

DOI:10.17308/978-5-9273-3692-0-2023-26-29

ГРАНИЦА ЛАНДШАФТОВ – ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВЫЯВЛЕНИЮ**LANDSCAPE BOUNDARY - A GEOPHYSICAL APPROACH TO IDENTIFY****Сысуев В.В.¹, Матасов В.М.², Бричева С.С.¹, Бобачев А.А.¹, МIRONENKO И.В.¹, Федин А.В.³, Золотая Л.А.¹, Роганов С.Б.¹**
Sysuev V.V.¹, Matasov V.M.², Bricheva S.S.¹, Bobachev A.A.¹, Mironenko I.V.¹, Fedin A.V.³, Zolotaya L.A.¹ and Roganov S.B.¹

e-mail: v.v.syss@mail.ru

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия²Российский университет дружбы народов, Москва, Россия³Институт географии РАН, Москва¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia²RUDN University, Moscow, Russia³Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

Аннотация. Применение геофизических методов электротомографии и георадиолокации позволило точно установить первоначальную литологическую границу и переходную зону двух смежных ландшафтов Полесского типа.

Abstract. The combined use of electrical resistivity tomography and ground-penetrating radar made it possible to determine the exact initial lithologic boundary and influence zone of two neighboring Polesian-type landscapes.

Ключевые слова: границы ландшафтов, георадиолокация, электротомография, Мещера.

Keywords: boundaries of landscapes, ground-penetrating radar, electrical resistivity tomography, Meshchorya.

Введение. Литолого-геологическое строение является одним из главных факторов дифференциации ландшафтов, поэтому применение геофизических методов весьма перспективно для выявления или уточнения границ структур разного порядка. Например, в работе [4] продемонстрирована возможность выделения разномасштабных ландшафтных структур методом георадиолокации. Так, площадная съемка в засушливый сезон на частоте 250 МГц выявила под покровными суглинками мощностью около 1 м линзу флювиогляциальных песков, граница которой является границей урочища ложбины стока ледниковых вод в ландшафте вторично-моренной равнины. Однако точность выделения структур методом георадиолокации сильно зависит от скорости затухания сигнала и, соответственно, от гранулометрического состава и влажности почв [7]. Даже маломощный слой суглинков или глин ослабляет сигнал настолько, что различить полезные отражения на радарограмме ниже этого слоя невозможно. В таких случаях необходимо прибегать к комплексированию с другими геофизическими методами, первым из которых является электротомография. В связи с этим в работе поставлена задача выявить границу литологических комплексов, являющей подповерхностной границей двух ландшафтов с помощью воспроизводимых геофизических методов - т. е. задача верифицировать и корректировать установленную ранее границу между двумя ландшафтами методами комплекса электротомографии и георадарного профилирования, дополненного бурением.

Объекты и методы. Объекты исследования находятся на учебно-исследовательской полевой станции Лесуново географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, расположенной на юго-востоке Мещёрской низменности в Рязанской области. Территория относится к Полесскому типу ландшафтов, где в качестве литогенной основы преобладают слои флювиогляциальных отложений днепромсковской ледниковой эпохи, подстилаемых моренными отложениями донского возраста. Ландшафтное картирование проведено в 1970-х годах на основе топографической съемки масштаба 1:2000, аэрофотосъемки, а также серии описаний почв и редких скважин. Границы между ландшафтами были установлены ранее по ландшафтным и геоморфологическим признакам [1, 2].

Исследование проведено на залежном поле на границе между Тумским моренно-водноледниковым и Гусевско-Куршинским долинно-зандровым ландшафтами. В результате интенсивной сельскохозяйственной деятельности эту границу очень трудно определить визуально. Для её корректировки применены методы георадиолокации и электротомографии на трех профилях, ориентированных поперек установленной границы ландшафтов. Для верификации геофизических данных были описаны почвы через каждые 25 метров и скважины (до 5 м) в точках вблизи предполагаемой границы. Ориентация профилей вдоль линий тока позволила проанализировать латеральные изменения ландшафтов, а также изменения вертикальной структуры осадочных пород, которая интерпретировалась по данным георадара, электротомографии и ограниченными скважинами. Полученные результаты объединены для анализа ландшафтной границы.

