

Геофизический подход к установлению ландшафтных границ

В. В. Сысуев¹✉, В. М. Матасов², С. С. Бричева^{1,3}

¹МГУ имени М. В. Ломоносова, Российская Федерация
(119991, Москва, Ленинские горы, 1)

²Аграрно-технологический институт РУДН, Российская Федерация
(117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 8, корп. 2)

³Институт географии РАН, Российская Федерация
(119017, Москва, Старомонетный переулок, дом 29, стр. 4)

Аннотация. Цель работы состоит в выявлении исходных литогенных ландшафтных границ разного ранга в условиях различной длительности формирования на примере конечно-моренной зоны Валдайского оледенения, вторично-моренной территории Московского оледенения и зоны распространения Донского оледенения.

Материалы и методы. Основными методами работы стали георадиолокация и электротомография, наряду с ландшафтным картографированием и профилированием.

Результаты и обсуждение. Комплексирование георадиолокации и электротомографии позволяет определить границы различных геологических образований и структур, а также положение уровня грунтовых вод. Благодаря совместному использованию геофизических методов удается получить как глубинное строение отложений до 20-30 метров, так и более высокое разрешение в верхней части разреза первых 3-5 метров. Разрешающая способность этих двух методов хорошо коррелирует с вертикальными границами ПТК и позволяет выделять их разные ранги – от фаций до ландшафтов. При этом важно учитывать условия при выполнении работ, поскольку геофизические параметры – электропроводность и диэлектрическая проницаемость – сильно зависят от влажности.

Выводы. Показаны возможность и необходимость установления ландшафтных границ разного ранга объективными цифровыми геофизическими методами.

Ключевые слова: ландшафтные границы, георадиолокация, электротомография.

Для цитирования: Сысуев В. В., Матасов В. М., Бричева С. С. Геофизический подход к установлению ландшафтных границ // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2024, № 1, с. 34-48. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2024/1/34-48>

ВВЕДЕНИЕ

Литологический (геологический) фундамент является главным фактором обособления природно-территориальной единицы ранга ландшафт, границы которого наиболее устойчивы, поскольку литогенные факторы наиболее консервативны. В процессе развития ландшафта могут возникать только определенные и ограниченные наборы как элементов ландшафта, так и его компонентов [11]. Выраженность ландшафтных границ зависит от времени обособления геосистемы – чем моложе территория, тем более четкие границы. Границы морфологических единиц (урочищ, фаций) более изменчивы. Урочища (простые, сложные), являющиеся основными единицами изучения и картирования ландшафта, обычно формируются на одной мезоформе рельефа, которая может изменяться в процессе развития. Наиболее изменчивы границы фаций (группы фаций). Чем длительнее развитие ландшафта, тем больше вероятность перекрытия (уничтожения) исходных литолого-геоморфологических границ под воздействием последующих структурообразующих процессов. Визу-

ально установить такие перекрытые границы ландшафта по косвенным признакам очень сложно.

Большая трудоемкость установления подробных геологических границ привела к практическому определению ландшафтных границ на основе, прежде всего, косвенных признаков – смены типов растительности, видов индикаторов, смены типов почв и т.д. К тому же с конца XX века стал доступен огромный массив дистанционных данных о состоянии поверхности Земли, а также разнообразные методы их обработки. Появилась возможность определять границы ландшафтных объектов *формальными статистическими методами* на основе данных дистанционного зондирования с обработкой в геоинформационных системах. Поскольку применение этих методов для установления границ ландшафтов имеет ряд неопределенностей, возникает необходимость создания правил (алгоритмов) объединения: 1) фаций/групп фаций – в урочища; 2) урочищ – в местности, а затем 3) местностей – в ландшафт и т.д. Первый уровень интегрирования относительно просто алгоритмируется, что позволяет получить достаточно достоверную ландшафтную структуру урв-

© Сысуев В. В., Матасов В. М., Бричева С. С., 2024.

✉ Сысуев Владислав Васильевич, e-mail: v.v.syss@mail.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

ня урочищ на основе морфометрических параметров рельефа [15]. Объединение урочищ уже сложнее – необходимо знать геоморфологическую структуру территории и задать число типов урочищ, которое входит в каждую местность. Интегрирование местностей в ландшафт еще более сложно – требуется точное указание геологических границ фундамента ландшафта. Таким образом, широко применяемое *выделение «ландшафтно-экологических границ» требует верификации*: во-первых, реальности их установления, а во-вторых – ранга границ с использованием пространственно-непрерывных воспроизводимых методов исследования литологического фундамента природно-территориального комплекса (ПТК).

Применение геофизических методов, которые позволяют получать информацию об отложениях вдоль непрерывных профилей и выявлять разнородные подповерхностные объекты, весьма перспективно для выявления литогенных ландшафтных границ разного порядка. Масштаб изучаемых геофизическими методами объектов может быть разным – от нескольких сантиметров (почвенные горизонты, строение стволов деревьев) до нескольких десятков метров (палеодолины, толщи многолетнемерзлых пород). К тому же модификация датчиков (антенных комплексов, электродов, и др.) и их положения в пространстве позволяет одним и тем же прибором измерять аномалии от разномасштабных природных объектов. Различия морфологического состава пород, их увлажнение и минерализация отражаются на электромагнитных параметрах – удельном электрическом сопротивлении (УЭС) и диэлектрической проницаемости, что позволяет эффективно применять методы георадиолокации, электропрофилирования и электротомографии.

Задачи, которые успешно решаются геофизическими методами, включают определение уровня грунтовых вод [21] и строения флювиогляциальных отложений [3, 12, 24], разделение почвенных горизонтов [7, 22, 23], выявление ослабленных зон вследствие оползания [16, 17] и др. Применение геофизики в ландшафтных исследованиях пока встречается редко. В работе [14] методом *георадиолокации* выделены разномасштабные ландшафтных структуры. В статье [20] демонстрируется выявление разномасштабных криогенных форм древнего рельефа при помощи геофизических методов георадиолокации и магниторазведки. Однако возможность выделения структур методом георадиолокации сильно зависит от скорости затухания сигнала и влияющих на него гранулометрического состава и влажности почв. Даже маломощный слой суглинков или глин ослабляет энергию сигнала настолько, что различить полезные отражения на радарограмме ниже этого слоя невозможно. Особенно трудно установить точные ландшафтные границы, если исходная литологическая граница перекрыта сверху новейшими отложениями тяжелого гранулометрического состава. Это характерно для ландшафтов с длительными периодами развития, переживших не один ледниковый период. В таких случаях целесообразно применять метод электротомографии [19].

Цель данной работы – показать возможности и ограничения установления исходных литогенных ландшафтных границ с помощью воспроизводимых количественных геофизических методов георадиолокации и электротомографии в условиях различной длительности формирования структуры ландшафтов.

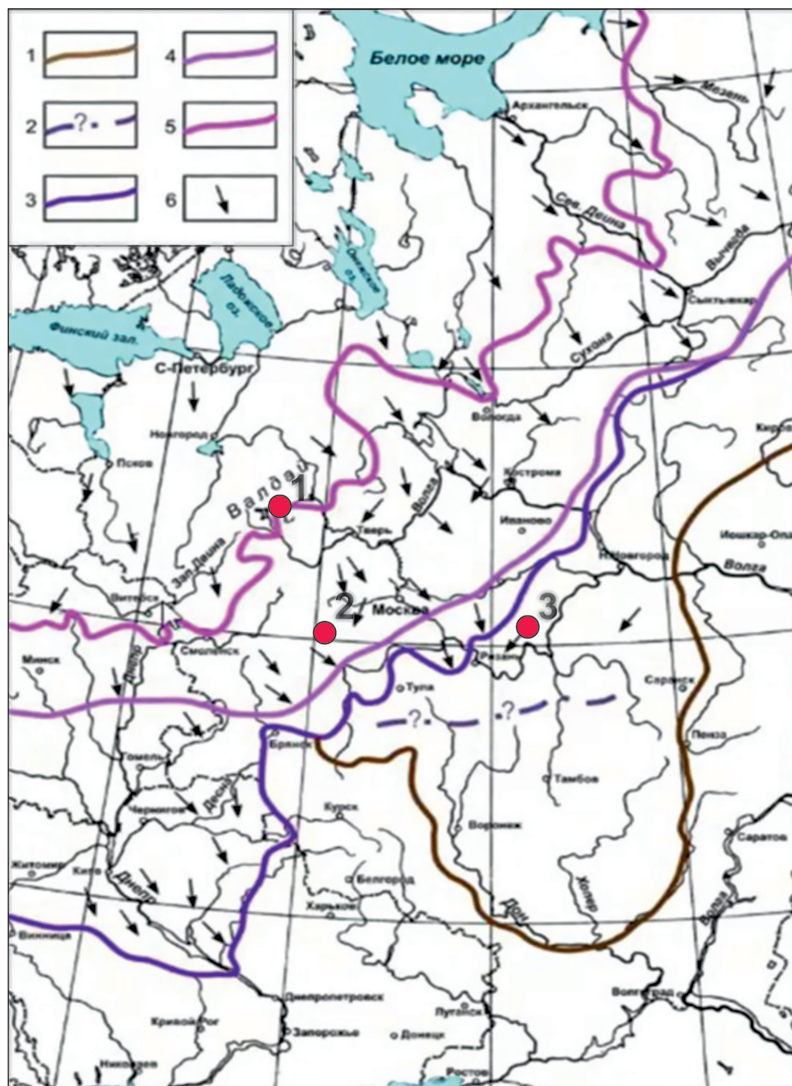
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследований выбраны участки разного возраста и геолого-геоморфологического строения (рис. 1): ландшафты молодого возраста Осташковской конечно-моренной зоны последнего Валдайского оледенения (1); вторично-моренные ландшафты Московского оледенения – урочища вторично-моренных ландшафтов Смоленско-Московской возвышенности (2); ландшафты распространения Донского оледенения – ландшафты Полесского типа Мещерской низменности (3). Причина выбора участков – изученность ландшафтов комплексом физико-географических методов [5, 8, 4, 9, 13].

Комплексные ландшафтные исследования проводились на объектах по стандартным методикам [6]. В НП «Валдайский» применялась методика ленточной перечислительной лесотаксации (320 площадок размером 20×20 м) вдоль ландшафтных трансект длиной около 5,5 км (рис. 26). В характерных точках применялось ручное бурение до глубины 3,0-4,0 м. На стационарах географического факультета МГУ ручное бурение проводилось до глубин 7,0-8,0 м. В полевых работах использовались топографические карты М 1:10000, данные съемки Landsat-7, а также планшеты лесотаксации.

