

ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВ АНТРОПОГЕННО-ПРЕОБРАЗОВАННЫХ ЛЕГКИХ ПОЧВ АГРОЛАНДШАФТОВ ГУМИДНОЙ ЗОНЫ

Установлено, что удельные электрические сопротивления в целинных и антропогенно-преобразованных почвах тесно связаны с такими свойствами почв как содержания физической глины и гумуса, а также с емкостью катионного обмена зависимостями экспоненциального вида с высокими коэффициентами корреляции (0,82–0,91). Это дает основание считать весьма перспективным использование полевых и лабораторных методов электрического сопротивления при оценке пространственного распределения этих свойств в пределах поля при использовании приемов точного, адаптивно-ландшафтного земледелия и решении ряда других задач.

Ключевые слова: электрическое сопротивление, антропогенно-преобразованные почвы легкого грансостава.

Введение

Электрическое сопротивление почв давно зарекомендовало себя как быстрый для измерения и удобный для анализа обобщенный параметр, характеризующий целый комплекс свойств почв [6]. В аридных регионах уже достаточно широко используют электрическое сопротивление и обратную ему величину – электропроводность, для оценки засоления [6]. Выявление четких зависимостей между величиной удельного электрического сопротивления и отдельными свойствами или комплексом свойств почв гумидной зоны будет являться основанием для объективного применения этих методов и здесь [7].

В смежных с почвоведением науках, где активно изучаются закономерности изменения электрических свойств, в том числе и электрического сопротивления, для самых разных физико-химических природных сред, например в геофизике, можно легко видеть, что перечень свойств, от которых зависит сопротивление, весьма широк и часто, даже в учебниках, приводится обобщенно и не конкретно [12].

Например, указывается, что электрическое сопротивление зависит от минералогического и гранулометрического составов, пористости, насыщенности пород растворами (влажности), от строения и плотности среды, ее температуры и т. д.

Но, как известно, эти свойства для определенных почв имеют вполне определенные диапазоны изменений, поэтому мы вправе ожидать для электрического сопротивления вполне четких зависимостей от конкретных свойств почв. Круг этих свойств для определенных групп почв

будет, на наш взгляд, хотя и различен, но не широк и вполне конкретен. Важно правильно и четко выделить их первостепенность и не искать зависимости сопротивления от тех свойств, которые в принципе не могут на него влиять или влияют незначительно.

Такие попытки по установлению зависимостей удельного электрического сопротивления от ряда самых разных свойств почв гумидной зоны проводились и ранее в почвоведении, в том числе и нами [6, 7]. В ряде случаев были получены достаточно тесные зависимости от отдельных свойств почв [6], например, влажности [6]. В других случаях при анализе таких зависимостей, например, при выявлении зависимостей сопротивления с элементами питания – фосфором и калием, а также окисным железом, успехов получено не было [7].

С другой стороны, использование электрофизических методов сопротивления в почвоведении будет успешным, если будут найдены зависимости от таких свойств почв, которые не только активно влияют на электрическое сопротивление, но и являются базовыми, основополагающими и определяющими «образ» той или иной почвы, ее основные особенности, т. е. важны и с точки зрения изучения самих почв. Наиболее важными в этом отношении могут быть именно грансостав – физглина, как важнейший показатель дисперсного состояния почвы; содержание общего углерода – как основной показатель плодородия почвы, а также емкость катионного обмена, которая опосредовано характеризует развитость поверхности дисперсной среды-почвы и ее спо-

способность к насыщению твердой фазы почвы носителями электричества, в нашем случае катионами.

Эти свойства почв, отражая самые разные особенности физико-химической ее организации, по-видимому, будут тесным образом взаимосвязаны и между собой, а также однонаправлены в своих изменениях – с увеличением выраженности одного будет увеличиваться другое свойство и наоборот. Поэтому можно ожидать и одинакового равнонаправленного влияния их на электрическое сопротивление.