Георадиолокация проведена с использованием импульсного радара ОКО-2 с антенным блоком 250 МГц (Геотех, Россия) и радара Python-3 с антеннами 50 и 100 МГц (Radar Systems, Inc., Латвия). Такое сочетание частот дало глубину до 8 м и позволило сравнить результаты с данными электротомографии и описаниями скважин. Разрешающая способность 15 см для антенного блока 250 МГц и 30–60 см для блоков 100 и 50 МГц. Радарограммы обрабатывались с помощью программ Prism2.7 и Radexplorer1.42, применялись процедуры автоматической регулировки усиления, полосовой фильтрации, и топографической коррекции. Скорость электромагнитных волн определена по гиперболическим отражениям на радарограммах, она составила в среднем 10,8 см/нс. Было заложено три профиля в крест

ландшафтной границы, общей длиной около 3000 м. При интерпретации радарограмм используем термины «георадарный комплекс» и «георадарная фация» (по Старовойтов, 2008, стр. 35).

Электротомография проведена с помощью 10 канальной станции Syscal Pro Switch (IRIS Instruments, Франция). Длина одной расстановки - 71 метр (72 электрода с шагом 1 метр). Перекрытие между расстановками 36 метров (половина расстановки). Общая длина профилей составила 531 метр. При работе использовали следующие электроразведочные установки: комбинированная трехэлектродная установка Шлюмберже и дипольная осевая. Средняя плотность наблюдений - 70 измерений на метр профиля. Такая методика считается оптимальной при электротомографических исследованиях. Глубина исследования - более 20 м. Комбинация массивов: прямой и обратный массив "поль - диполь", и массив "диполь - диполь". 2D инверсия данных электротомографии выполнена с помощью программного обеспечения RES2DINV (Geotomo Software, Малайзия). Среднеквадратичная ошибка двумерного подбора составила менее 1%. Поиск решения проводится в рамках гладких моделей, это приводит к появлению плавных переходов удельного сопротивления между различными литологическими блоками, даже при наличии контрастных границ [6].

Полученные результаты. Согласно ландшафтной карте, составленной И. И. Мамай [2], на профиле в направлении с юго-запада на северо-восток выделено четыре ПТК: вершины моренного холма, пологого склона, термокарстовой депрессии, долинно-зандровой равнины (рис. 1А). Соответствие ПТК основным элементам рельефа обусловило хорошую корреляцию между геофизическими и скважинными данными и позволило интерпретировать данные геофизики.

Вершинная поверхность моренного холма моренного холма (0 ÷ 118 м профиля). По данным почвенных описаний суглинистые моренные отложения покрыты тонкими слоями супеси. Это отражает и радарограмма, полученная на частоте 250 МГц (рис. 1Б). На ней наблюдается гладкая волновая картина без заметных отражений до глубины 1 м. На глубинах 1–2,5 м появляется отражение, сформированное рядом гипербола дифракции. Под ними амплитуда отражения резко падает. Данные георадиолокации на более низкой частоте (Рис. 1В) показывают аналогичную картину, обобщенную за счет уменьшения мелкомасштабных аномалий в силу низкой разрешающей способности. Значительная часть профиля электротомографии отмечает на глубинах более 1,5–2 м зону с низким сопротивлением ($\rho < 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), покрытую сверху тонким слоем отложений с сопротивлением выше 300 Ом·м (рис. 1Г). Таким образом, верхняя часть разреза может быть интерпретирована как тонкий (0–0,5 м) супесчаный слой, подстилаемый снизу глинисто-суглинистыми отложениями. Наблюдающиеся на радарограммах в нижнем слое дифракционные гипербола свидетельствуют о присутствии гальки и валунов, широко распространенных в моренах. Моренные суглинки являются водоупором и над ними формируются грунтовые воды, в результате чего на вершине холма формируются дерново-подзолистые глееватые почвы. Увлажненные моренные суглинки резко снижают глубинность георадиолокации, а электротомография фиксирует здесь зону низкого удельного сопротивления.