Георадиолокация проведена в НП «Валдайский» с использованием импульсного радара ОКО-2 (ООО «Логис», Россия) и неэкранированной антенны Тритон с центральной частотой 100 МГц; на УНС Сагино применялся также ОКО-2 с блоками 250 МГц, 700 МГц. На УНБ Лесуново дополнительно применялся георадар Python-3 с антенной 100 МГц (Radar Systems, Inc., Латвия). Такое сочетание частот обеспечило высокую разрешающую способность (15 см для антенного блока 250 МГц и 30 см для блока 100 МГц) и достаточную глубинность исследования. Радарограммы обрабатывались с помощью программ Prism2.7, Radexplorer 1.42 и Geoscan32, применялись процедуры автоматической регулировки усиления, полосовой фильтрации и топографической коррекции. Скорость электромагнитных волн определяли по гиперболам дифракции, выявленным на радарограммах, отдельно для каждого объекта.

Электротомография проведена на УНБ Лесуново с помощью 10-канальной станции Syscal Pro Switch (IRIS Instruments, Франция). Длина одной расстановки 71 м (72 электрода с шагом 1 м). Общая длина линии профиля составила 531 м. При работе использовались следующие электроразведочные установки: комбинированная трехэлектродная установка Шлюмберже и дипольная осевая. Средняя плотность наблюдений – 70 измерений на метр профиля. Глубина исследования более 20 м. Двумерная инверсия данных электротомографии выполнена с помощью программного обеспе-



Условные обозначения границ: 1 – донского, 2 – окского, 3, 4 – московской и днепровской стадий московского оледенения, 5 – валдайского оледенения, 6 – направление ледниковых потоков. Обозначение участков исследования: 1 – Валдайская возвышенность, Национальный парк «Валдайский»; 2 – Смоленско-Московская возвышенность, Учебно-научная станция МГУ Сагино; 3 – Мещерская низменность, Учебно-научная база Лесуново

Рис. 1. Границы распространения покровных оледенений на Восточно-Европейской равнине [2] и расположение объектов исследования

[Fig. 1. Extent of the glaciated area in the East European Plain [2] and location of the study sites]

чения Res2DInv (Geotomo Software, Малайзия). Среднеквадратичная ошибка подбора составила менее 1%. Поиск решения проводится в рамках гладких моделей, что приводит к появлению плавных переходов УЭС между различными литологическими блоками.

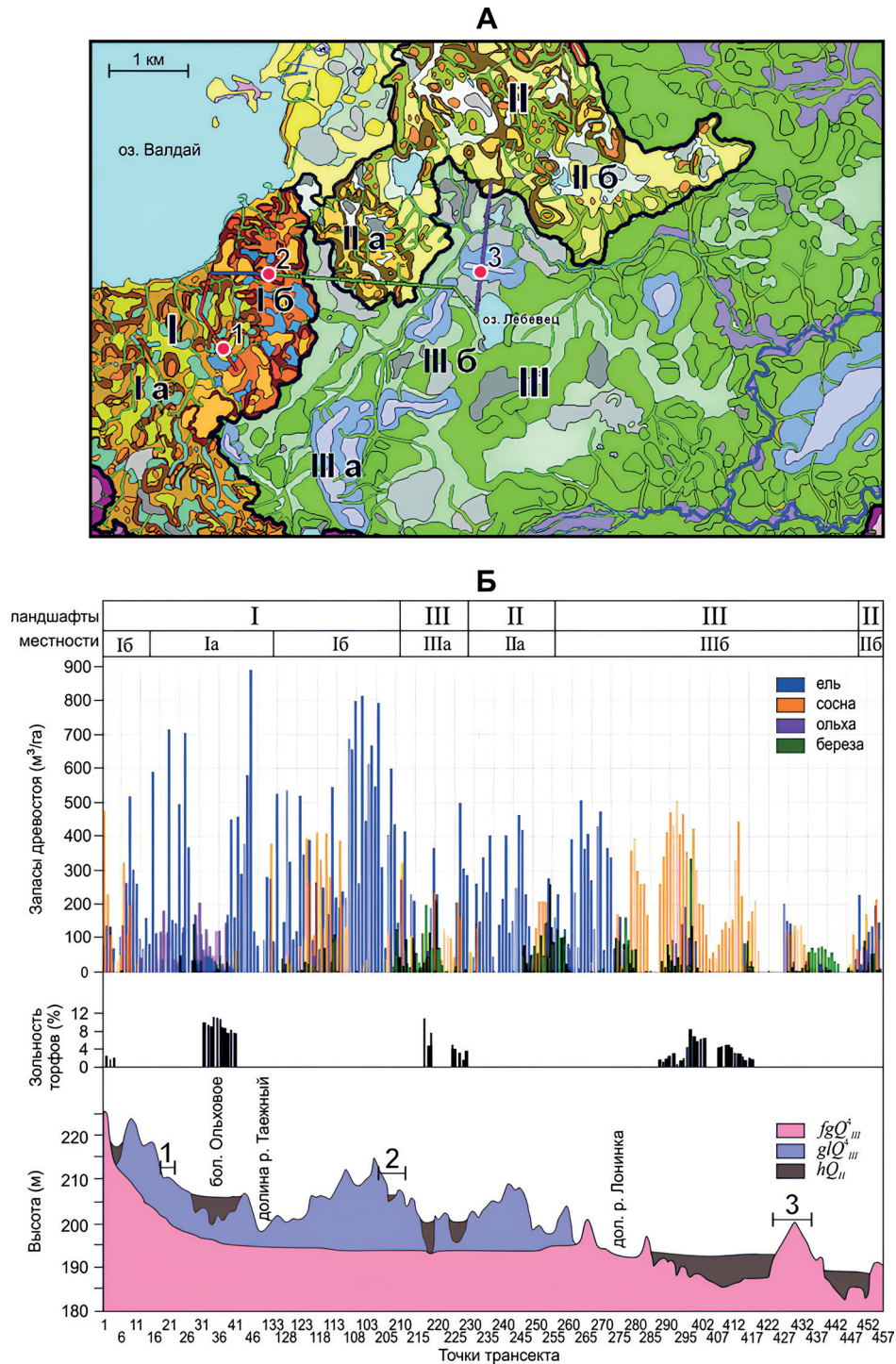
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Участок 1. Конечно-моренные ландшафты валдайской возвышенности

Краткая ландшафтная характеристика. Исследуемая территория входит в состав конечно-моренного пояса северо-запада Русской равнины, сформировавшегося в ходе последнего Валдайского оледенения. Здесь на сравнительно небольшом пространстве в пределах полосы шириной всего 50-70 км последовательно с северо-запада на юго-восток сменяются краевые образования че-

тырех стадий деградации оледенения: крестецкой – наиболее поздней, вепсовской, едровской и бологовской [10]. Каждый из стадиальных конечно-моренных комплексов окаймлен приледниковыми (водно- и озерно-ледниковыми) образованиями. После дегляциации все образования испытали воздействие ряда экзодинамических процессов (термокарст, криогенез, оторфовывание котловин, дефляция, карст и др.). Такое разнообразие рельефа и литологии обуславливает крайне высокую степень ландшафтно-го и биологического разнообразия.

Исследованная территория состоит из своеобразных ландшафтов, обусловленных литолого-геоморфологическими факторами (рис. 2): грядово-холмистая абради-рованная моренная равнина (1а, 1б); две разновидности камовых дельтовых равнин с характерной конусовидной



Условные обозначения: Красные пунсоны – объекты исследования методом георадиолокации: 1 – конечно-моренная гряда; 2 – камовый холм; 3 – песчаная гряда; объекты 4 и 5 расположены за пределами карты. Ландшафты: I – грядово-холмистая моренно-камовая равнина на средних карбонатных моренных суглинках; II – грядово-котловинно камово-озовая равнина на песчано-супесчаных отложениях; III – плоская озерно-водно-ледниковая равнина с грядами. Буквенные индексы – местности, см. в тексте. Отложения: glQ_{III}^i – моренные и камовые; fgQ_{III}^i – флювиогляциальные; hQ_{II} – торфяные.

Рис. 2. Схема ландшафтной структуры (А) и исследованного трансекта (Б) на Участке 1.
 [Fig. 2. Landscape map (A) and surveyed transect (B) at Site 1]

формой в плане (IIa, IIб). Для последнего ландшафта типичны цепочки узких озков, на которые нанизаны конусные дельты. Другую часть полигона занимает обширный ландшафт плоской озерно-ледниковой равнины (III), в

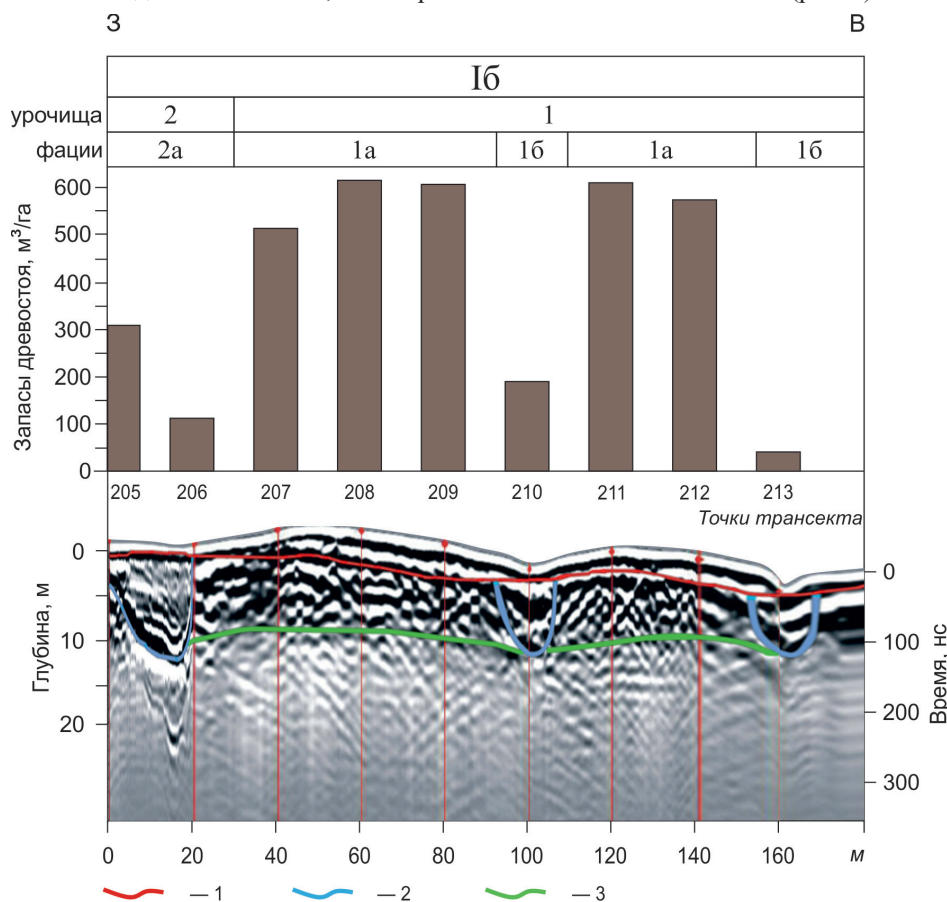
пределах которой на фоне однообразных заболоченных пространств возвышаются дюнные гряды с абрадированными вершинами и встречается ряд округлых озер явно термокарстового происхождения.

