

Гранулометрический состав, магнитные и электрические свойства субаэральных покровных отложений на территории Новосибирского Академгородка

© Г. Г. Матасова, В. В. Оленченко, А. Ю. Казанский, 2012

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

Поступила 7 мая 2012 г.

Представлено членом редколлегии М. И. Орлюком

Під час проведення інженерно-геологічних досліджень для будівництва нового корпусу Новосибірського державного університету було розкрито горизонт ґрунтів із просадковими властивостями, який визначено стандартним аналізом як супісок пилюватий просадковий. Генезис цих ґрунтів і межі поширення не було визначено. Згідно з результатами досліджень гранулометричного складу, електричних і магнітних властивостей ґрунтів, вони являють собою перешарування піщаних різновидів та горизонтів викопаних ґрунтів. Верхня частина до глибини 0,8—1,0 м відрізняється від іншої частини розрізу аномально високим питомим електричним опором, протилежним характером кореляційних зв'язків між гранулометричним складом відкладів і магнітними характеристиками, що зумовлено продовженням постгинетичних процесів. Рекомендовано проведення геолого-геофізичного дослідження на цій території у свердловинах розвідувального буріння з кроком 0,5 м.

During geological engineering research for new building of the Novosibirsk state university a horizon of ground settlement classified by the standard analysis as sandy silt loam has been found. Genesis of this ground and its distribution remains obscure. Our study of grains size, electric and rock-magnetic properties of those materials shows that they are represented by inter-bedding of sandy layers of different grain size and horizons of fossil soils. The upper part of the section up to the depth of 0,8—1,0 m sufficiently differs from the lower part by abnormally high specific electric resistance, opposite character of correlation between grain size and rock-magnetic parameters that can be caused by a continuation of modern soil-forming processes. Our results recommend geological-geophysical studies of soils for the given territory with sampling interval in boreholes 0,5 m.

Введение. Современное развитие Новосибирского Академгородка сопровождается строительством новых зданий и инженерных сооружений. Инженерно-геологические изыскания, выполняемые на стадии проектирования, проводятся по методикам, регламентированным государственными стандартами. Тем не менее даже по четким определениям ГОСТов не всегда удается однозначно идентифицировать типы ґрунтов, вскрываемых скважинами разведочного бурения.

Подобный случай произошел при проведении инженерно-геологических изысканий под строительство нового корпуса Новосибирского государственного университета. В процессе разведки в разрезе был вскрыт горизонт ґрунтов, обладающих просадочными свойствами. По стандартному лабораторному анализу этот инженерно-геологический элемент был классифицирован как супесь пылеватая просадоч-

ная. Однако генезис этих ґрунтов и границы распространения в плане и на глубину остались невыясненными. В геоморфологическом плане участок исследований находится в пределах IV надпойменной террасы р. Обь. Рельеф площадки относительно ровный, с общим уклоном в северо-восточном направлении. В геологическом строении территории принимают участие рыхлые верхнечетвертичные аллювиальные и эоловые образования, залегающие со стратиграфическим несогласием на продуктах выветривания палеозойских гранитов. Общая мощность четвертичных отложений в районе работ составляет 30—40 м. В верхней части разреза часто встречаются ґрунты, проявляющие просадочные свойства по I типу условий просадочности.

Для определения характера развития просадочных ґрунтов в пределах контура проектируемого здания были проведены электрораз-

ведочные исследования методом вертикальных электрических зондирований в модификации электротомографии. В одной из стенок котлована для фундамента здания были отобраны пробы на гранулометрический и петромагнитный анализы, выполнены измерения удельного электрического сопротивления (УЭС), проведено геологическое описание с целью определения генезиса грунтов, условий осадконакопления и детального расчленения разреза.

Методика исследований. Вертикальные электрические зондирования в модификации электротомографии выполнены с помощью аппаратуры Syscal PRO (Франция). Межелектродное расстояние по профилю зондирования составляло 5 м, количество электродов — 24, измерительная — симметричная установка Шлюмберже. Для решения двумерной обратной задачи применялось программное обеспечение RES2DInv. По результатам инверсии строились разрезы УЭС грунтов.

Лазерная гранулометрия. Для изучения гранулометрического состава был использован лазерный анализатор размера частиц Microtrac X100. Диапазон размера частиц, определяемых данным прибором, составляет от 704 мкм (0,704 мм) до 0,146 мкм (0,000146 мм); общее количество измеряемых фракций — 60. Для диспергирования образцов использовался ультразвук, измерение каждого образца производилось по 2 раза: до и после ультразвукового воздействия. Анализировались данные, полученные после ультразвуковой обработки. Для выявления изменения гранулометрического состава отложений различных литогенетических типов были рассчитаны: средний диаметр зерна (D , мкм), процентное содержание песчаной (>100 мкм), крупноалевритовой (~50—100 мкм), мелкоалевритовой (~10—50 мкм), глинистой (<10 мкм) фракций.