Пологий склон расположен на профиле от 115 до 200 м (рис. 1А). В скважине С3 было описано пять литологических слоев. Самый верхний слой 1 (0,3–1,9 м) состоит из супесчаных отложений с прослоями суглинков и перекрывает суглинки слоя 2 (1,9–2,95 м) с резкой границей. Слой 3 (2,95–3,7 м) состоит из влажного алевритового песка. Он подчеркивается тонким (0,2 м) легкосуглинистым слоем 4. Самый нижний слой 5 (глубина 3,9–5 м) состоит из гравелистого суглинка с обломками до 1–2 см в диаметре. Эти отложения, скорее всего, соответствуют флювиальным переработанным отложениям моренной гряды. Радарограммы на 250 МГц выявляют слоистую подповерхностную структуру с высоким разрешением: отражения на 2 и 3 м (рис. 1Б) дают несколько георадарных фаций, потенциально соответствующих флювиальным переработанным отложениям. На радарограмме 50 МГц видно регулярное субгоризонтальное отражение от моренных отложений, расположенных здесь на глубине в среднем 3 м (рис. 1В). Относительно высокие амплитуды отражений вызваны уровнем грунтовых вод над поверхностью водоупорной морены. Это обеспечивает и низкие значения удельного сопротивления на этом участке - электротомография показывает ту же самую границу на глубине 3–3,5 м в виде зоны низкого сопротивления. Верхняя часть профиля электротомографии характеризуется стратифицированным распределением удельного сопротивления 300–700 Ом·м (рис. 1Г). Геофизические результаты соответствуют данным скважин и отражают изменения гранулометрии и влажности слоев песка и суглинка (рис. 1Д). Глубина проникновения георадара вместе со значениями удельного сопротивления увеличивается вниз по склону на северо-восток, что указывает на постепенное увеличение мощности песчаных (флювиогляциальных) отложений над моренными суглинками. Это подтверждается увеличением удельного электрического сопротивления в этом слое.

Термокарстовая западина выражена в рельефе в виде эллиптического понижения. По данным скважины С2 она заполнена легким опесчаненным суглинком, подстилаемым слоями песчаных суглинков и песков. На радарограмме 250 МГц между 230 и 270 м профиля четко выделяется блюдцеобразное понижение глубиной 1,5–2 м (рис. 1Б). Такая структура западины также видна и на профиле 50 МГц. Маркирующие кровлю морены псевдогоризонтальные отражения здесь фиксируются на глубине 5–6 м (рис. 1В). Форма западины предполагает ее эрозионное происхождение. На профиле электротомографии западина идентифицируется по резкому изменению удельного сопротивления верхнего слоя: его значения уменьшаются с 1000 Ом·м в приповерхностном слое до 300 и менее Ом·м на глубинах

1,5–2 м (рис. 1Г). Различия в удельном сопротивлении в пределах довольно однородной верхней части разреза обусловлены повышенной влажностью за счет склонового стока поверхностных вод.