Результаты

Конечно-моренные гряды (объект 1) сложены валунными карбонатными среднесуглинистыми опесчанными конечно-моренными отложениями вепсовского ледникового яруса (glQ_{III}^4) Валдайского оледенения [9]. Конечная морена подстилается флювиогляциальными песками (fgQ_{III}^4), которые выходят на поверхность в пределах флювиогляциально-зандрового ландшафта. С поверхности суглинки перекрыты слоем маломощных покровных супесчаных образований, характерных для почв северо-западной части Европейской территории России. К вершинам и склонам моренных холмов приурочены дерново-палево-подзолистые почвы, на которых

произрастают высоко продуктивные ельники-кисличники и ельники разнотравно-кустарничковые с запасами древостоя на отдельных типах условий местообитания до 800 м³/га [13]. Георадарное профилирование конечно-моренных гряд (glQ_{III}^4) показало высокое затухание радиоволн – структура морен не была получена ни при одном режиме съемки. Выделена только приповерхностная структурная неоднородность до глубины 0,5 м, интерпретируемая как элювиальный горизонт почв.

Радарограмма **урочища камового холма** (объект 2) в ландшафте грядово-холмистой моренно-камовой равнины показывает строение кама, уровень грунтовых вод и заболоченные ложбины (рис. 3).



Условные обозначения: 1 – уровень грунтовых вод; 2 – палеомерзлотные трещины, унаследованные в виде заболоченных ложбин; 3 – подошва супесчаного каменистого «тела» кама
 Рис. 3. Объект 2, камовый холм с развитием термокарста: сопряженный профиль гидрогеологических условий (радарограмма 100 МГц, $\epsilon = 5$) и продуктивности древостоя.
 [Fig. 3. Object 2, kame hill with thermokarst formation: profile of the hydrogeological conditions (100 MHz GPR profile, $\epsilon = 5$) and stand productivity (m³/ha)]

Тело кама сложено супесью с включениями валунов и гравия, что отражается в характерной волновой картине с обилием гипербол дифракции. Урочище (2) заболоченной ложбины с мощностью торфа до 5 м характеризуются на радарограмме пониженной частотой сигнала и, в некоторых случаях, наличием кратных отражений (кажущаяся граница на глубине 4-6 м в начале профиля на рис. 3). Запасы древостоя и тип леса сопряжены с гидрогеологическими условиями и подчеркивают границы между урочищами и фациями местности Иб.

В **песчаной гряде** ландшафта озерно-водноледниковой равнины (объект 3, рис. 4) на радарограмме наблюдается характерная волновая картина песчаной слоистой толщи, наглядно показана мощность и структура отложений слабосортированных песков fgQ_{III}^4 . Четко выявляются границы гряды с торфом верхового болота и аллювием прадолины реки Лонинка. Определенный по радарограммам уровень грунтовых вод подтвержден бурением. Выявляется тесная связь уровня грунтовых вод (УГВ) и древостоя. На вершине холма

(фация 1а), где глубина залегания грунтовых вод 7-8 м, формируются лишайниковые сосняки-беломошники, с запасами древостоя порядка 200 м³/га. При оптимальном уровне грунтовых вод 2-4 м на склонах формируются чернично-брусничные сосняки с максимальным запасом 450 м³/га (фация 1б). В переувлажненных частях склонов – сфагновые сосняки с запасом 120-150 м³/га (фация 2а). В урочище верхового болота происходит резкая смена условий местообитаний, формируются сфагново-багульни-

ковые редкостойные сосняки, с запасами менее 100 м³/га. На радарограмме граница урочищ отмечается по контрастной смене вида волновой картины (отражений).

На радарограмме урочища крутосклонной **озовой гряды** fgQ_{III}^4 грядово-котловинно-озового ландшафта (объект 4) выделяется песчано-каменистое тело (рис. 5), направление и простираение слоистости и УГВ. Эта гряда очень ярко выражена в рельефе, местами превышает подножья на 20 м и имеет длину 10 км.

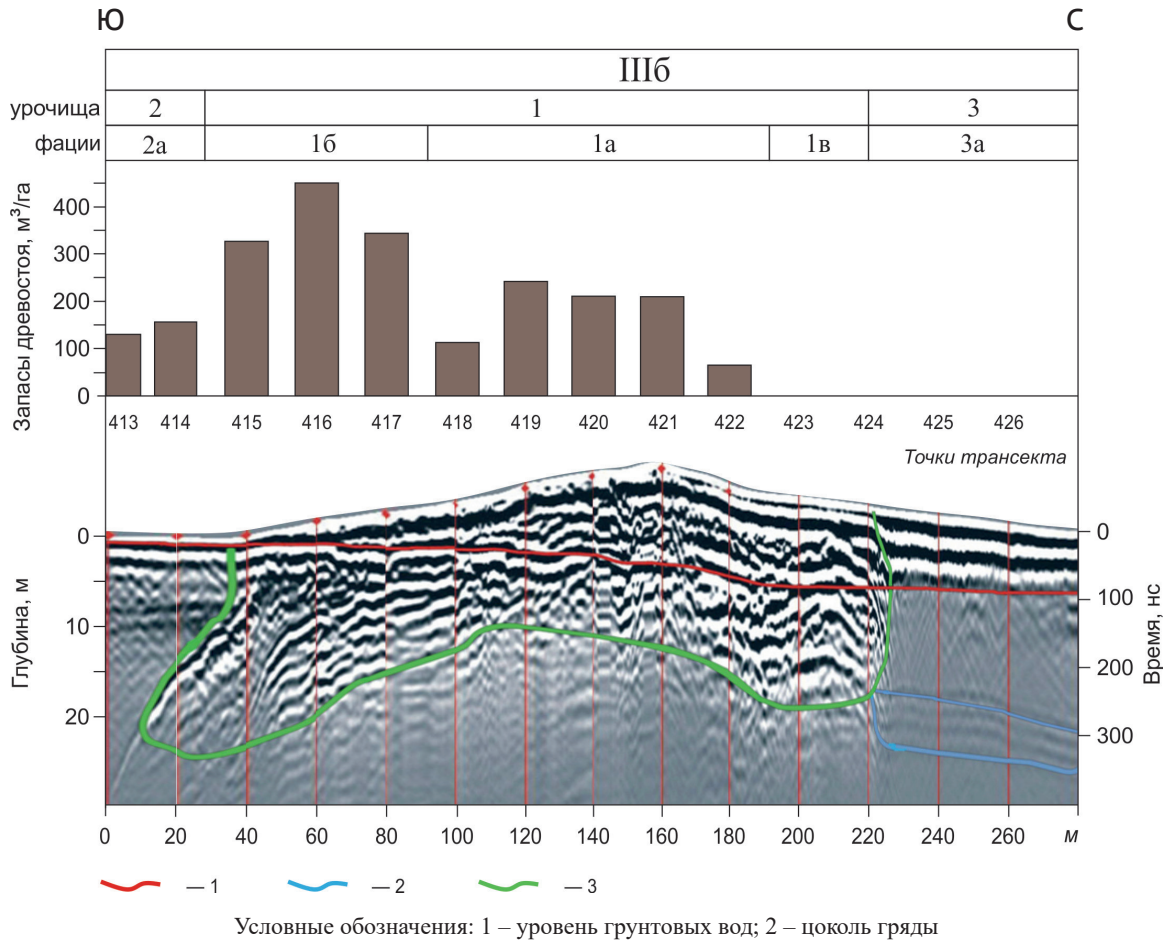


Рис. 5. Объект 4, озовая гряда: сопряженный профиль изменения литолого-гидрогеологических условий (радарограмма 100 МГц, $\epsilon = 5$) и запасов древостоя.

[Fig. 5. Object 4, Esker: profile of lithological and hydrogeological conditions (100 MHz GPR profile, $\epsilon = 5$) and stand productivity]

На вершине гряды грунтовые воды глубже 6 м, и там формируется елово-сосновый лес с максимальной высотой и запасами древостоя; на западном склоне, где УГВ подходит к поверхности, формируются глеевые дерново-подзолистые почвы, ель преобладает над сосной, появляется ольха, запасы древостоя уменьшаются. К восточному склону, покрытому сосново-мелколиственной с густым подлеском растительностью, примыкает верховое болото, на радарограмме четко видны литологические границы этих урочищ.