Петромагнитные исследования. Измерение низкочастотной магнитной восприимчивости χ_{LF} и частотной зависимости магнитной восприимчивости осуществлялось на приборе Bartington MS2 с двухчастотным датчиком. Исследования гистерезисных магнитных характеристик проводились с помощью коэрцитивного спектрометра J_meter конструкции П. Г. Ясонова [Jasonov et al., 1998], позволяющего в автоматическом режиме измерять кривые нормального остаточного намагничивания образцов объемом около 1 см³ при непрерывном росте внешнего магнитного поля. Диагностика состава ферримагнитной фракции отложений проводилась с помощью терромагнитного ана-

лиза, основанного на изучении поведения индуцированной намагниченности образца при нагреве до температур свыше 700 °С и получении диагностических характеристик ферримагнитных минералов — точек Кюри (T_C) на терромагнитном анализаторе фракций конструкции Ю. Виноградова (ИФЗ РАН).

Электротомографические исследования. Для определения УЭС грунтов применялась четырехэлектродная схема измерений [Инструкция..., 1984]. Миниатюрная симметричная электроразведочная установка подключалась к аппаратуре «Скала-48» [Панин, 2009]. Расстояние между питающими электродами АВ составляло 60 см, между приемными MN — 20 см. Глубинность исследования стенки обнажения такой установкой приблизительно оценивается как 1/3 разности АВ, что соответствует 20 см. Установка заземлялась горизонтально и перемещалась снизу вверх по обнажению с шагом 10 см. Рассчитываемая величина УЭС служила эффективной величиной некоего объема среды под установкой. Если мощность слоя, в который заземляется установка, превышает ее размеры, то определяемое УЭС близко к истинному сопротивлению грунтов слоя. В случае частого чередования тонких слоев рассчитанное УЭС служит интегральной характеристикой слоистой среды. В нашем случае мощность слоев меньше или соизмерима с размерами измерительной установки, поэтому определяется кажущееся УЭС (ρ_k).

Результаты исследований. Электрические зондирования. Интерпретационный критерий для выделения на геоэлектрических разрезах слоя просадочных грунтов — их высокое УЭС, обусловленное низкой влажностью и структурными особенностями (рис. 1). Геологическая интерпретация разреза проводилась с учетом данных бурения. Как видно из рисунка, в верхней части разреза до глубины около 5 м выделяется слой высокого сопротивления (более 400 Ом·м) интерпретируемый как просадочные грунты. Ниже в разрезе в интервале глубин 5—15 м выделяются два комплекса пород с удельным электрическим сопротивлением 160—250 и 250—400 Ом·м. Первый комплекс пород с меньшим УЭС вероятно соответствует переслаивающимся тонко- и среднезернистым пескам. Второй комплекс, обладающий более высоким сопротивлением, интерпретируется как пески крупнозернистые малой влажности. В интервале глубин 15—18 м УЭС пород понижается до 100—150 Ом·м, что, скорее всего, связано с обводнением. Ниже 20 м залегает

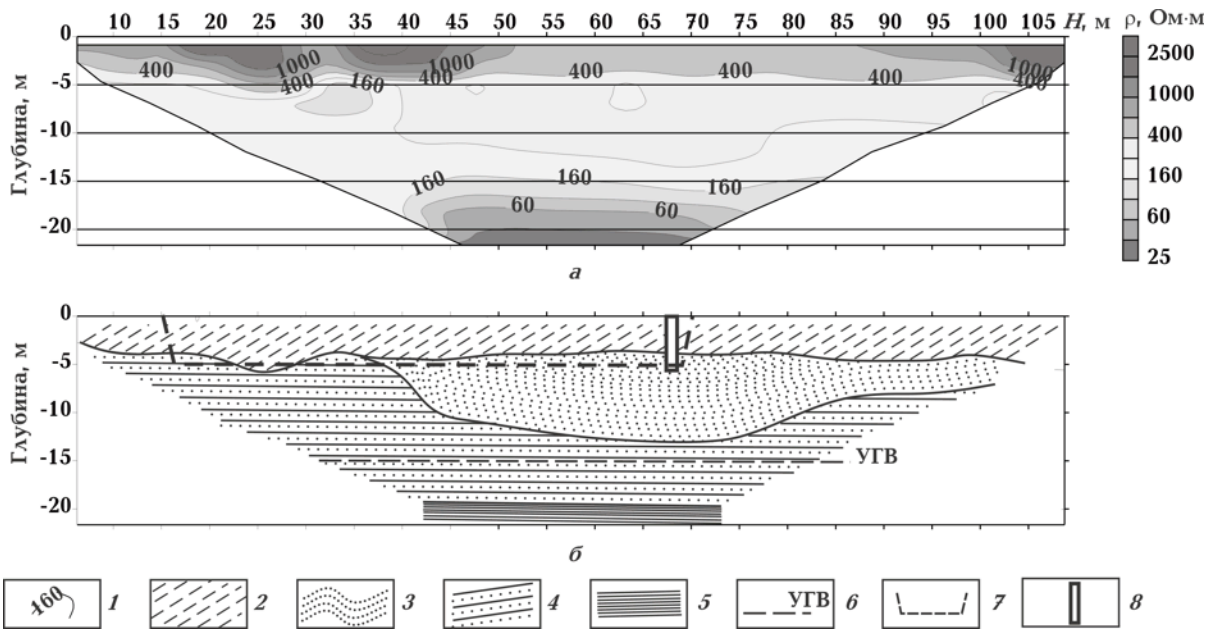


Рис. 1. Геоэлектрический разрез (а) и его геологическая интерпретация (б) по данным электротомографии: 1 — изолинии УЭС; 2 — просадочные грунты; 3 — пески крупнозернистые, маловлажные; 4 — переслаивание разнозернистых песков; 5 — глины; 6 — уровень грунтовых вод; 7 — проекция контура котлована; 8 — проекция места отбора проб на стенке котлована.

