysical methods to assess the structure and properties of chernozemic soils // The Journal of Soil and Environment. 2019. 2(1). e57. doi:10.31251/pos.v2i1.57*

REFERENCES

1. *Balkov E.V., Panin G.L., Manstein Yu.A., Manstein A.K., Beloborodov V.A. Electrotomography - in the geophysics, The Russian Geophysics Journal, 2012. Vol. 6, p. 54-63. (in Russian)*
2. *Bashkuev Yu.B., Khaptanov V.B. Electrical properties of the alarsky steppe chernozem soils, Bulletin of the Buryat State University, 2014, Vol. 3, p. 156-160. (in Russian)*
3. *Bobachev A.A., Gorbunov A.A. Two-dimensional electrical prospecting by the method of resistance and induced polarization: equipment, methods, software, Prospect and protection of mineral resources, 2005, No.12, p. 52-54. (in Russian)*
4. *Berhin Yu.I., Chagina E.G., Yantsen E.D. Diagnostics of conditions of phosphorus nutrition of crops in Western Siberia, Agrohimiya, 1989, No. 6, p. 112-116. (in Russian)*
5. *Vladov M.L., Zolotaryov V.P., Starovoytov A.V. Methodological guide to conduct GPR studies. Moscow, 1997, 66 p. (in Russian)*
6. *Vladov M.L., Starovoytov A.V. Introduction to GPR. Tutorial. Moscow: Publishing House of MSU, 2004, 153 p. (in Russian)*
7. *Voronin A.Y. Criteria for identifying the structure and functional properties of the soil profile in GPR studies using the GPR "Loza-V", Bulletin of V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2015, Vol. 80, p. 56-72.*
8. *Gamzikov G.P. Agrochemistry of nitrogen in agrocenoses. Novosibirsk, SB RAAS Pubs., 2013, 790 p. (in Russian)*
9. *Geological map of the USSR scale 1: 200000. Kuzbass series. Sheet N-44-XII. Explanatory note. Compiled by: T.F. Vasyutinskaya, D.V. Mikhailovsky (ed. by A.B. Gintsinger). State Scientific and Technical Publishing House of Literature on Geology and Mineral Protection. Moscow, 1963, p. 116. (in Russian)*
10. *Ginzburg K.E. Methods for determination of phosphorus in the soil. In book: Agrochemical methods for studying the soil. Ed. by A.V. Sokolov. Moscow: Nauka Publ., 1975, p.106-190. (in Russian)*
11. *Zaplavnova A.A., Olenchenko V.V., Tsibizov L.V., Barsukov P.A. Assessment of soil fertility based on complex geophysical mapping, Interexpo GEO-Siberia, 2018, Vol. 3, p. 124-133. doi: 10.18303/2618-981X-2018-3-124-132 (in Russian)*
12. *Instructions for magnetic exploration (ground magnetic survey, aeromagnetic survey, hydromagnetic survey) / Ed. by Yu.S. Glebovsky. Ministry of geology of the USSR. Leningrad: Nedra Publ., 1981, 263 p. (in Russian)*
13. *Classification and diagnostics of Soils of the USSR / Compiled by: V.V. Egorov, V.M. Friedland, E.N. Ivanova, N.N. Rozova, V.A. Nosin, T.A. Friev. Moscow: Kolos Publ., 1977. 224 p. (in Russian)*
14. *Klenov B.M. Humus of Western Siberian soils. Moscow: Nauka Publ., 1981. 142 p. (in Russian)*
15. *Kosnyreva M.V. Development of a complex of geophysical methods for solving applied problems of soil*