На урочище **верхового болота** «Обловское» (объект 5) с центрально-олиготрофным типом развития на радарограммах отчетливо выделяются 2 горизонта отложений торфа: верхний слабо разложившийся сфагновый торф

мощностью 2-2,5 м и нижний сильно разложившийся торф (рис. 6). Также прослеживается тонкий сапропелевый горизонт, подстилающий торф. Резко выделяющееся днище имеет множество неровностей, часть из которых возможно являются валунами и булыжниками, формирующими гиперболы дифракции. Две глубокие котловины (мощность торфа более 6 м) разделены продолжением озовой гряды fgQ_{III}^4 , проявляющейся на севере и юге болотного массива. Этим понижениям минерального дна соответствуют наиболее выпуклые, автономные фации болота с олиготрофной растительностью – сосново-пушицево-клюквенно-сфагновая ассоциация с подбелом и росянкой и самым угнетенным древостоем сосны высотой 4-6 м и запасом 20-40 м³/га. Между котловинами на

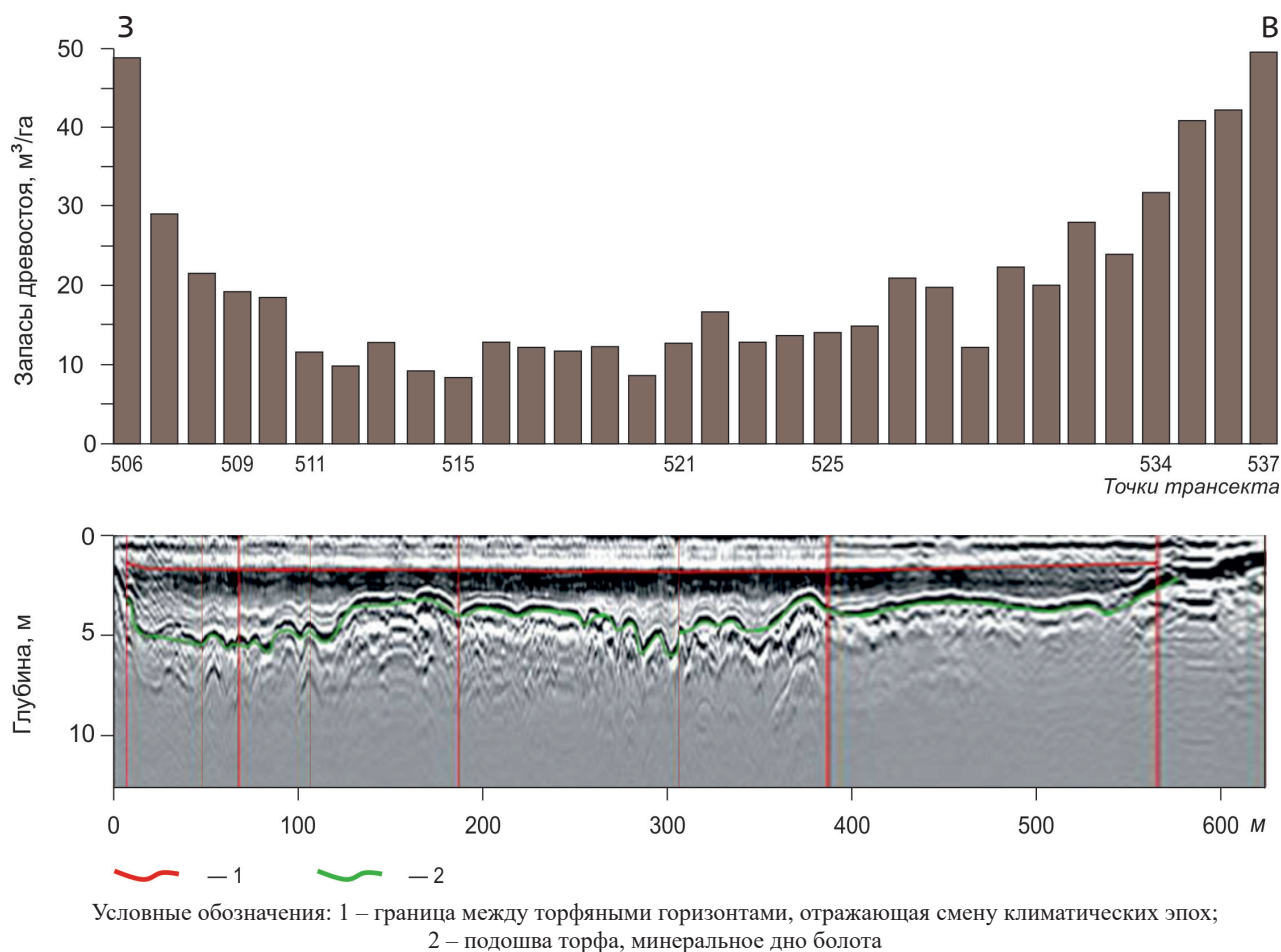


Рис. 6. Объект 5, верховое болото «Обловское»: сопряженный профиль гидрогеологических условий (радарограмма 100 МГц, $\epsilon = 45$) и запаса древостоя сосняка сфагнового [Fig. 6. Object 5, peat bog “Oblovskoye”: profile of the hydrogeological conditions (100 MHz GPR profile, $\epsilon = 45$) and the stand stock of sphagnum pine]

торфах мощностью менее 3 м формируются фации сосняков пушицево-сфагновых с миртом и кустарничками. Запас древостоя 60-80 м³/га, высота деревьев 6-10 м.

На окраинах болота на хорошо разложившихся маломощных торфах формируются фации сосново-кустарничковые сфагновые с тростником и сосново-голубично-сфагновые с багульником и черникой фации. Древостой достигает высоты 10-15 м, запасы – 100 м³/га.

Участок 2. Граница урочищ вторично-моренного верейско-можайского ландшафта, перекрытая делювиальными отложениями

Краткая ландшафтная характеристика. Участок расположен на территории УНС Сатино в средней части бассейна р. Протвы (Калужская область). В геоморфологическом отношении это краевая зона среднелейстоценового (московского) оледенения, которому принадлежит важная роль в формировании рельефа и дифференциации природно-территориальных комплексов [9]. Морена московского возраста *gQIIms* перекрыта покровными суглинками, однако ее роль как ландшафтообразующего фактора очень велика – залегая

на глубинах 1-3 м, она является водоупором и оказывает существенное влияние на водный режим почв и характер растительных сообществ. По-видимому, этот район покрывался ледником на очень короткое время в ранние стадии его развития. Позднее, когда ледник находился северо-западнее, территория представляла перигляциальную зону, где шло интенсивное выравнивание рельефа за счет, главным образом, криосолифлюкционных и делювиальных процессов. Флювиогляциальные отложения московского возраста встречаются внутри морены или перекрывают её в краевых частях, слагая поверхности долинных зандров и понижения ложбин стока талых ледниковых вод. Для последних характерно чередование песчано-галечных и суглинистых прослоев, свидетельствующих о неустойчивом характере водно-ледниковых потоков в пределах этих форм [9].

Участок работ – урочище «плоскодонная распаханная ложбина стока ледниковых вод» местности пологоволнистых вторичных моренных равнин – расположен на склоне консеквентной одиночной ложбины стока талых ледниковых вод, приуроченной к верховьям Сенюкской балки (рис. 7А). Участок детально изучен геоморфологически [5].

Заболачивание поверхностного типа обуславливают натежные воды и верховодка, в этом ареале развиты дерново-подзолистые грунтово-глеевые и глееватые почвы, хотя постоянные грунтовые воды лежат глубже 10 м. Летом ложбина высыхает, почвенные воды отступают на 3 м и глубже. Зимой мощность снежного покрова в понижениях достигает 80 см. С окружающих пашен после снеготаяния и ливней поступает много мелкозема, что приводит к заполнению ложбины.

К характеристике урочища можно добавить отсутствие визуальных признаков границы, за исключением незаметного перегиба склона на правом склоне ложбины. Сеть буровых профилей и разрезов также не позволяет точно установить границы урочища – геомор-

фологические границы на схеме на рисунке 7Б указаны как нечеткие. Уточнить границы урочища было решено при помощи георадарного профилирования в зоне перекрытой границы моренных и флювиогляциальных отложений. Предпосылками этого решения послужили два обстоятельства: 1) уменьшение мощности тяжелосуглинистых покровных суглинков и замещение их более легкими делювиальными суглинками вниз по склону ложбины; 2) просыхание ложбины в период межени на глубину не менее 3 м. Для работ была выбрана площадка вблизи геоморфологического профиля II-II по левому склону Сенокосной ложбины (см. рис. 7А). Съёмка проводилась конце июля 2010 года в режиме профилирования галсами с шагом 2 м. Ширина площадки составляла 20 м, а длина – 150 м.