горизонт пород с сопротивлением порядка 25 Ом·м. Такие значения УЭС характерны для глинистых разностей, являющихся водоупорным слоем.

Таким образом, по данным вертикальных электрических зондирований было установлено, что в пределах площадки исследований в верхней части разреза до глубины порядка 5 м залегает выдержанный по мощности горизонт высокого сопротивления, интерпретируемый как просадочные грунты. Ниже по разрезу сопротивление песчаных грунтов варьирует в пределах 100—400 Ом·м и определяется их дисперсностью и влажностью. Подстилающим горизонтом являются низкоомные грунты, не вскрытые бурением (предположительно глины).

Гранулометрический состав отложений.

Полевое геологическое описание по стенке искусственного обнажения (далее разрез «Университет») позволило выделить в разрезе до глубины 5,5 м восемь горизонтов, представляющих различные литологические разновидности (рис. 2). Результаты гранулометрических исследований подтвердили полевую стратификацию и позволили получить дополнительные литолого-генетические характеристики слагающих разрез отложений.

1. *Современная почва (P0)* — 33 см. Гумусовый горизонт (А) — 15 см, темно-серого цвета.

Иллювиальный (переходный) горизонт (В) — 18 см. Переход между горизонтами по цвету постепенный, граница рваная, размытая, с затеками гумуса в горизонт В. Оба горизонта представлены глинистым алевропеском (по классификации Н. Н. Верзилина [Верзилин, 1995]). Соотношение фракций изменяется с преобладания алевритовой фракции в гумусовом горизонте (47 %) на преимущественно песчаную фракцию (49—57 %) в иллювиальном горизонте. В составе песчаной фракции преобладает мелкий песок (100—250 мкм). Распределение фракций имеет сложную форму (рис. 3, а, б), мультимодальный вид с основным пиком, расположенным в области мелкозернистого песка.

2. *Песчаный горизонт (S1)* — 50 см. Глубина залегания 33—83 см, представлен песком алевритистым с содержанием песка 55—67 %, алеврита — 29—37 %, глины — менее 7 %. В составе песчаной фракции преобладает мелкий песок (52—60 %), по сравнению с современной почвой возрастает относительное количество среднего песка (до 29—33 %). Распределение фракций имеет сложную форму с несколькими пиками (рис. 2, в), основной пик располагается в области мелкого песка (176 мкм). Второй по величине слабовыраженный пик находится в области крупноалевритовых фракций (88 мкм), третий пик — на границе крупнозернистого и

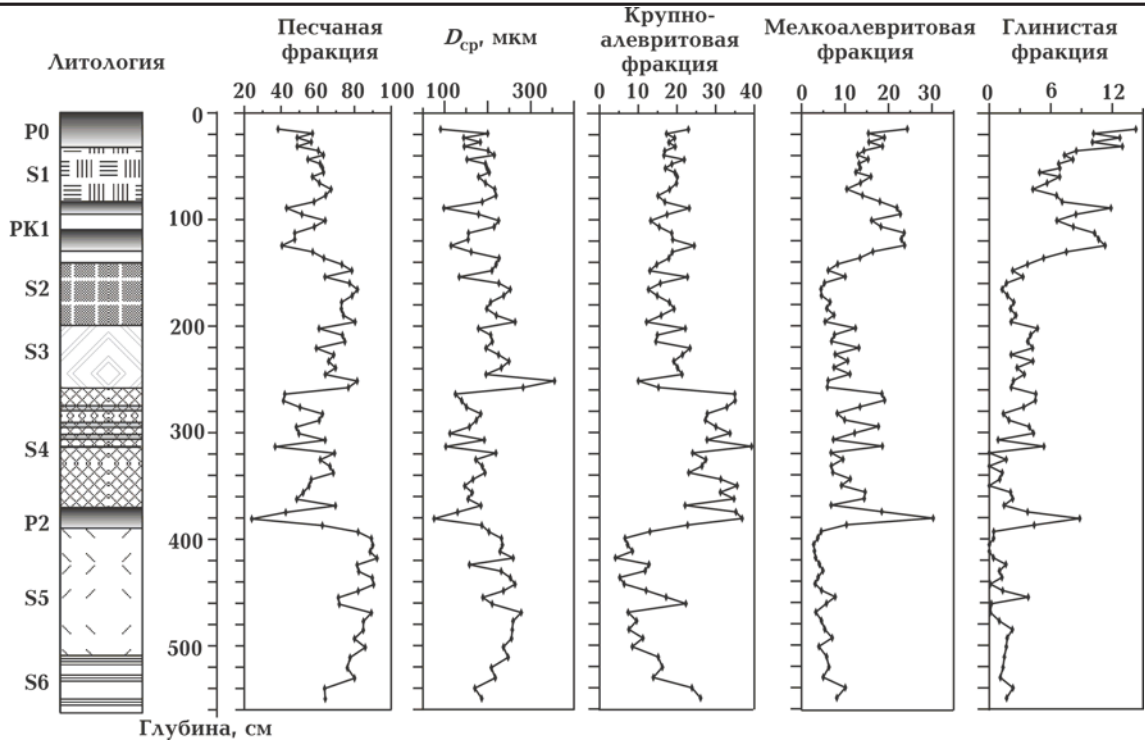


Рис. 2. Геологическое строение разреза «Университет» на строительной площадке главного корпуса НГУ и содержание гранулометрических фракций (%) по глубине разреза. D_{cp} — средний размер зерна.