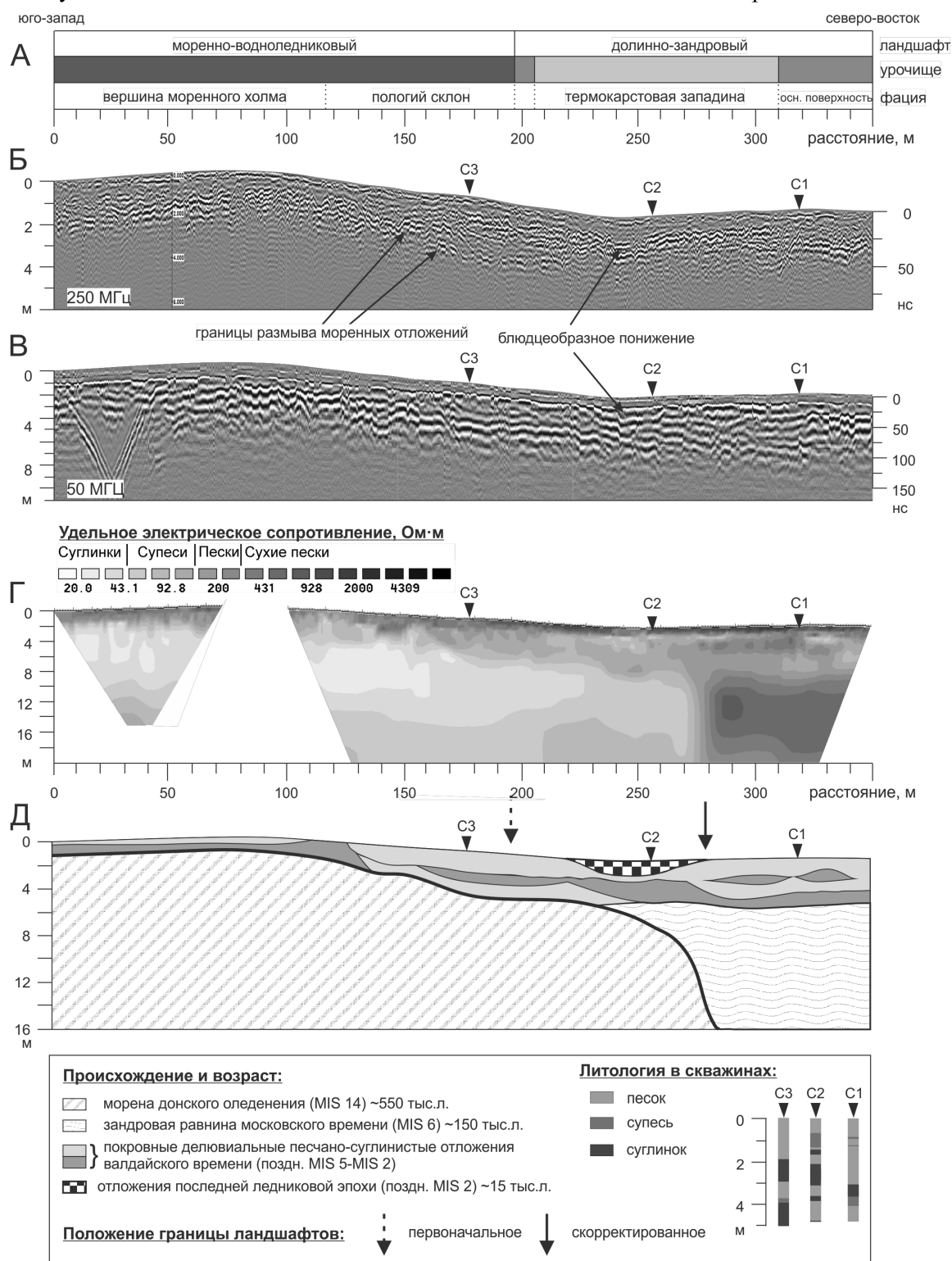


Рис.1. Структура ландшафтов по длине профиля (А) и результаты геофизических исследований методом георадиолокации на частотах 250 МГц (Б) и 50 МГц (В); методом электротомографии (Г); интегрированный литологический разрез (Д).

Соответственно, в заболачивающейся западине формируются подзолисто-глеевые и торфянисто-глеевые почвы. В горизонтальном направлении к северо-востоку с отметки профиля 280 м, на глубинах более 7 м происходит резкое изменение удельного сопротивления: его значения увеличиваются на порядок от <100 Ом·м до 1000 Ом·м (рис. 1Г). Оценить угол наклона по данным электротомографии невозможно, однако очевидно, что причиной контраста удельного сопротивления является субверти-

кальная литологическая граница. Отложения с высоким сопротивлением преобладают к северо-востоку от границы, а отложения с низким сопротивлением - к юго-западу (рис. 1Д).