Понятно, что основной причиной электросопротивления или электропроводности являются концентрации ионов в почвах и влияние на них в значительной мере влагосодержания – влажности почвы, особенно, как уже выяснено, в том числе и нами, в сорбционном диапазоне [6]. Тогда как при достаточно высокой влажности – большей влаги разрыва капилляров – ее влияние на сопротивление резко снижается. И это весьма важно, так как, измеряя сопротивление при высоком, хотя и разном естественном увлажнении, когда оно мало влияет на сопротивление, мы обнаруживаем, что на первое место выступают другие более стабильные базовые свойства почв, такие как физглина, углерод, ЕКО.

В случае получения тесных зависимостей от таких важных свойств почв в гумидной зоне, как перечисленные выше, этот подход может найти применения в самых разных областях почвоведения, экологии и земледелия.

Например, в ряде развитых стран (США, Канаде) и некоторых странах Западной Европы измерения электрического сопротивления активно используются при почвенных обследованиях для точного земледелия, часто без должной почвенной трактовки, полагаясь в основном на техническую обеспеченность этого направления сельхозпроизводства [7].

Делаются попытки внедрения технологии точного земледелия и у нас в стране, пока, к сожалению, практически единичные [7]. Но и они требуют согласования огромного количества качественной информации не только по полю в целом, но и по отдельным участкам одного поля. Вместе с тем эти технологии не могут базироваться на данных и методах исследования почв прошлого столетия и агрохимических картограммах, сформированных по устаревшим методологиям, когда один компози-

ционный образец почвы представляет площадь 10–20 га без учета пестроты и топографии поля и распределения свойства по полю [1–2]. Для обеспечения новых подходов обследования почв сегодня уже достаточно широко применяются приборы глобального позиционирования (GPS), методы дистанционного зондирования и географические информационные системы (ГИС). Для сельского хозяйства эти информационные технологии обеспечивают точный и автоматизированный сбор, анализ и хранение качественной и количественной информации о почвах в пределах даже одного поля.

Ряд этих задач можно разрешить, грамотно применяя методы электрофизики как полевые, так и лабораторные. В этом отношении имеет смысл обратить внимание на опыт развитых стран. В Северной Америке и Европе использование ЕС-карт почвы (ЕС, electrical conductivity – электропроводность). Здесь это во многом уже обыденное явление и входит даже в перечень профессиональных требований к работнику. Применение этих методов сокращает затраты на исследование и позволяет получить более объективную и репрезентативную информацию о смене почвенных свойств в пространстве быстро и сравнительно легко по сравнению с исследованиями, в которых используется только классические методы и подходы. Ведущие агроконсалтинговые фирмы многих стран используют ЕС-картограммы как один из элементов для изучения параметров неоднородности почвы [7].

Исходя из выше изложенного, можно утверждать, что для научно обоснованного применения измерений сопротивления (электропроводности) для целей точного земледелия необходимо выяснить – с какими свойствами в первую очередь оно связано и насколько тесно. В этом случае электрическое сопротивление может использоваться как основной интегральный (обобщающий) оценочный показатель, по которому можно будет детально и быстро обследовать почвы отдельных полей, ранжировать массивы пахотных почв по выраженности их определенных свойств, изучать топографию их распределения в пределах одного поля.

Поэтому целью данной работы явилось изучение влияния ряда классических свойств

почв легкого гранулометрического состава в культурных ландшафтах гумидной зоны.

Объекты и методы

Для того чтобы охватить как можно больший диапазон выраженности признаков, влияющих на сопротивление, были специально выбраны легкие естественные почвы и почвы окультуренных ландшафтов гумидной зоны, в которых существенно меняются такие характерные свойства, как физглина, содержание общего углерода и ЕКО. Длительное использование таких почв как средств сельскохозяйственного производства в гумидной зоне обычно приводит к изменениям природных процессов почвообразования и свойств почв, т. е. к формированию новых культурных почв, с ярко выраженным различием по отмеченным свойствам [3–5, 9–11].