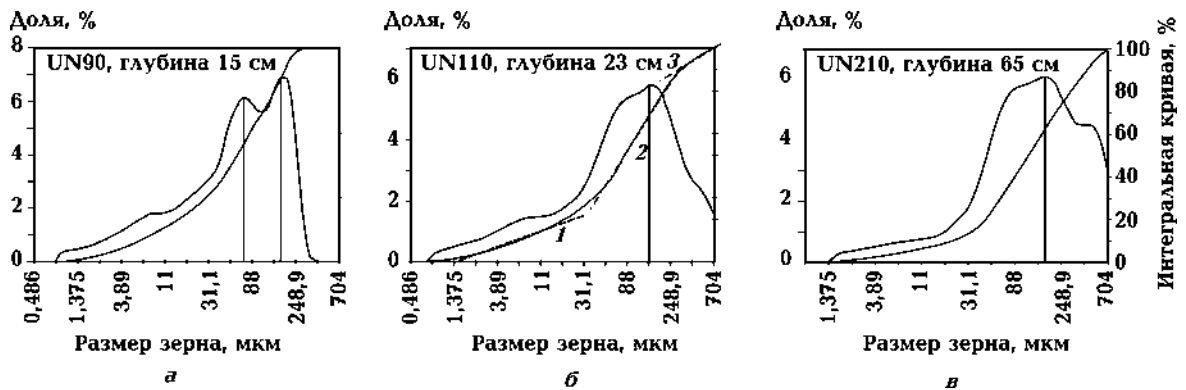


Рис. 3. Гранулометрический фракционный состав рыхлых отложений верхней части разреза: *а* — гумусовый горизонт современной почвы (P0), *б* — иллювиальный горизонт, *в* — подстилающий песчаный горизонт (S1); 1—3 — сегменты интегральной кривой (касательные к наиболее устойчивым частям кривой).

среднезернистого песка (500 мкм). Фракционный состав отложений песчаного горизонта (S1) и лежащего на нем иллювиального горизонта (B) современной почвы почти одинаков (рис. 3, б, в), за исключением более высокого содержания глины в B-горизонте современной почвы. Количество глины еще более увеличивается в гумусовом горизонте, что объясняется действием почвообразовательных процессов, перерабатывающих песчаные отложения. Общность фракционного состава песчаного

горизонта и вышележащей современной почвы свидетельствует о генетической связи этих горизонтов и отсутствии перерывов в осадко-накоплении данной части разреза.

Различие интегральных кривых на рис. 3, а—в заключается в расположении и форме перегиба первых двух сегментов кривых, а также в отсутствии третьего сегмента на графиках (а и в). Сегменты интегральных кривых соответствуют различным процессам и способам транспортировки обломочного материала:

первый сегмент показывает накопление глинистой фракции, которая может поступать в среду отложения в виде воздушной взвеси либо образовываться на месте (*in situ*). Судя по постепенному возрастанию количества глинистой фракции в рассмотренных трех горизонтах, следует отдать предпочтение второму варианту, т. е. большая часть глинистой фракции является продуктом почвообразования. Второй сегмент характеризует поступление крупноалевритовой фракции, мелкого и среднего песка, это более 80 % всего обломочного материала. В некоторых классификациях [Романовский, 1988] крупноалевритовую фракцию называют тонкозернистым песком, поэтому весь сегмент можно считать характеристикой накопления золотого песка (до 0,5 мм), который доставлен в среду осадконакопления воздушно-сальтационным путем. Такой способ транспортировки переносит близлежащие переветренные рыхлые отложения на небольшие расстояния (до первых километров). Третий сегмент характеризует доставку крупнозернистого песка волочением, его вклад в общий состав не более 10 %. Такой песок должен находиться вблизи, на открытом расстоянии до нескольких сотен метров, для его переноса требуется воздушный поток определенной силы (энергии), за отсутствием этих составляющих в некоторых отложениях (см. рис. 3, а), крупный песок отсутствует.

3. *Ископаемый педокомплекс (PK1)* — 57 см. Глубина залегания в разрезе 83—140 см. Педокомплекс состоит из двух почв темно-коричневого цвета, выполненных глинистым алевропеском (как и современная почва), верхняя имеет мощность 5—7 см, нижняя 15—17 см, иллювиальный горизонт — 15—20 см. Горизонт между почвами представлен песком алеври-

тистым буро-коричневого цвета, мощностью 15—18 см. Все границы неявные, переходного характера. Фракционный состав представлен на рис. 4.