Долинно-зандровая равнина (310–350 м). Мощность песчаных отложений увеличивается к северо-восточной части территории, как видно из скважины С1, где выявлены пески до 3,5 м. Затухание электромагнитных волн в этой части профиля минимально, субгоризонтальные отражения на радарограмме 50 МГц обнаруживаются до глубины 7 м (рис. 1В). По сравнению с кровлей моренных отложений в начале профиля, эти отражения имеют меньшую амплитуду. Данные электротомографии показывают, что на глубине ≥ 10 м расположены отложения с высоким удельным сопротивлением $\rho > 700$ Ом·м. Этот горизонт не был достигнут ни в одной из скважин. Он перекрыт 3–4 м отложений с низким и средним сопротивлением ($\rho = 100\div 200$ Ом·м), представляющими собой слоистые влажные пески и суглинки.

Закключение. Исходная граница между моренным и зандровым ландшафтами определяется субвертикальным контактом глинистых моренных отложений и песчаных отложений на глубине ≥ 7 метров. Эта граница видна на профилях электротомографии, и менее очевидна на радарограммах из-за высокого затухания волн в суглинках. Таким образом, предлагаемое местоположение границы ландшафтов находится в 70 м к северо-востоку от ранее установленной классическим ландшафтным методом. Георадиолокация и электротомография доказали ценность при идентификации литологии, имеющей решающее значение для установления границ ландшафтов. Радарограммы коррелируют с электротомографией и подтверждаются данными бурения. Первоначальная литологическая граница перекрыта переходными ПТК более низкого ранга, границы которых, могут быть выделены по данным георадиолокации.

На основании полученных данных, дополненных картами оледенений [5], можно предположить следующую геоморфологическую историю этой территории (рис. 1Е). Моренный холм был сформирован в результате деятельности ледника во время Донской ледниковой эпохи (MIS 14). Позднее, во время московского оледенения (MIS 6), сформировалась долинно-зандровая равнина. В Валдайскую ледниковую эпоху (MIS 5-MIS 2) граница между ними была перекрыта эоловыми и склоново-намывными отложениями. Термокарстовая западина – самый молодой элемент рельефа, заложенный в позднеледниковье (конец MIS 2) [3]. На все эти формы наложились процессы эрозии в период интенсивной сельскохозяйственной деятельности человека.

Литература

1. Асеев А.А., Веденская И.Е. (1962) Развитие рельефа мешерской низменности. М.: Из-во АН СССР.
2. Мамай И.И. (2013) Закономерности проявления процессов в ландшафтах Мещёры. Ландшафтный сборник (Развитие идей Н.А. Солнцева в современном ландшафтоведении). Ред. И.И. Мамай. Москва – Смоленск, изд-во Ойкумена, с. 7–23.
3. Новенко Е.Ю., МIRONENKO И. В., КУПРИЯНОВ Д.А., МАТАСОВ В.М., БОБРОВСКИЙ М.В. (2019) Доаграрные ландшафты юго-восточной Мещёры: реконструкция по палеоэкологическим данным. География и природные ресурсы, № 2, с. 38–49.
4. Сысуев В.В. (2014) Георадарные исследования полимасштабных структур в ландшафтах центра Восточно-Европейской равнины. Вестник Московского университета. Серия 5: География, № 4, с. 26–33.
5. Astakhov V, Shkatova V, Zastrozhnov A, et al. (2016) Glaciomorphological Map of the Russian Federation. Quat Int 420: 4–14. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.09.024>
6. Dahlin T., Zhou B. (2004) A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. Geophysical Prospecting. 52, 5, p. 379–398.
7. Guillemoteau J., Bano M., Dujardin J.-R. (2012) Influence of grain size, shape and compaction on georadar waves: examples of aeolian dunes. Geophysical Journal International 190, Vol. 3, p. 1455–63.