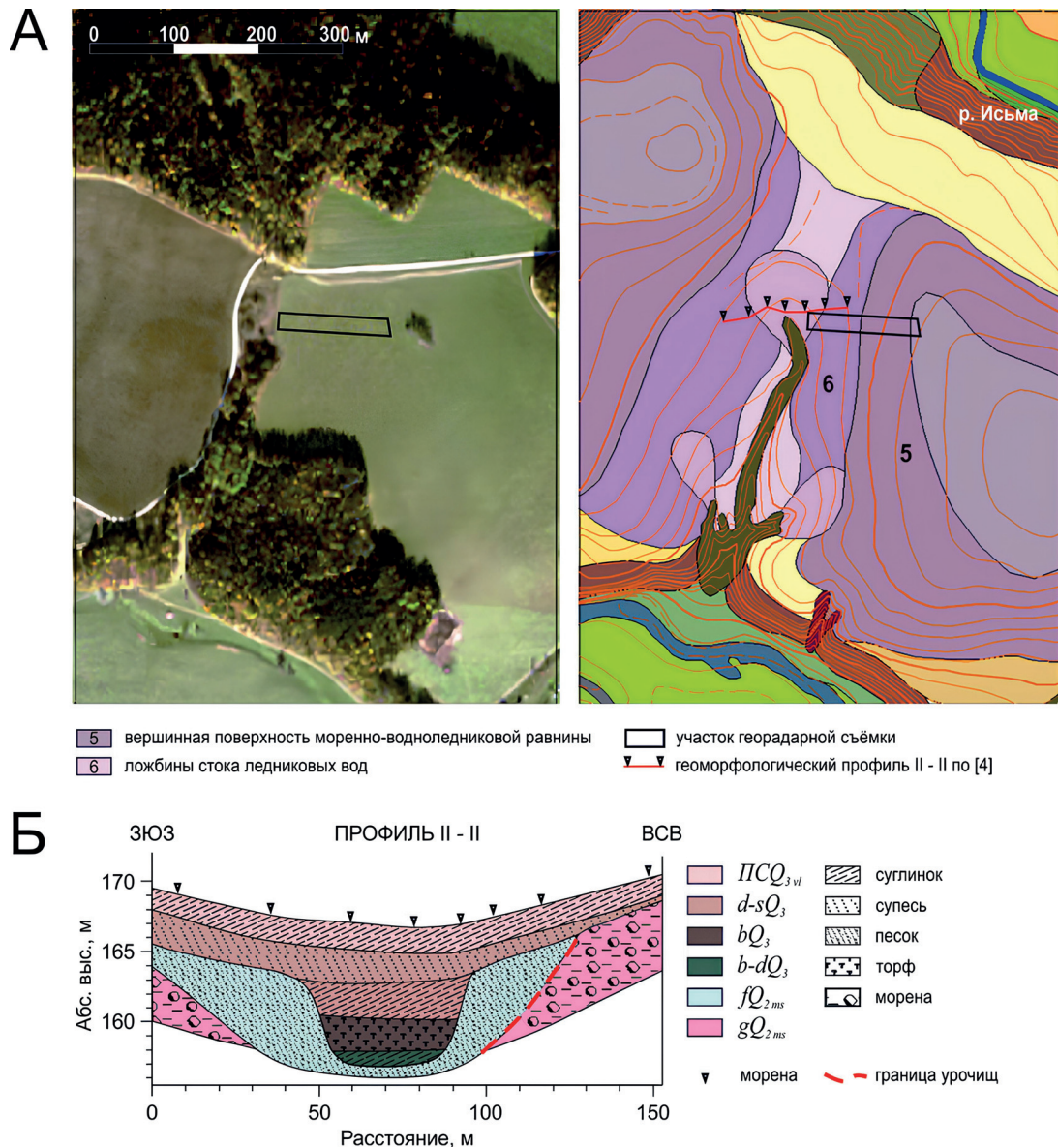
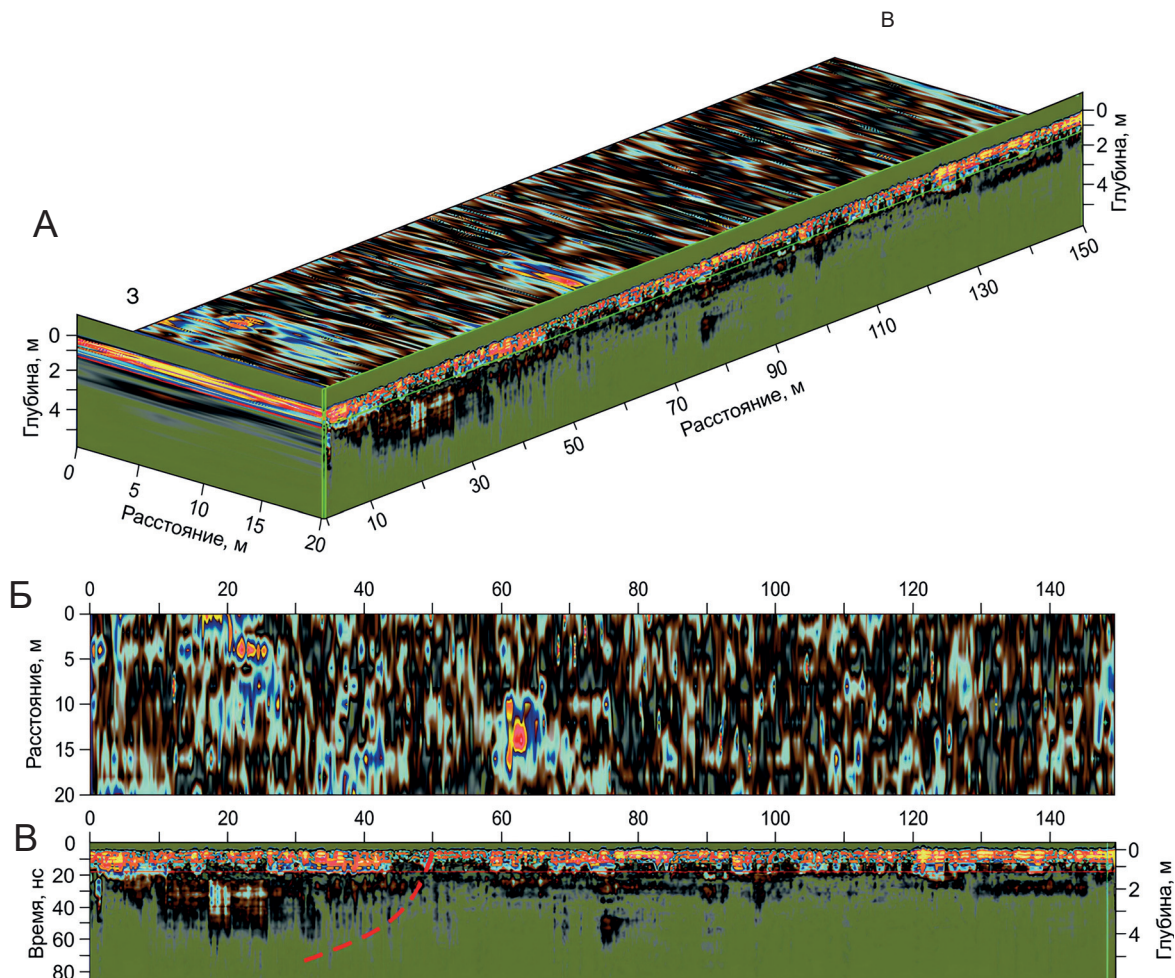


Рис. 7 А. Космический снимок и фрагмент ландшафтной карты участка работ на УНС Сатино на основе [9] и расположение полигона георадарной съёмки; Б. Поперечный геологический профиль Сенокосной ложбины по [5] с исходной литологической границей урочищ (указана как нечеткая)
[Fig. 7 A. Satellite image and a fragment of the landscape map of the Satino field site based on [9], GPR survey location; B. Cross-sectional geological profile of the Senokosnaya gully according to [5] with the original lithological boundary of the landscape units (indicated as unclear)]

Результаты

На рисунке 8 представлена трехмерная визуализация результатов площадной георадиолокационной съемки с антенным блоком 250 МГц (А) и его сечений. Сечение на глубине 1 м (рис. 8Б) характеризует почвенные иллювиальные горизонты, расположенные в покровном

суглинке. Прежде всего, отмечается крайняя неоднородность слоя: в данный срез попадают как структурные элементы поверхностных горизонтов почв – пронизывающие этот слой вертикальные трещины (участки оранжевого и голубого цвета), так и элементы собственно покровных суглинков (коричневые и темно-серые тона).



Условные обозначения: Красным пунктиром отмечен контур флювиогляциальных песков – положение границы урочищ

Рис. 8. А. Трехмерная визуализация результатов площадной георадиолокационной съемки с антенным блоком 250 МГц, показывающая структуру подповерхностных отложений склона Сенокосной балки;

Б. Горизонтальное сечение на глубине 1 м; В. вертикальное сечение (профиль)

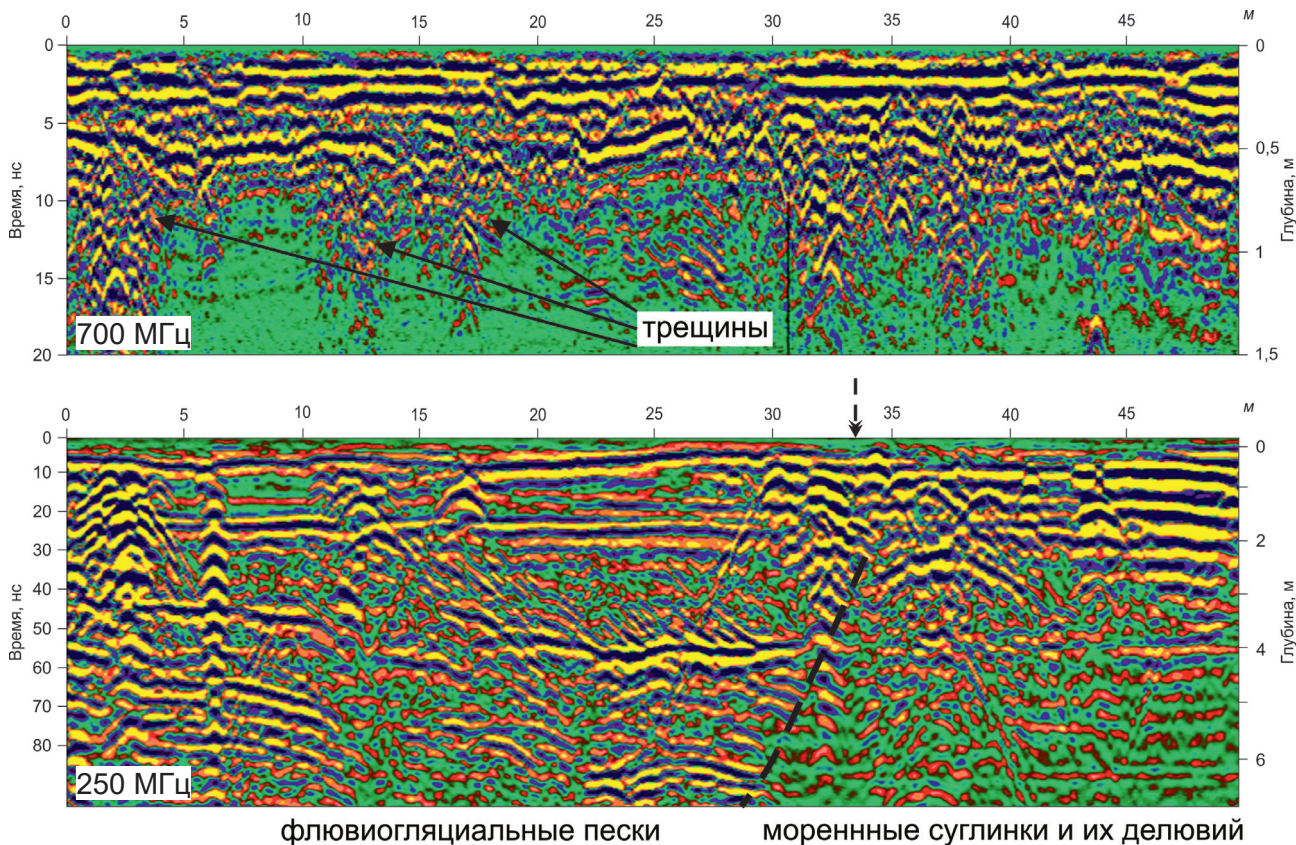
[Fig. 8. A. Three-dimensional visualization of the GPR results with 250 MHz antenna unit, showing the structure of subsurface deposits of the slope of the Senokosnaya gully; В: amplitude-slice at 1 m depth; C: vertical cross-section]

Наиболее интересный результат показывает профиль (В), расположенный с запада на восток: в нижней части склона под покровными суглинками обнаруживается слой облегченных (песчано-супесчаных) отложений. Причем, эти отложения обнаруживаются на глубинах более 2-3 м. Выше по склону на этой глубине расположены моренные отложения, которые полностью поглотили сигнал. Для интерпретации этого участка были детализированы первые 45 м вертикального профиля (рис. 9). На радарограмме, полученной на частоте 700 МГц с разрешающей способностью по вертикали порядка 0,1-0,15 м, отчетливо дешифрируются горизонтальные структуры почв: пахотный горизонт по плу-

бине плужной подошвы на глубине 20-25 см; границы легко суглинистых элювиальных горизонтов с тяжело суглинистыми иллювиальными горизонтами в покровных суглинках на глубинах 50-60 см. Характерными элементами являются вертикальные структуры почв: трещины (зоны трещиноватости), ширина которых в верхней части достигает 1 м, прослеживаются до глубин. По данным антенны 250 МГц (см. рис. 9) в нижней части склона Сенокосной балки выделяется линза облегченных водонасыщенных флювиогляциальных отложений, которые под покровными и делювиальными суглинками прослеживаются до глубин более 7 м. Эти отложения характеризуются волнистой и косой слоисто-

стью и несогласным залеганием, что свидетельствует в пользу их флювиогляциального происхождения. На отметках 36-37 м довольно отчетливо проявляется гипербола дифракции, возможно свидетельствующая о наличии крупного валуна, связанного с границей моренных отложений. Совокупность этих фактов позволяет нам

провести литологическую границу урочищ на глубину до 7 м. Обнаруженная нами граница может быть зафиксирована по координатам GPS на поверхности. Положение линзы песков по радарограммам подтверждается данными детальных геоморфологических исследований (рис. 7Б) и значительно уточняет их.