Гранулометрический состав верхней почвы (рис. 4, а) совпадает по форме, количеству пиков и распределению фракций с гумусовым горизонтом современной почвы. Песчаный горизонт между почвами представлен глинистым алевропеском, по соотношению основных фракций (рис. 4, б) совпадает с вышележащим песчаным горизонтом (S1), но отличается от него ярко выраженным бимодальным распределением песчаной фракции с долей крупного песка, возрастающей до 23 %, а среднего и мелкого песка, уменьшающейся до 27 и 50 % соответственно. Нижняя почва (рис. 4, в), несмотря на схожее общее соотношение фракций, достаточно сильно отличается от верхней почвы: во-первых, унимодальным распределением фракций, близким к логнормальному, с пиком в области крупноалевритовой фракции (88 мкм); во-вторых, относительно высоким содержанием песчаной фракции (до 48 % против 43 % в верхней почве); в-третьих, соотношением песков различной крупности зерна. В верхней почве крупный песок отсутствует, песчаная фракция почти однородна и состоит на 95 % из мелкого песка, на 5 % — из среднего песка. В нижней почве крупный песок составляет 5—10 %, средний — 20—30 %, мелкий — 60—75 %.

Судя по фракционному составу PK1, довольно сильно изменяющемуся от горизонта к горизонту (рис. 4, а—в), динамика среды отложения в период образования педокомплекса была довольно изменчивой. Наиболее динамичной обстановкой характеризовался период накопления песчаного горизонта между почвами,

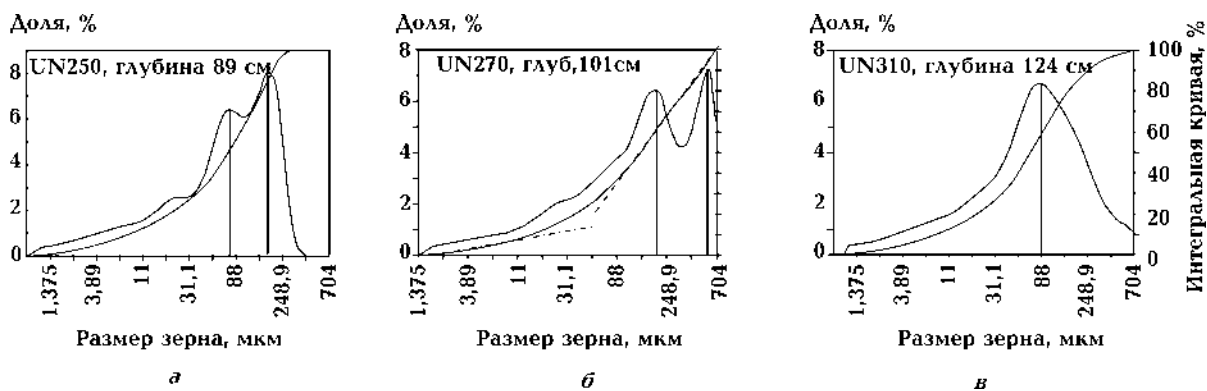


Рис. 4. Гранулометрический состав отложений ископаемого педокомплекса (PK): а — верхняя почва, б — песчаный горизонт между почвами, в — нижняя почва.

и более стабильными были условия в периоды почвообразования. При этом фракционный состав верхней почвы в значительной мере наследуется из нижележащего песчаного горизонта. Различие фракционного состава нижней почвы и промежуточного песчаного горизонта позволяет предполагать резкую смену условий седиментации при переходе от почвообразования к накоплению песков.

4. *Песчаный горизонт (S2)*. Мощность ~60 см, залегает на глубине 140—200 см. Горизонт представлен песком алевритистым, довольно однородным по составу, хорошо сортированным, с наименьшим количеством глинистой фракции (1—3%). Основная фракция — песок (до 82%), соотношение внутри песчаной фракции следующее: крупный песок составляет 8—13,5%, средний — 25—35%, преобладает мелкий песок (50—70%). Распределение фракций бимодальное (рис. 5, а): основной пик в области мелкого песка (209 мкм), второстепенный — в области крупного (500 мкм).

5. *Песчаный горизонт (S3)*. Мощность ~60 см, глубина залегания 200—260 см. Пески косослоистые, переслаивание разновидностей песков алевритистых с различным фракционным составом (рис. 5, б, в). Различие песчаных разностей заключается в небольших вариациях их гранулометрического состава: в песках с распределением фракций, как на рис. 3, в, содержание песчаной фракции в среднем 75%, алевритовой — 23%; в песках с распределением фракций, как на рис. 3, б, содержание песка в среднем 63%, алеврита — 34%; глинистой фракции в обеих разностях — 2—3%. Распределение внутри песчаной фракции, по сравнению с вышележащим горизонтом, смещено в сторону крупнозернистого песка: мелкий песок — 37—65%, средний — 21—31% и крупный — 8—40%.

По гранулометрическому составу и фор-

ме интегральных кривых (двухсегментных на рис. 5, а, б) ясно, что основной обломочный материал песчаной размерности имеет близкий источник, доставлен преимущественно сальтацией и волочением из близлежащих областей переведения рыхлых отложений. Что касается песчаных разностей, типичное распределение фракций которых представлено на рис. 4, в, то здесь довольно большой объем материала (30—35%) местного происхождения, поскольку транспортирован волочением. Косая слоистость указывает на наличие древнего склона, не исключено флювиальное (озерное, аллювиальное) происхождение или происхождение смешанного типа (эолово-озерное, эолово-делювиальное и т. п.).