Диапазон изменения вышеперечисленных свойств почв весьма широк, что важно при определении их влияния на электрическое сопротивление.

Конкретно объектами исследования послужили целинные и различные по окультуренности почвенные массивы легких по грансоставу почв Дмитровского района Московской области, расположенных на небольшом удалении друг от друга в пределах II–III ярусов макросклона северной экспозиции Клинско-Дмитровской гряды, ограниченной уступом к древнеозерному расширению долины р. Яхромы:

– объект №1 – целинные серогумусовые супесчаные почвы на озерно-ледниковых супесях. Московская область, Дмитровский район, Клинско-Дмитровская гряда;

– объект №2 и №3 – слабоокультуренные агросерогумусовые почвы, имеющие разный срок освоения – 20 и 25 лет соответственно. Данные почвы сформированы также на озерно-ледниковых супесях, в непосредственной близости к коренному уступу древнеозерного расширения. Московская область, Дмитровский район, Клинско-Дмитровская гряда;

– объект №4 – среднеокультуренные агрозолемы супесчаные, развитые на двучленной основе: озерно-ледниковых супесях, подстилаемых озерно-ледниковыми глинами. Московская область, Дмитровский район, Клинско-Дмитровская гряда;

– объект №5 – высокоокультуренные агрозолемы серогумусовые, развитые на озерно-лед-

никовых супесях в пределах I яруса рельефа. Московская область, Дмитровский район, Клинско-Дмитровская гряда.

Измерения сопротивления и отбор образцов проводили на ключевых участках этих объектов. Площадь ключевых массивов варьировалась от десятых долей гектара до 20 га. Более подробную характеристику можно получить в работе [8].

Все объекты были подробно изучены полевыми методами электрофизики почв [8]. При проведении измерений электрического сопротивления использовался портативный прибор LandMapper-02 и четырехэлектродные измерительные установки AMNB. В полевых условиях измерения удельного электрического сопротивления проводились при высокой, хотя и различной влажности (больше 1,5 МГ) установками AMNB с расстоянием между электродами в 30 см, а в лабораторных условиях тем же прибором, но использовались измерительные датчики – кюветы размером 3x5x3 см с плоскопараллельными АВ электродами (см. сайт WWW.Landviser.net).

В условиях лаборатории удельное электрическое сопротивление определялось при увлажнении почв до пастообразного состояния, т. е. при стандартизированных «равновесных» условиях [6].

В лаборатории были определены: влажность термостатно-весовым методом; содержание углерода при помощи экспресс-анализатора АН-7529М; гранулометрический состав методом лазерной дифракции на приборе «Analysette-22»; емкость катионного обмена согласно общепринятым методикам [1–2, 13]. Всего указанными методами были исследованы 123 образца.

Результаты и обсуждение

В первую очередь при анализе полученных результатов и зависимостей, конечно, стоял вопрос выбора вида зависимости сопротивления от исследуемых свойств.

Чаще всего этот вопрос решается исследователями, руководствуясь исключительно общим видом кривых и математико-статистическими соображениями. Однако следует отметить, что это не вполне корректно.

Строго говоря, при выборе любого вида зависимости следует опираться на физический смысл изучаемого явления, в нашем случае на природу и проявление электрических характеристик – сопротивления и электропроводности.

Для интерпретации полученных данных нами выбрана экспоненциальная зависимость вида $y=A*\exp(-b*x)$, часто называемая Больцмановской и описывающая поведение электрических характеристик в двойном электрическом слое дисперсных частиц. Причем, чем частица дисперсней и ближе по размерам к коллоидной, тем ярче проявление электрических параметров, в том числе и уменьшение электрического сопротивления, в силу увеличения сорбционных свойств частицы и, следовательно, обогащенности этой частицы носителями электричества – катионами. А чем больше концентрация ионогенных веществ, тем меньше сопротивление.