Условные обозначения: Стрелка указывает на границу урочищ, определенную по данным геофизики

Рис. 9. Детализированные фрагменты радарограмм, демонстрирующие структуру почв (700 МГц) и структуру четвертичных отложений (250 МГц) склона Сенокосной ложбины
 [Fig. 9. Detailed fragments of GPR profiles showing soil structure (700 MHz) and Quaternary sediment structure (250 MHz) of the slope of the Senokosnaya gully]

Участок 3. Границы между ландшафтами полесского типа

Краткая ландшафтная характеристика. Территория расположена на юго-востоке Мещёрской низменности в Рязанской области, она относится к Полесскому типу ландшафтов, где в качестве литогенной основы преобладают слои флювиогляциальных отложений днепр-московской ледниковой эпохи, подстилаемых моренными отложениями донского возраста [1]. Согласно ландшафтной карте И. И. Мамай [8], на данном участке в направлении с юго-запада на северо-восток выделено пять ПТК: вершины моренного холма (1), ложбины стока (3), пологого склона, термокарстовой депрессии (9), долинно-зандровой равнины (4). Соответствие ПТК основным сопряженным геоморфологическим элементам обусловило хорошую корреляцию между геофизическими и скважинными данными. Для уточнения положения границы ландшафтов применены методы георадиолокации и электротомографии на двух профи-

лях, ориентированных поперек установленной границы ландшафтов (рис. 10). Для верификации геофизических данных были описаны почвы через каждые 25 м и скважины (до 5 м). Ориентация профилей поперек границы позволила проанализировать латеральные изменения ландшафтов, а также изменения вертикальной структуры осадочных пород.

Результаты

Ложбина стока на моренной равнине (3) на данных георадиолокации характеризуется схожей волновой картиной с урочищем плоской моренной равнины (2) – глубина проникновения сигнала здесь минимальна. По данным почвенных описаний суглинистые моренные отложения здесь покрыты тонкими слоями супеси. На радарограммах обеих частот отсутствуют яркие отражения до глубины 1 м. На глубинах 1-2,5 м образует ряд гипербола дифракции, ниже которого амплитуда сигнала резко уменьшается (рис. 11а). Профиль электротомо-

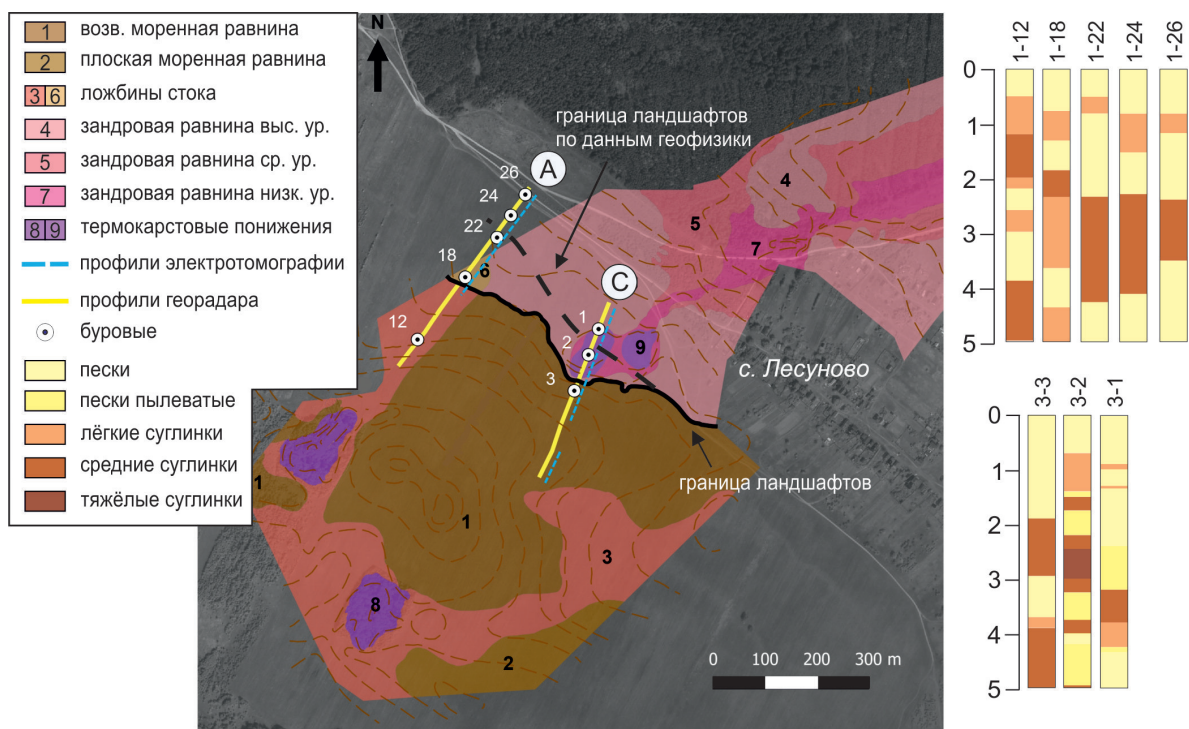


Рис. 10. Ландшафтная карта участка на УНБ Лесуново, расположение геофизических профилей и буровых скважин, литологические колонки; положение границы ландшафтов до и после корректировки по данным геофизики
 [Fig. 10. Landscape map of the Lesunovo UB site, location of geophysical profiles and boreholes, lithological columns; position of landscape boundary before and after adjustment from geophysical data]

графии *С* проходит по поверхности моренного холма. С глубины $>1,5 \pm 2$ м на нем выделяется зона с низким сопротивлением ($УЭС < 50$ Ом·м), покрытую сверху тонким слоем отложений с $УЭС$ выше 300 Ом·м. 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 гиперболы 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. Поэтому электротомография фиксирует здесь зону низкого $УЭС$. Увлажненные моренные суглинки поглощают радиоволны и снижают эффективность георадиолокации.

Пологий склон (1) расположен на профиле *С* от 115 до 200 м. В скважине 3-3 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 алевроитового 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 флювио-гляциально переработанным отложениям моренной гряды. На радарограмме 250 МГц выделены отражения на глубинах 2 и 3 м, потенциально соответствующие по-

доше флювио-гляциально переработанных отложений. На радарограмме 100 МГц видно регулярное субгоризонтальное отражение соответствует кровле морены, расположенной здесь на глубине около 3 м. Относительно высокая амплитуда отражения вызвана грунтовыми водами над поверхностью морены. Этим объясняются и низкие значения $УЭС$ на этом участке. Верхняя часть профиля электротомографии характеризуется стратифицированным распределением $УЭС$ 300-700 Ом·м. Геофизические результаты соответствуют данным скважин и отражают изменения гранулометрии и влажности слоев песка и суглинка. Глубинность георадиолокации увеличивается вместе со значениями $УЭС$ вниз по склону на северо-восток, что указывает на постепенное увеличение мощности размытых слоистых отложений облегченного гранулометрического состава над мореной.

Термокарстовая депрессия (8). Эта депрессия выражена в рельефе в виде эллиптического понижения. По данным скважины 3-2 она заполнена легким опесчаненным суглинком, подстилаемым слоями песчаных суглинков и песков. На радарограмме 250 МГц между 230 и 270 м профиля *С* четко выделяется чашеобразная депрессия глубиной 1,5-2 м. Чашеобразная структура депрессии также представлена и на профиле 100 МГц, однако псевдогоризонтальные отражения резко прерываются на глубине 5-6 м. На профиле электротомографии депрессия идентифицируется по резкому уменьшению $УЭС$ с 1000 Ом·м в приповерхностном слое до 300 Ом·м и ниже на глубинах 1,5-2 м. Причиной различия $УЭС$ в основном однородной верхней части