6. *Песчаный горизонт (S4)*. Мощность 110 см, глубина залегания 260—370 см. Подразделяется на два подгоризонта, граница между ними приблизительно на глубине 320 см. Первый (верхний) подгоризонт представляет собой в основном песок алевритистый с включениями тонких слоев глинистого алевропеска, различие между ними заключается в перераспределении песчаного и алевритового материала: в первом случае песка 60—70%, алеврита 30—46%, глины 0,5—3% (рис. 6, а); во втором — песка 37—48%, алеврита 53—58%, глины 4,5—5,5% (рис. 6, б). Распределение фракций в обеих разностях схоже: основной пик в диапазоне крупноалевритовых фракций (74—88 мкм), второстепенный — в районе крупного песка (500 мкм). Нижний подгоризонт состоит из довольно однородного алевропеска с небольшими колебаниями состава вокруг средних значений: песок — 59%, алеврит — 40%, глина — 1%. Распределение фракций унимодально с пиком в области мелкого песка (105 мкм).

6. *Искапаемая почва (P2)*. Неравномерно гумусированный слой мощностью ~20 см. Глубина залегания в разрезе 370—390 см. Наиболее

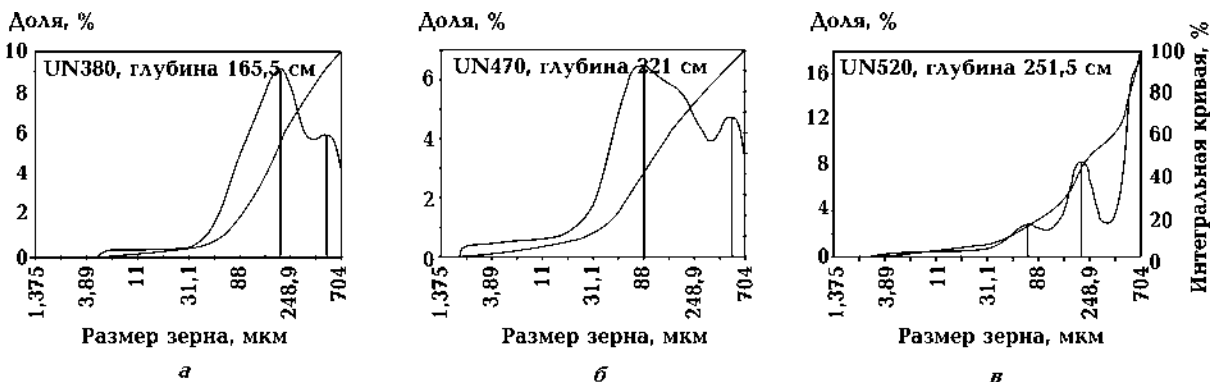


Рис. 5. Гранулометрический состав песчаных горизонтов S2 (а) и S3 (б, в).

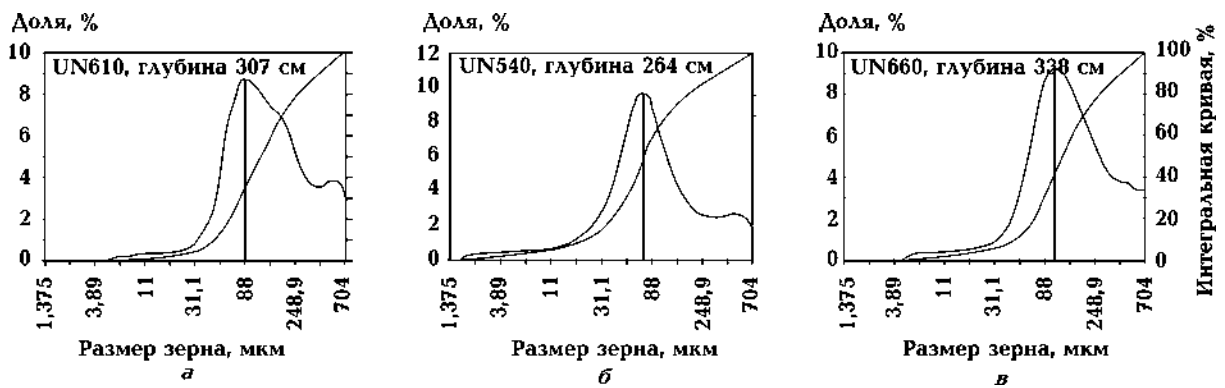


Рис. 6. Гранулометрический состав песчаных отложений горизонта S4: а, б — верхний подгоризонт (а — переслаивание песка алевритистого, б — глинистого алевропеска), в — нижний подгоризонт (однородная песчаная толща).



Рис. 7. Гранулометрический состав отложений горизонта ископаемой почвы P2 (а), песчаных горизонтов S5 (б) и S6 (в).

гумусированная часть представлена песчаным алевритом с содержанием песчаной фракции 24 %, алевритовой — 67 % и глинистой — 9 %. Распределение фракций унимодалное, логнормальное, с пиковым значением 62 мкм (рис. 7, а).

7. *Песчаный горизонт (S5)*. Косослоистые пески мощностью 120 см, глубина залегания 390—510 см. Высокое содержание песчаной фракции (80—92 %), в которой на долю мелкого песка приходится 55—75 %, среднего песка — 20—35 %, крупного — 5—15 %. Глинистой фракции 0—2 %. Пески хорошо сортированы с унимодалным распределением фракций (рис. 7, б), пиковое значение — в области фракций среднего песка (209 мкм).