Отметим важную особенность экспоненты Больцмана. Она указывает на то, что снижение сопротивления при нарастании концентраций ионогенных соединений как в сорбированном состоянии, так и в растворе, но происходит оно не «бесконечно», а после достижения определенного уровня насыщения, снижение сопротивления не только замедляется с ростом концентраций, а практически прекращается, формируя правую выположенную ветвь экспоненты. Тогда как в левой части экспоненты малейшему изменению концентрации отвечает резкое изменение электрических параметров, в нашем случае электрического сопротивления (см. рис. 1–3).

Явления и закономерности, происходящие на микроуровне опосредованно проявляются и на макроуровне, когда измерениями охватываются достаточно большие объемы почвы.

На макроуровне величины электрического сопротивления также зависят от свойств дисперсных микрочастиц в исследуемом объеме. Именно поэтому для описания зависимостей сопротивления и выбраны такие классические свойства почв, которые, так или иначе, описывают, хотя и опосредовано, поведение двойного электрического слоя, его параметры для дисперсных частиц почв – физглина, ЕКО, общее содержание углерода.

С другой стороны, как уже указывалось, эти свойства важны и для характеристики самих почв.

Как и предполагалось, было выявлено, что электрическое сопротивление, измеренное в поле и лаборатории, тесным образом зависит от исследованного набора свойств почв: гранулометрического состава (физглина), ЕКО и содержания общего углерода (С%).

Проанализируем в начале зависимость сопротивления от физглины.

На рис. 1 легко прослеживаются довольно четкие зависимости удельного электрического сопротивления от физглины. Заметим, что диапазон изменения физглины находится в интервале от 4–6 % до 22–24%, т. е. грансостав варьировался от песка рыхлого и песка связанного до супеси и легкого суглинка, согласно классификации Н.А. Качинского [13]. Заметим, что мы склонны видеть причину этих изменений не в изменении минеральной части исходного грансостава песчаных флювиогляциальных отложений, а в их утяжелении при трансформации в процессе окультуривания почв [3–5].

Хотя в обоих случаях измерений, и в поле, и в лаборатории, коэффициенты корреляции, характеризующие тесноту связей сопротивле-

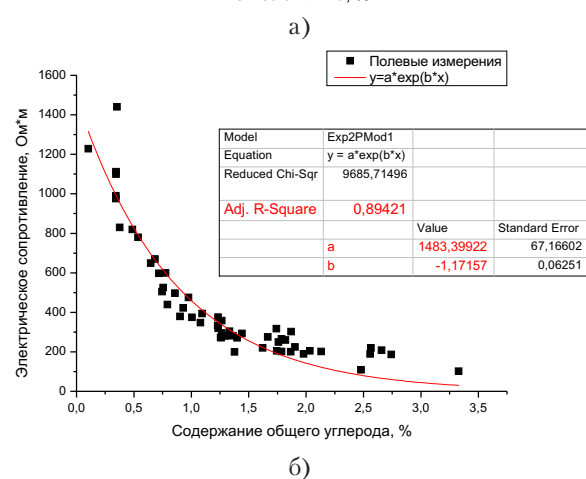
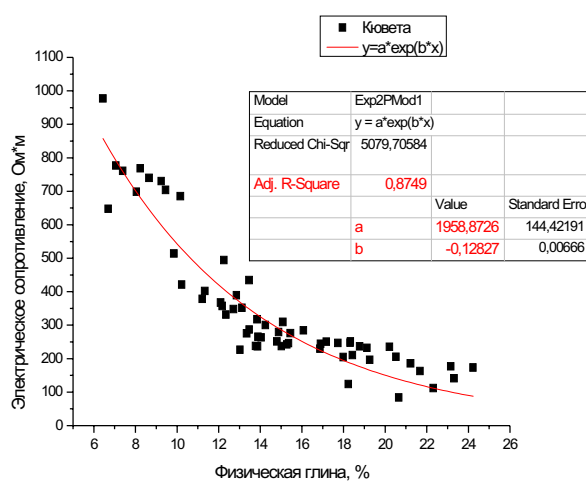