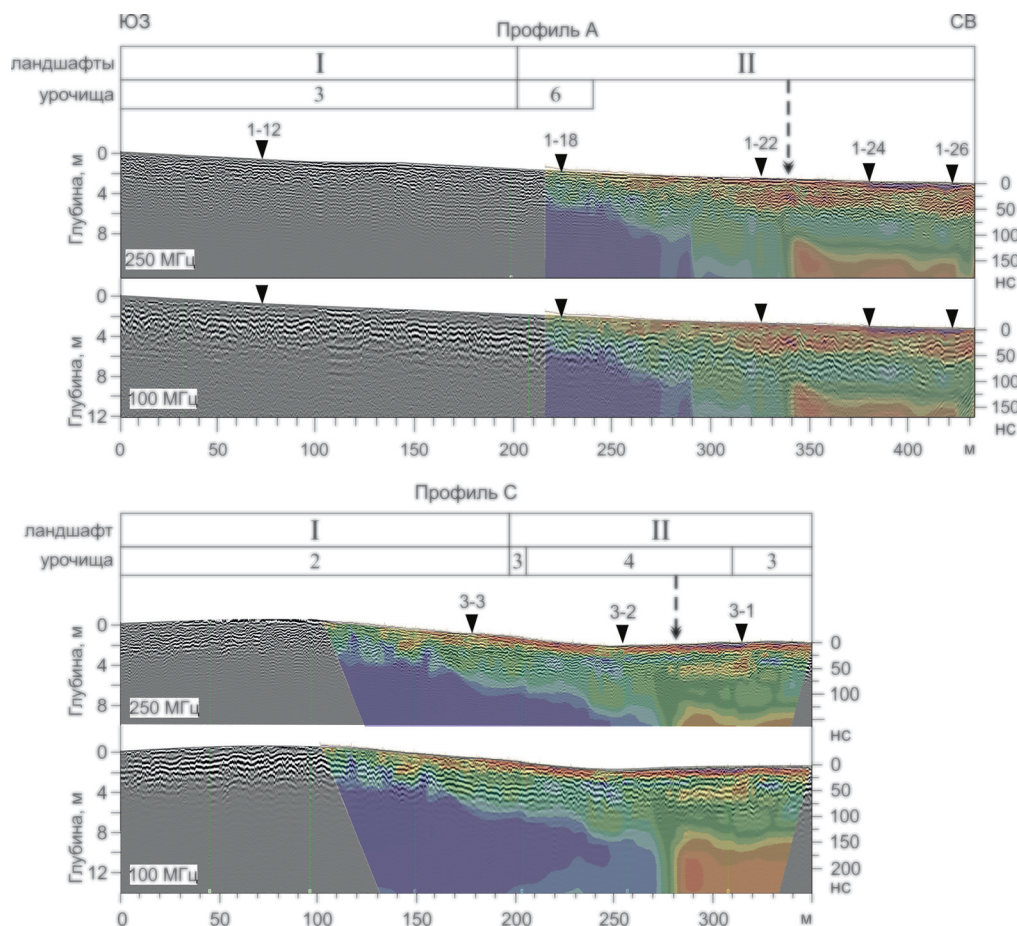


Рис. 11. Структура ландшафтов по длине профилей А и С и полученные радарограммы 250 и 100 МГц с наложенными на них геоэлектрическими разрезами электротомографии
 [Fig. 11. Landscape structure along the A and C profile and the resulting 250 and 100 MHz GPR datasets with overlaid ERT sections]

разреза является повышенная влажность за счет стоковых поверхностных и внутрипочвенных вод. Соответственно в заболачивающейся депрессии формируется подзолисто-глеевые и торфянисто-глеевые почвы.

На глубинах более 7 м в горизонтальном направлении к северо-востоку от впадины, примерно с отметки профиля 280 м, происходит особенно резкое изменение УЭС: его значения увеличиваются на порядок – от менее 100 Ом·м до 1000 Ом·м. Очевидно, что причиной контраста удельного сопротивления является субвертикальная литологическая граница, однако определить угол наклона по данным электротомографии невозможно. Отложения с высоким сопротивлением преобладают к северо-востоку от границы, а отложения с низким сопротивлением – к юго-западу.

Зандровая равнина. Толщина песчаных отложений увеличивается к северо-восточной части территории, как видно из скважин 3-1, 1-22, 1-24, 1-26, которые включает пески до 3,5 м. Глубинность георадиолокации увеличивается, субгоризонтальные отражения обнаруживаются до глубины 7 м (рис. 13В). По сравнению с верхней частью моренных отложений, они имеют меньшую амплитуду и другой частотный спектр. Данные электротомографии показывают, что на глубине

≥ 10 м расположены отложения с УЭС более 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), представляющих собой слоистые влажные пески и суглинки.

На основании полученных данных, дополненных картами оледенений [18], можно предположить следующую геоморфологическую историю этой территории. Моренный холм был сформирован в результате деятельности ледника во время Донской ледниковой эпохи (MIS 14). Позднее, во время московского оледенения (MIS 6), сформировалась зандровая равнина размыва. В Валдайскую ледниковую эпоху (MIS 5-MIS 2) граница между ними была перекрыта эоловыми и делювиальными отложениями. Термокарстовая депрессия – самый молодой элемент рельефа, заложенный в позднеледниковье (конец MIS 2). На все эти формы наложились процессы эрозии в период интенсивной сельскохозяйственной деятельности человека.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Геофизические методы георадиолокации и электротомографии показали свою ценность в идентификации литологических слоев, имеющих решающее

значение для выделения и верификации ландшафтных границ разного ранга. Эти методы дополняют друг друга, поскольку основаны на измерении различных физических свойств отложений, отличаются разной глубиной и разрешающей способностью и позволяют существенно дополнить данные бурения.

2. Методом георадиолокации в сложных структурах конечно-моренных комплексов Валдайского оледенения достоверно определяются границы между морфологическими элементами ландшафтов (фациями, урочищами и местностями). В отложениях со слабым поглощением радиоволн и контрастной диэлектрической постоянной (камы, зандры, озы и торфяники), надежно определяется их сложение и уровни грунтовых вод. Выявление структуры моренных суглинков в условиях природной увлажненности оказалось невозможно, достоверно определяются только границы урочищ термокарстовых заболоченных воронок, и элювиальных горизонтов почв.

3. Георадиолокация во вторично-моренных ландшафтах краевой зоны среднеплейстоценового оледенения, развитых на морене московского возраста, перекрытой чехлом покровных суглинков, показала содержательные результаты лишь при тщательном выборе условий профилирования. Высокая эффективность была достигнута в конце сухого летнего сезона, когда удалось выявить перекрытую исходную литологическую границу урочища перетока талых ледниковых вод.

4. Исследование границы двух ландшафтов Полесского типа показало, что целесообразно использовать геофизические методы георадиолокации и электромографии в комплексе. Граница Тумского моренно-водно-ледникового и Гусевско-Куршинского долинно-зандрового ландшафтов была выделена по данным электромографии (субвертикальный контакт глинистых моренных отложений донской ледниковой эпохи и песчаных флювиогляциальных отложений днепромской ледниковой эпохи на глубине более 7 м). Для георадиолокации такая глубинность недостижима в условиях суглинистой верхней части разреза, однако на радарограммах устанавливаются границы ПТК ранга урочищ и фаций, образованных на перекрывающих элювиальных отложениях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность коллективу учебно-научного стационара «Лесуново» в лице А. В. Федина, И. В. Мироненко, С. Б. Роганова, а также коллегам с отделения геофизики геологического факультета МГУ – А. А. Бобачеву за предоставление данных электромографии и Л. Б. Золотой за ценные консультации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асеев А. А., Веденская И. Е. *Развитие рельефа мещерской низменности*. Москва: Издательство АН СССР, 1962. 128 с.
2. Величко А. А., Писарева В. В., Фаустова М. А. Оледенения и межледниковья Восточно-Европейской равнины в раннем и среднем плейстоцене // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*, 2005, т. 13, № 2, с. 84-102.

3. Возможности георадиолокации при изучении четвертичных отложений в озерах Карелии / А. В. Старовойтов, М. Ю. Токарев, А. Л. Марченко и др. // *Труды Карельского научного центра РАН*, 2016, № 5, с. 62-75.

4. Доаграрные ландшафты юго-восточной Мещеры: реконструкция по палеоэкологическим данным / Е. Ю. Новенко, И. В. Мироненко, Д. А. Куприянов и др. // *География и природные ресурсы*, 2019, № 2, с. 38-49

5. Еременко Е. А., Панин А. В. *Ложбинный мезорельеф Восточно-Европейской равнины*. Москва: МИРОС, 2010. 192 с.

6. Жучкова В. К., Раковская Э. М. *Методы комплексных физико-географических исследований. Учебное пособие для студентов вузов*. Москва: Издательский центр «Академия», 2004. 368 с.

7. Золотая Л. А., Коснырева М. В. *Георадиолокационные исследования при решении задач почвенной геофизики. Геофизика*, 2015, № 2, с. 16-22.

8. Мамай И. И. Закономерности проявления процессов в ландшафтах Мещеры // *Ландшафтный сборник*, 2013, с. 7-23.

9. *Общегеографическая практика в Подмосковье*. Москва: Издательство Московского университета, 2007. 360 с.

10. Скакальский Б. Г. Гидрогеологические и гидрохимические особенности стока с логов зоны избыточного увлажнения // *Труды ГГИ*, 1963, вып. 102, с. 241-253.

11. Солнцев Н. А. *Учение о ландшафтах (избранные труды)*. Москва: Издательство Московского университета, 2001. 384 с.

12. Строение четвертичных отложений в долине Верхнего Днепра по данным изучения комплексом геофизических методов / С. С. Бричева, И. Н. Модин, А. В. Панин и др. // *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*, 2020, № 3, 104-115.

13. Сысуев В. В. *Введение в физико-математическую теорию геосистем*. Москва: ЛЕНАНД, 2020. 600 с.

14. Сысуев В. В. Георадарные исследования полимасштабных структур в ландшафтах центра Восточно-Европейской равнины // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*, 2014, № 4, с. 26-33.

15. Сысуев В. В., Алещенко Г. М. К проблеме разработки обобщенной модели ландшафта // *Научные чтения, посвященные 100-летию со дня рождения академика В. Б. Сочавы*, 2005, с. 54-58.

16. Allroggen N., Beiter D., Tronicke J. Ground-penetrating radar monitoring of fast subsurface processes // *GEOPHYSICS* 85, 2020, A19-A23. Glaciomorphological Map of the Russian Federation / V. Astakhov, V. Shkatova, A. Zastrozhnov et al. // *Quat Int.*, 2016, 420: 4-14.

17. Correlation of ground penetrating radar and 2-D resistivity imaging methods towards shallow subsurface layer at coastal area / I. Z. Roslan, N. Z. Mohamad, N. K. Nasir et al. // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 128, 2020, 103294.

18. Glaciomorphological Map of the Russian Federation / V. Astakhov, V. Shkatova, A. Zastrozhnov et al. // *Quat Int.*, 2016, 420: 4-14.

19. Landscape mapping using ground-penetrating radar, electrical resistivity tomography survey and landscape profiling / V. M. Matasov, S. S. Bricheva, A. A. Bobachev et al. // *AIMSGEO* 8, 2022, pp. 213-223.

20. Multi-scale palaeolandscape reconstruction at the Upper Paleolithic Byki sites, central East European Plain / S. S. Bricheva, N. B. Akhmetgaleeva, A. V. Panin et al. // *L'Anthropologie*, 2024, № 2 (в печати).

21. Review of Ground Penetrating Radar Applications for Water Dynamics Studies in Unsaturated Zone / M. Zhang, X. Feng, M. Bano et al. // *Remote Sensing*, 2022, 14, 5993.