8. *Песчаный горизонт (S6)*. Мелко- и среднезернистый песок, содержащий 67—75 % мелкого песка, 20—25 % среднего и 6—8 % крупного, залегает от глубины 510 см, нижняя граница не подсечена. По сравнению с вышележащими песками, здесь меньше песчаной фракции (64—78 %), но больше алевритовой (20—34 %), глинистой столько же (1—2 %). Песок хорошо сортирован с унимодалным распределением

фракций (рис. 7, в), с пиком в области мелкого песка (125 мкм).

Представленные на рис. 2—6 распределения гранулометрического состава рыхлых отложений разреза «Университет» можно подразделить на три типа: 1) унимодалные распределения, большая часть из которых имеет логнормальное или близкое к нему распределение гранулометрических фракций; 2) бимодалные распределения с двумя пиками, один из которых основной, другой второстепенный; 3) мультимодальные распределения с тремя пиками и более.

К первому типу относится нижняя часть разреза — горизонты S6, S5, P2, S4 (нижний подгоризонт). В верхней части разреза к первому типу относится только нижняя ископаемая почва педокомплекса (ПК1). Независимо от смещения пика в сторону крупноалевритовых фракций (P2, ПК1 (нижняя почва)) либо в сторону мелкого песка (S6, S5, S4 (нижний подгоризонт)) отложения хорошо сортированы, достаточно однородны, что свидетельствует об относительно устойчивых обстановках осадконакопления в периоды образования от-

ложений первого типа. Почти незаметное количество глинистой фракции (за исключением нижней почвы РК1) указывает на отсутствие интенсивных элювиальных процессов (переработки отложений *in situ*), что в свою очередь подразумевает достаточно суровые (холодные, сухие, с постоянными сильными ветрами) условия осадконакопления. Ко второму типу относятся прослой глинистого алевропеска в верхнем подгоризонте горизонта S4 и песчаная толща S2. В этих песках основной пик приходится на более мелкие фракции (крупный алеврит либо мелкий песок), другой, также явно выраженный пик, но меньшей амплитуды, располагается в районе крупного песка. Такое распределение указывает на довольно устойчивые условия осадконакопления с кратковременными резкими сменами режима седиментации в сторону усиления динамики среды.

Третий тип отложений, типичный, в основном, для верхней части разреза (P0, S1, РК1 (кроме нижней почвы)) и частично для средней (S3), вероятно формировался в неустойчивой высокодинамичной среде седиментации, для которой амплитуды изменения климатических условий (температура, влажность, частота и интенсивность ветровых потоков) были наибольшими. Распределение третьего типа имеет, как правило, два схожих по величине сближенных, но явных, пика (P0 (гумусовый горизонт), РК1 (верхняя почва и прослой песка между почвами)) либо один основной широкий пик, осложненный слабовыраженными дополнительными пиками (P0 (иллювиальный горизонт), S1, S3). И в том, и в другом случае в распределении фракций неявно присутствует «пичок» в области мелкозернистых (глинистой в P0 и мелкоалевритовой в РК1) фракций, что свидетельствует об образовании этих фракций *in situ* в результате интенсивной почвенной переработки отложений.

Судя по диаграммам гранулометрического состава, основная литолого-генетическая граница проходит между горизонтами S4 и S3. Она разделяет рыхлые отложения покрова на исследуемой территории на верхнюю и нижнюю части. Вероятно, подобная граница, но более низкого уровня, проходит между горизонтами P2 и S5.

Общее содержание гранулометрических фракций и среднего размера зерна (D_{cp}) по глубине разреза представлено на рис. 2. Средний размер зерна отложений определяется количеством песчаной фракции, которое в целом возрастает с глубиной. По содержанию крупного

алеврита разрез четко делится на три части: верхнюю, до глубины 260 см, со средним содержанием ~20%; среднюю, до глубины 390 см, со средним содержанием ~30%; нижнюю, в которой содержание крупного алеврита падает в среднем до 10%, исключая S6. Границы относительно резкого изменения содержания крупного алеврита совпадают с выделенными литолого-генетическими границами разреза. По содержанию песчаной и мелкозернистых фракций разрез можно подразделить еще более детально. В верхней части (до 260 см) можно выделить от трех до пяти горизонтов, в средней (до 390 см) и в нижней — два. Их границы также совпадают с границами вышеописанных горизонтов и подгоризонтов.

Таким образом, изучение гранулометрического состава рыхлых отложений дает возможность провести детальную стратификацию верхней части осадочного покрова на территории строительства нового корпуса НГУ и получить предварительные данные о накоплении этих осадков.

Магнитные свойства рыхлых отложений, их связь с гранулометрическим составом отложений. Магнитные свойства рыхлых отложений определяются концентрацией, составом и размерами зерен магнитных минералов, которые, в свою очередь, зависят от генезиса отложений, источника сноса обломочного и магнитного материала, дальности и способа транспортировки, механизма седиментации, динамики среды осадконакопления, диагенетических и постгенетических процессов. Изучение магнитных характеристик, их различных сочетаний и соотношений направлено на решение обратной задачи: восстановления среды осадконакопления и вторичных процессов, преобразующих отложения, по магнитным свойствам осадков.