Рисунок 1. Зависимости электрического сопротивления от физической глины для сопротивления, измеренного в лаборатории (а) и в поле (б)

ния и содержания физглины достаточно высоки, тем не менее в случае измерений в поле он немного ниже, чем в лаборатории (рис. 1).

Полученные величины самого сопротивления, измеренные в лаборатории, довольно значительно отличаются от полевых значений. Особенно это заметно при низком содержании физглины – 6–8%, что, видимо, связано с различиями в контактах этих частиц в поле и в искусственно создаваемых в лаборатории средах, при формировании пастообразного состояния почвы.

Что касается зависимости сопротивления от углерода, то диапазон изменения общего углерода был также весьма широк от 0,5 до 3,5%, а в некоторых случаях достигал даже 5%, что соответствует почвам, как очень обедненным естественным, характерным для Клинско-Дмитровской гряды, так и весьма хорошо окультуренным плодородным [3–5].

Коэффициенты корреляции для экспоненциальных зависимостей сопротивления от общего содержания углерода еще выше, чем для физглины и достигают 0,91 для измерений в лаборатории (рис. 1а). В поле, где измерения проводились при разной, хотя и высокой влажности (диапазон от 15–17% до 26–31%, когда влияние ее на сопротивление не значительно), коэффициент корреляции сопротивления от углерода тоже выше, чем для физглины, но ниже, чем для лабораторных измерений. Соответственно, они равны 0,91 и 0,89, но признать различия между ними статистически достоверными, конечно, нельзя.

Третьей изучаемой зависимостью стала зависимость электрического сопротивления от ЕКО (рис. 3). Для данного типа почв электрическое сопротивление сильно зависит от ЕКО, также как и от выше рассмотренных факторов –

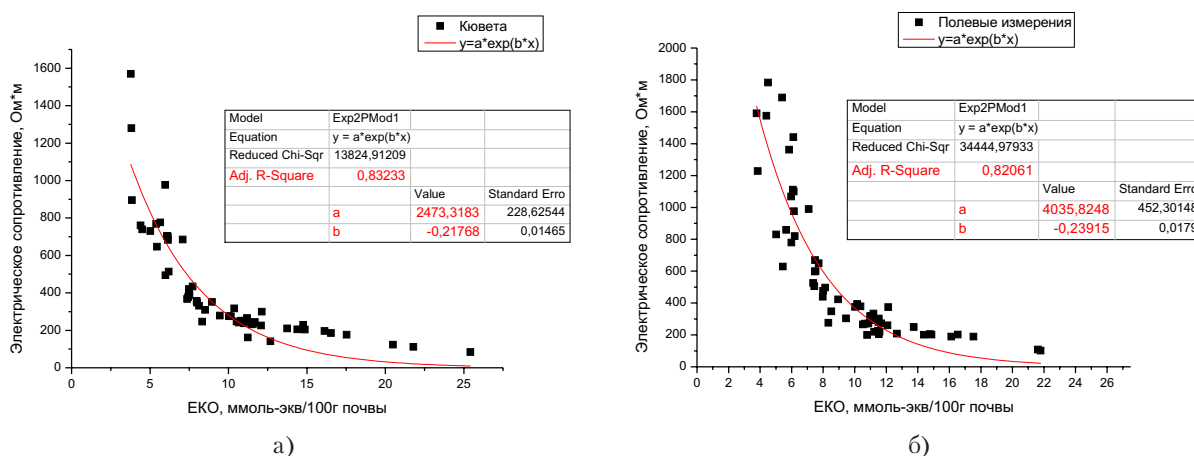


Рисунок 2. Зависимости электрического сопротивления от общего содержания углерода для величин сопротивления, измеренных в лаборатории (а) и в поле (б)