22. Ryazantsev P. A., Bakhmet O. N. Application of Geoelectric Methods for Mapping Soil Heterogeneity // *Eurasian Soil Sc.*, 2020, 53, 558-568.

23. Ryazantsev P.A., Hartemink A.E., Bakhmet O.N. Delineation and description of soil horizons using ground-penetrating radar for soils under boreal forest in Central Karelia (Russia) // *CATENA*, 2022, 214, 106285.

24. Van Dam R.L. Landform characterization using geophysics – Recent advances, applications, and emerging tools // *Geomorphology*, 2012, 137, pp. 57-73.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию: 05.06.2023

Принята к публикации: 01.03.2024

UDC 911.2:550.837.2

ISSN 1609-0683

DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2024/1/34-48>

A Geophysical Approach to Establishing Landscape Boundaries

V. V. Sysuev¹✉, V. M. Matasov², S. S. Bricheva^{1,3}

¹*Lomonosov MSU, Russian Federation
(1, Leninskie Gory, Moscow, 119991)*

²*Agrarian and Technological Institute RUDN University, Russian Federation
(8, Miklukho-Maklaya str. Moscow, 117198)*

³*Institute of geography RAS, Russian Federation
(29, str.4, Staromonetny lane, Moscow, 119017)*

Abstract. The purpose of the work is to identify the initial lithogenic landscape boundaries of different ranks under conditions of different formation duration using the example of the end-moraine zone of the Valdai glaciation, the secondary-moraine territory of the Moscow glaciation and the zone of the Don glaciation.

Materials and methods. Ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography were the primary methods used, along with landscape mapping and profiling.

Results and Discussion. Combining ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography enables the determination of the boundaries of various geological formations and structures, as well as groundwater levels. Due to the combination of ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography, it is possible to obtain both the sedimental structure up to 20-30 meters depth and high resolution (accuracy) in the upper part of the sediments within the first 3-5 m. The resolution of these methods correlates well with the vertical boundaries of geosystems and allows to distinguish their different ranks – from facies to landscapes. The geophysical survey conditions must be considered, as humidity affects the dielectric permittivity and resistivity.

Conclusion. The use of objective digital geophysical methods to identify landscape boundaries is demonstrated to be both possible and necessary.

Key words: landscape boundaries, ground-penetrating radar, electrical resistivity tomography.

For citation: Sysuev V. V., Matasov V. M., Bricheva S. S. A Geophysical Approach to Establishing Landscape Boundaries. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografija. Geoekologija*, 2024, no. 1, p. 34-48. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2024/1/34-48>

REFERENCES

1. Aseev A. A., Vedenskaja I. E. *Razvitie rel'efa meshher-skoj nizmennosti* [Development of the relief of the Meshchera lowland]. Moscow: Izdatel'stvo AN SSSR, 1962. 128 p. (In Russ.)

2. Velichko A. A., Pisareva V. V., Faustova M. A. Oledeneniya i mezhlodnikov'ja Vostochno-Evropejskoj ravniny v rannem i srednem plejstocene [Glaciations and interglacials of the East European Plain in the early and middle Pleistocene]. *Stratigrafija. Geologicheskaja korrelyacija*, 2005, vol. 13, no. 2, pp. 84-102. (In Russ.)

3. Vozmozhnosti georadiolokacii pri izuchenii chetvertichnyh otlozhenij v ozerah Karelii [Possibilities of ground penetrating radar in the study of Quaternary deposits in lakes of Karelia] / A. V. Starovojtov, M. Ju. Tokarev, A. L. Marchenko i dr. *Trudy Karelskogo nauchnogo centra RAN*, 2016, no. 5, pp. 62-75. (In Russ.)

4. Doagramny'e landshaftny' yugo-vostochnoj Meshhyory': rekonstrukcija po paleoekologicheskim dannym [Pre-agrarian landscapes in southeastern Meshchera: reconstruction from paleoecological data] / E. Yu. Novenko, I. V. Mironenko, D. A. Kupriyanov i dr. *Geografiya i prirodny'e resursy*, 2019, no. 2, pp. 38-49. (In Russ.)

5. Eremenko E. A., Panin A. V. *Lozhbinnyj mezorel'ef Vostochno-Evropejskoj ravniny* [Hollow mesorelief of the East European Plain]. Moscow: MIROS, 2010. 192 p. (In Russ.)

6. Zhuchkova V. K., Rakovskaja Je. M. *Metody kompleksnyh fiziko-geograficheskikh issledovanij. Uchebnoe posobie dlja studentov vuzov* [Methods of complex physical-geographical research. Textbook for university students]. Moscow: Izdatel'skij centr «Akademija», 2004. 368 p. (In Russ.)

7. Zolotaja L. A., Kosnyreva M. V. Georadiolokacionnye issledovanija pri reshenii zadach pochvennoj geofiziki [Georadar

© Sysuev V. V., Matasov V. M., Bricheva S. S., 2024

✉ Vladislav V. Sysuev, e-mail: v.v.sysv@mail.ru



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

studies in solving problems of soil geophysics]. *Geofizika*, 2015, no. 2, pp. 16-22. (In Russ.)

8. Mamaj I.I. Zakonomernosti pojavlenija processov v landshaftah Meshhory [Patterns of manifestation of processes in the landscapes of Meshchera]. *Landshaftnyj sbornik*, 2013, pp. 7-23. (In Russ.)

9. *Obshhegeograficheskaja praktika v Podmoskov'e* [General geographical practice in the Moscow region]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 2007. 360 p. (In Russ.)

10. Skakal'skij. B.G. Hidrogeologicheskie i gidrohimiicheskie osobennosti stoka s logov zony izbytochnogo uvlazhnenija [Hydrogeological and hydrochemical features of runoff from logs in the zone of excess moisture]. *Trudy GGI*, 1963, v. 102, pp. 241-253. (In Russ.)

11. Solncev N.A. Uchenie o landshaftah (izbrannye trudy) [The doctrine of landscapes (selected works)]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 2001. 384 p. (In Russ.)

12. Stroenie chetvertichnyh otlozhenij v doline Verhnego Dnepra po dannym izuchenija kompleksom geofizicheskikh metodov [The structure of Quaternary deposits in the Upper Dnieper valley according to data from studies using a complex of geophysical methods] / S. S. Bricheva, I. N. Modin, A. V. Panin i dr. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 4: Geologija*, 2020, no. 3, pp. 104-115. (In Russ.)

13. Sysuev V. V. Vvedenie v fiziko-matematicheskiju teoriju geosystem [Introduction to the physical and mathematical theory of geosystems]. Moscow: LENAND, 2020. 600 p. (In Russ.)

14. Sysuev V. V. Georadarnye issledovanija polimasshtabnyh struktur v landshaftah centra Vostochno-Evropskoj ravniny [GPR studies of multi-scale structures in the landscapes of the center of the East European Plain]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija 5: Geografija*, 2014, no. 4, pp. 26-33. (In Russ.)

15. Sysuev V. V., Aleshhenko G. M. K probleme razrabotki obobshhennoj modeli landshafta [On the problem of developing a generalized landscape model]. *Nauchnye chtenija, posvjashchennye 100-letiju so dnja rozhdenija akademika V. B. Sochavy*, 2005, pp. 54-58. (In Russ.)

16. Allroggen N., Beiter D., Tronicke J. Ground-penetrating radar monitoring of fast subsurface processes. *GEOPHYSICS* 85, 2020, A19-A23.

17. Correlation of ground penetrating radar and 2-D resistivity imaging methods towards shallow subsurface layer at coastal area / I. Z. Roslan, N. Z. Mohamad, N. K. Nasir et. al. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 128, 2020, 103294.

18. Glaciomorphological Map of the Russian Federation / V. Astakhov, V. Shkatova, A. Zastrozhnov et al. *Quat Int*, 2016, 420: 4-14.

19. Landscape mapping using ground-penetrating radar, electrical resistivity tomography survey and landscape profiling / V. M. Matasov, S. S. Bricheva, A. A. Bobachev et. al. *AIMSGEO* 8, 2022, pp. 213-223.

20. Multi-scale palaeolandscape reconstruction at the Upper Paleolithic Byki sites, central East European Plain / S. S. Bricheva, N. B. Akhmetgaleeva, A. V. Panin et al. *L'Anthropologie*, 2024, № 2 (in print).

21. Review of Ground Penetrating Radar Applications for Water Dynamics Studies in Unsaturated Zone / M. Zhang, X. Feng, M. Bano et. al. *Remote Sensing*, 2022, 14, 5993.

22. Ryazantsev P. A., Bakhmet O. N. Application of Geoelectric Methods for Mapping Soil Heterogeneity. *Eurasian Soil Sc.*, 2020, 53, 558-568.

23. Ryazantsev P. A., Hartemink A. E., Bakhmet O. N. Delineation and description of soil horizons using ground-penetrating radar for soils under boreal forest in Central Karelia (Russia). *CATENA*, 2022, 214, 106285.

24. Van Dam R. L. Landform characterization using geophysics – Recent advances, applications, and emerging tools. *Geomorphology*, 2012, 137, pp. 57-73.

Conflict of interests: The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 05.06.2023

Accepted: 01.03.2024

Сысуев Владислав Васильевич
профессор кафедры физической географии и ландшафтоведения географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова, ORCID: 0000-0003-3270-2800, e-mail: v.v.syss@mail.ru

Матасов Виктор Михайлович
младший научный сотрудник Аграрно-технологического института РУДН, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-3494-116X, e-mail: ecoacoustic@yandex.ru

Бричева Светлана Сергеевна
научный сотрудник кафедры сейсмологии и геоакустики геологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова; научный сотрудник лаборатории эволюционной географии Института географии РАН, г. Москва, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-1897-3719, e-mail: bricheva@igras.ru

Vladislav V. Sysuev
Prof. at the Department of Physical Geography and Landscape Science, Faculty of Geography, Lomonosov, Moscow, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-3270-2800, e-mail: v.v.syss@mail.ru
Victor M. Matasov

Junior researcher at the Agrarian and Technological Institute of the RUDN University, Moscow, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-3494-116X, e-mail: ecoacoustic@yandex.ru

Svetlana S. Bricheva
Researcher at the Department of Seismics and Geoacoustic, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University; Researcher at the Laboratory of Evolutionary Geography of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-1897-3719, e-mail: bricheva@igras.ru