- mapping. Dissection for the scientific title of candidate of Cand. of Geol.-Miner. Sci. in Geophysics. Moscow, 2007. 135 p. (in Russian)
16. Manstein Yu.A. *Procedure for the study of subsurface inhomogeneities based on shallow induction frequency sounding*. Dissection for the scientific title of candidate of Technical Sciences. Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics SB RAS, 2010. 111 p. (in Russian)
 17. Naumova N.B. Writing about organic carbon determination in soil, *The Journal of Soils and Environment*. 2018, Vol.1, No 2, p. 98-103. doi: 10.31251/pos.v1i2.13 (in Russian)
 18. Nikitenko F.A. Loess sediments of the Novosibirsk Priobye and their engineering and geological characteristics, *Proceedings of the Research Institute of Railway Transport*, 1963. Vol. 34. 285 p. (in Russian)
 19. Pansu M., Gothera J. *Soil analysis: mineralogical, organic and inorganic methods of analysis: a reference book*. St. Petersburg: Professiya Publ., 2014, 799 p. (in Russian)
 20. Pozdnyakov A.I., Eliseev P.I. Dependence of electrical resistivity on some properties of anthropogenically transformed light soils of agrolandscapes of the humid zone, *OGU Bulletin*, 2012, No. 10 (146), p. 98-104. (in Russian)
 21. Pozdnyakov A.I., Eliseev P.I., Pozdnyakov L.A. Electrophysical approach to the assessment of some elements of the cultivation and fertility of light soils of the humid zone, *Eurasian Soil Science*, 2015, Vol.48, No. 7, p. 726-735. doi: 10.1134/S1064229315050063
 22. *Field guide for Russian soil*. Moscow: Dokuchaev Soil Science Institute Publ., 2008, 182 p. (in Russian)
 23. Pyagai, E.T., Belobrov, V.P., Molchanov, E.N., Seo Mung Chul, Son Yon Kyi. Use of GPR in soil studies, *Bulletin of V.V. Dokuchaev Soil Science Institute*, 2009, Vol. 64, p. 34-40. (in Russian)
 24. Smolentseva E.N. Chumbaev, A.S. Sokolov, D.A. Sokolova N.A. *Soils of the Pre-Altai forest-steppe soil province of Western Siberia (using the example of the Bugotak Hills)*. Guide for a field soil excursion at the Russian Scientific Conference with international participation dedicated to the 50th anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences "Soils in the Biosphere" (Novosibirsk, 10-14 September 2018) / Ed. by Smolentsev B.A. Novosibirsk: ISSA SB RAS Publ., 2018. 49 p. (in Russian)
 25. Sorokin O.D. *Applied statistics on a computer* / 2nd edition. Novosibirsk, 2012. 282 p. (in Russian)
 26. Tanasienko A.A. Erosion — Landscapes and Soils of the Cis-Salair Drained Plain. In book: *A Guide for Scientific Field Excursions of the 4th Congress of the Dokuchaev Society of Soil Scientists of the Russian Academy of Sciences*. Novosibirsk, 2004, p. 12-31. (in Russian)
 27. *Theory and Practice of Soil Chemical Analysis* / Ed. by L.A. Vorobyova. Moscow: GEOS Publ., 2006, 400 p. (in Russian)
 28. Khmelev V.A. *Loess Chernozems of Western Siberia*. Novosibirsk: Nauka SB Publ., 1989, 200 p. (in Russian)
 29. Shaporina N.A., Chichulin A.V., Tanasienko A.A. The lateral variability of agrophysical indicators and the heterogeneity of the hydrothermal field in soil slope surfaces Predsalair'e, *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2016, No. 12-7, p. 1270-1275. (in Russian)
 30. Shein E.V., Goncharov V.M. *Agrophysics*. Rostov-na-Donu: Fenix publ., 2006. 400 p. (in Russian)
 31. Shein E.V. The particle-size distribution in soils: problems of the methods of study, interpretation of the results, and classification, *Eurasian Soil Science*, 2009, No.3, p. 284-291. doi: 10.1134/S1064229309030053
 32. Algeo J., Van Dam R.L., Slater L. Early-Time GPR: A Method to Monitor Spatial Variations in Soil Water Content during Irrigation in Clay Soils, *Vadose Zone Journal*, 2016, Vol. 15(11), p.1-9. doi:10.2136/vzj2016.03.0026
 33. *Handbook of agricultural geophysics* / Eds. Allred B.J., Daniels J.J., Ehsani M.R. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008, 410 p.
 34. Dean Jr.W.E. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: comparison with other methods, *J. Sediment. Res.*, 1974, Vol. 44, №1, p. 242-248. doi: 10.1306/74D729D2-2B21-11D7-8648000102C1865D
 35. *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. № 106. FAO, Rome, 2014, 181 p.
 36. Kucerik J., Demyan M.S., Siewert C. Practical application of thermogravimetry in soil science. Part 4. Relationship between clay, organic carbon and organic matter contents, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2016, Vol. 123, No. 3, p. 2441-2450. doi: 10.1007/s10973-015-5141-8
 37. Kucerik J., Tokarski D., Demyan M.S., Merbach I., Siewert C. Linking soil organic matter thermal stability with contents of clay, bound water, organic carbon and nitrogen, *Geoderma*, 2018, Vol. 316, p. 38-46. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.12.001
 38. Mathé V., Lévêque F. High resolution magnetic survey for soil monitoring: detection of drainage and soil tillage effects, *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 2003, Vol. 212, Iss. 1-2, p. 241-251. doi: 10.1016/S0012-821X(03)00241-3
 39. Rogers C.D.F., Chapman D.N., Entwisle D. et al. Predictive mapping of soil geophysical properties for GPR utility location surveys. In book: *5th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar*, Granada, Spain, 2009, p. 60-67.
 40. Shi R., Cioppa M.T. Magnetic survey of topsoils in Windsor – Essex County, Canada, *Journal of Applied Geophysics*, 2006, Vol. 60, Iss.3-4, p. 201-212. doi: 10.1016/j.jappgeo.2006.03.002
 41. Siewert C. Rapid screening of soil properties using thermogravimetry, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2004, Vol.68, No.5, p. 1656-1661. doi: 10.2136/sssaj2004.1656

42. Siewert C., Demyan M.S., Kucerik J. Interrelations between soil respiration and its thermal stability, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2012, Vol. 110, No. 1, p. 413–419. doi: 10.1007/s10973-011-2099-z

Received 18 January 2019

Accepted 06 February 2019

Published 11 February 2019

About the authors:

Olenchenko Vladimir V. - Cand. of Geol. and Mineral. Sci., Associate Professor, Head of Laboratory of Geoelectrics in the Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); olenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Smolentseva Elena N. – Researcher in the Laboratory of Soil Geography and Genesis in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); esmolenceva@issa-siberia.ru

Zaplavnova Anna A. - Laboratory Assistant in the Laboratory of Natural Geophysical Fields in the Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); zaplavnovaAA@ipgg.sbras.ru

Rusalimova Olga A. – Junior Researcher in the Laboratory of Agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); rusalimova@issa-siberia.ru

Barsukov Pavel A. – Cand. of Biol. Sci., Leading Researcher in the Laboratory of Agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); barsukov@issa-siberia.ru

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/)