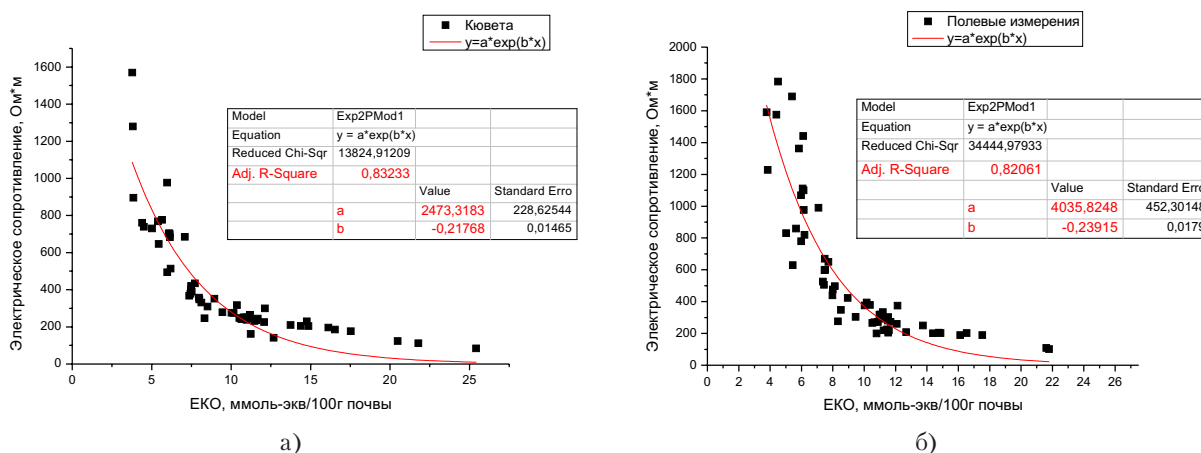


Рисунок 3. Зависимости электрического сопротивления от емкости катионного обмена (ЕКО) для величин сопротивления, измеренных в лаборатории (а) и в поле (б)

содержания физической глины и углерода (рис. 3).

Таким образом, экспоненты по каждому из проанализированных признаков очень близки друг к другу. Несомненно, разница между ними существует, прежде всего это связано с разницей в принципиальном способе измерения – в поле и лаборатории. В лаборатории измеряется так называемое «истинное» электрическое сопротивление, с использованием насыщенных водой почвенных паст с измененной по сравнению с полем упаковкой. В этом случае влияние влажности на электрическое сопротивление практически полностью отсутствует и значение электрического сопротивления связано в первую очередь с влияющими факторами – содержанием ФГ, углерода и ЕКО и коэффициенты корреляции выше.

Другой важный момент, который следует отметить, сравнивая зависимости между собой, это тот факт, что зависимости сопротивления от исследованных свойств почв, хотя и отличаются для каждого конкретного свойства, но при этом очень близки.

Сравним эти зависимости более детально, записав уравнения специально по мере убывания коэффициентов корреляции:

– для полевых методов

$\text{ЭС} = 1483 \exp(-1,17 * \text{С}) \text{ R}^2 = 0,89$, где С – содержание общего углерода, %; ЭС – значение электрического сопротивления, Ом*м;

$\text{ЭС} = 3659 \exp(-0,15 * \text{ФГ}) \text{ R}^2 = 0,85$, где ФГ – содержание общей глины, %;

$\text{ЭС} = 4036 \exp(-0,24 * \text{ЕКО}) \text{ R}^2 = 0,82$, где ЕКО – емкость катионного обмена, мэкв/100 г;

– для лабораторных методов

$\text{ЭС} = 886 \exp(-0,89 * \text{С}) \text{ R}^2 = 0,91$, где С – содержание общего углерода, %; ЭС – значение электрического сопротивления, Ом*м;

$\text{ЭС} = 1959 \exp(-0,13 * \text{ФГ}) \text{ R}^2 = 0,87$, где ФГ – содержание общей глины, %;

$\text{ЭС} = 2473 \exp(-0,22 * \text{ЕКО}) \text{ R}^2 = 0,83$, где ЕКО – емкость катионного обмена, мэкв/100 г.

Детальный анализ этих уравнений показывает, что:

1) четко прослеживаются более высокие коэффициенты корреляции для лабораторных измерений;

2) наибольшие коэффициенты корреляции наблюдаются в зависимостях от общего углерода. Уменьшение коэффициентов корреляции в зависимостях сопротивления от свойств про-

исходит в следующем ряду – содержания общего содержания гумуса больше физглины больше ЕКО;

3) В этом же ряду происходит увеличение коэффициентов при экспоненте «А» в лабораторных измерениях и уменьшение в полевых. Этот коэффициент свидетельствует о величинах измеренных сопротивлений при минимальной выраженности признака.

Все это характеризует отличия и особенности полученных экспоненциальных кривых, и хотя эти различия между ними статистически недостоверны, но отражают тонкие их особенности в крутизне и степени нарастания сопротивления при изменении признака.

Заметим также, что в более ранних наших исследованиях взаимосвязей электрического сопротивления от самых разных свойств почв, тоже были получены подобные экспоненциальные закономерности от ряда свойств почв, хотя столь разительно рельефных и четких зависимостей, как сейчас, получено не было [6, 7]. Повидимому, причина крылась в значительно меньших диапазонах изменения признаков, от которых искались зависимости.

В заключение заметим, что еще более высокие значения корреляции (выше 0,82–0,91) для экспоненциальных или других видов зависимостей сопротивления от исследованных свойств почв, получить, видимо, сложно или даже невозможно, что также свидетельствует в пользу правильности выбранного экспоненциального вида зависимостей, хотя, как известно, статистически доказать правильность выбранного вида зависимости нельзя.

Полученные результаты позволяют научно обоснованно рекомендовать методы электрофизики, как полевые, так и лабораторные, в практике почвенных исследований для решения различных задач.

В первую очередь полученные результаты могут быть полезны при изучении топографии распределения свойств почв в пределах поля, что необходимо при комплексном почвенно-ландшафтном обследовании, проектировании агротехнологий, составлении электронных почвенных карт, карт полей севооборотов, автоматизации различных приемов растениеводства и других вопросов по разработке точного и ландшафтно-адаптивного земледелия.

В ряде случаев использование этих зависимостей может помочь в оценке некоторых показателей окультуренности некоторых антропогенно-преобразованных легких почв агроландшафтов гумидной зоны.

Выводы

1. Электрическое сопротивление легких антропогенно-преобразованных почв агроландшафтов гумидной зоны при высокой влажности (более 1,5 МГ) в основном зависит от трех базовых свойств почв – гранулометрического состава (физглины), содержания общего углерода и емкости катионного обмена.

2. Выявлено, что эти зависимости экспоненциального вида $y = a \cdot \exp(-b \cdot x)$, где y – электрическое сопротивление, Ом*м; x – любое из вышеуказанных свойств.

3. Установлено, что коэффициенты корреляции между величинами удельного электрического сопротивления физической глиной, емкостью катионного обмена и гумусом, находятся в пределах от 0,82 до 0,91:

а) для значений электрического сопротивления, измеряемого в полевых условиях без нарушения сложения почвы; получены уравнения:

$$\begin{cases} \text{ЭС} = 1483 \exp(-1,17 * \text{С}) & R2 = 0,89 \\ \text{ЭС} = 3659 \exp(-0,15 * \text{ФГ}) & R2 = 0,85 \\ \text{ЭС} = 4036 \exp(-0,24 * \text{ЕКО}) & R2 = 0,82 \end{cases}$$

б) для электрического сопротивления, измеряемого в лаборатории для почвенных образцов в пастообразном состоянии, получены следующие уравнения:

$$\begin{cases} \text{ЭС} = 886 \exp(-0,89 * \text{С}) & R2 = 0,91 \\ \text{ЭС} = 1959 \exp(-0,13 * \text{ФГ}) & R2 = 0,87 \\ \text{ЭС} = 2473 \exp(-0,22 * \text{ЕКО}) & R2 = 0,83 \end{cases}$$

где ЭС – удельное электрическое сопротивление, Ом*м;

С – содержание углерода, %;

ФГ – содержание физической глины, %;

ЕКО – емкость катионного обмена, мэкв/100 г.

4. Полученные зависимости сопротивления от грансостава, общего углерода и ЕКО могут быть использованы при оценке этих показателей как показателей степени окультуренности почв легкого гранулометрического состава; при изучении топографии распределения этих свойств в пределах поля; при комплексном детальном и крупномасштабном почвенно-ландшафтном обследовании, необходимом для разработки точного и ландшафтно-адаптивного земледелия.

7.07.2012

Список литературы:

1. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1986.
2. Воробьева, Л.А. Химический анализ почв: учебник. – М.: Изд-во МГУ, 1998.
3. Иванов И.А., Иванов А.И., Цыганова Н.А. Изменение свойств подзолистых и дерново-подзолистых почв легкого гранулометрического состава при окультуривании // Почвоведение. – 2004. – №4. – С. 489 – 499.
4. Левин, Ф.И. Окультурирование дерново-подзолистых почв / Ф.И. Левин. – М.: Колос, 1972. – 264 с.
5. Никитин, Б.А. Окультурирование пахотных почв Нечерноземья и регулирование их плодородия / Б.А. Никитин. – Л.: Агропромиздат, 1986. – 280 с.
6. Поздняков, А.И. Полевая электрофизика почв. – М.: МАИК «НАУКА/ИНТЕРПЕРИОДИКА», 2001.
7. Поздняков А.И., Ковалев Н.Г., Позднякова А.Д. Электрофизика в почвоведении, мелиорации, земледелии. – Москва-Тверь: Чудо, 2002.
8. Поздняков А.И., Елисеев П.И., Русаков А.В. Электрическое сопротивление как возможный показатель окультуренности пахотных супесчаных почв гумидной зоны // Вестник МГУ. Серия почвоведение. – 2012. – №2. – С. 78–85.
9. Сапожников, А.П. Состояние почвенного покрова как основа кадастровой оценки земель // Почвоведение: история, социология, методология. Памяти основателя теоретического почвоведения В.В. Докучаева / Отв. ред. В.Н. Кудеяров, И.В. Иванов. – М.: Наука, 2005. – С. 379–385.
10. Сдобников, С.С. Улучшать дерново-подзолистые почвы / С.С. Сдобников, А.Н. Ерошенко, Л.Н. Агарков // Химизация сельского хозяйства. – 1989. – №10. – С. 31–33.
11. Цыганова, Н.А. Изменение кислотно-основного состояния подзолистых и дерново-подзолистых почв на песчаных породах при окультуривании // Аграрная наука. – 2007. – №4. – С. 9–11.
12. Хмелевской, В.К. Курс электроразведки. – М.: Изд-во Московского университета, 1985. – Ч. 1. – 285 с.
13. Шейн, Е.В. Курс физики почв. – М.: Изд-во Московского университета, 2005. – 430 с.

Сведения об авторах:

Поздняков А.И., профессор кафедры физики и мелиорации почв Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, доктор биологических наук
e-mail: antpozd@bk.ru

Елисеев Павел Иванович, аспирант кафедры физики и мелиорации почв Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
e-mail: eliseeff@gmail.com