Концентрация магнитных минералов оценивается набором концентрационно-зависимых магнитных параметров, среди которых основными являются магнитная восприимчивость и различные виды намагниченности (рис. 8).

По поведению большинства магнитных характеристик разрез делится на три части, как по содержанию крупноалевритовой фракции. Наиболее высокие концентрации магнитных минералов наблюдаются в средней части разреза (260—390 см), относительно малое количество магнитного материала содержат косослоистые пески. Взаимосвязь гранулометрического состава и магнитных параметров (только относительно высокие значения коэффициентов корреляции) приведена в табл. 1.

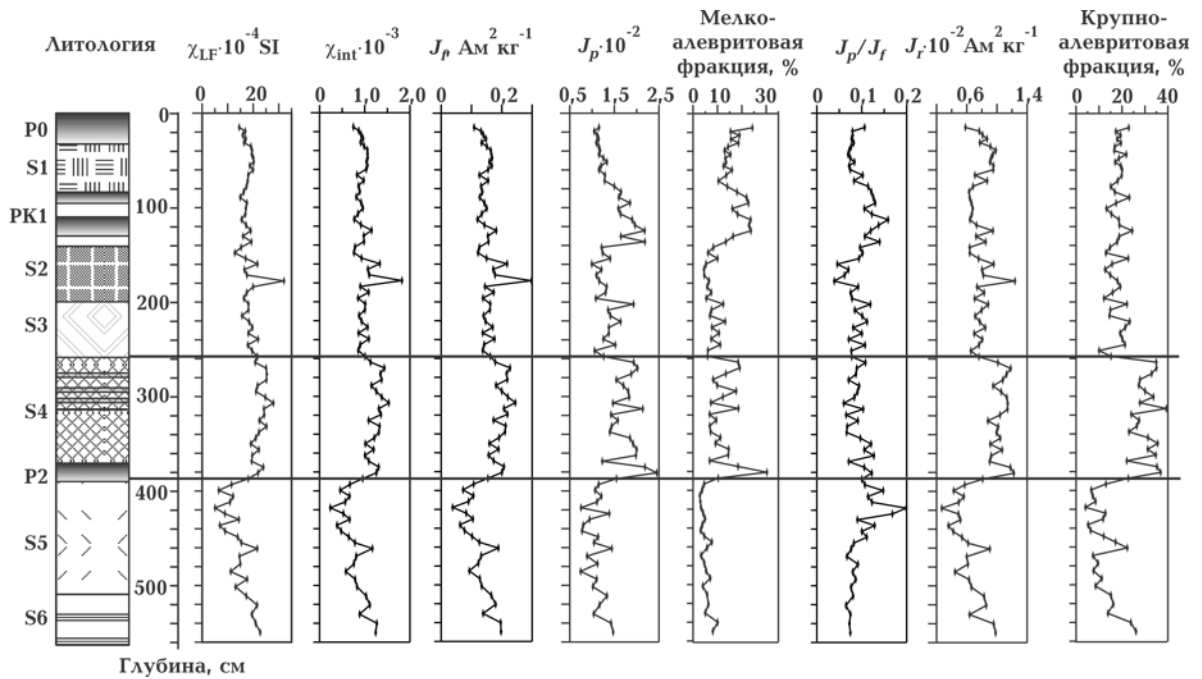


Рис. 8. Изменение концентрационно-зависимых параметров отложений по глубине: χ_{LF} — низкочастотная магнитная восприимчивость; χ_{int} — начальная магнитная восприимчивость; J_f — намагниченность насыщения ферромагнетиков, J_p — намагниченность парамагнетиков в поле 700 мТл; J_f/J_p — остаточная намагниченность.

Анализ таблицы дает возможность установить, что поведение магнитных характеристик изменяется противоположно содержанию песчаной фракции, но положительно связано с количеством всех других фракций, особенно сильна связь с содержанием крупноалевритовой фракции, т. е. можно считать, что магнитные свойства отложений определяются, в основном, магнитными минералами крупноалевритовой фракции. Другой интересный факт, следующей из анализа таблицы, заключается в противоположном характере связи между гранулометрическим составом и магнитными параметрами в верхней части разреза (P0—S1), с одной стороны, и в остальной части разреза (PK1—S6), с другой. Если связь положительная вверху, то эта же связь будет отрицательной в остальных отложениях, как, например, между песчаной фракцией и магнитными параметрами. И наоборот, отрицательная связь между алевритовыми фракциями в верхней части разреза переходит в положительную в остальной части разреза или в отдельных нижележащих горизонтах. Исключение представляет лишь параметр J_p , который определяется соотношением концентраций пара- и диамагнитных минералов. Характер его корреляционных связей по всей глубине разреза не изменяется.

Изменения коэрцитивных характеристик по глубине разреза также довольно хорошо

совпадает с колебаниями содержания крупноалевритовой фракции (рис. 9). Параметр S , коэрцитивные силы (B_c, B_{cr}) зависят от магнитной жесткости отложений и характеризуют в некоторой степени состав магнитной фракции с точки зрения соотношения магнитомягких (типа магнетита) и магнитожестких (типа гематита) минералов. Низкие значения S и высокие значения B_c, B_{cr} свидетельствует об изменении соотношения магнитных минералов различной степени коэрцитивности (жесткости) в сторону увеличения количества магнитожестких. Такое сочетание параметров прослеживается в верхней части горизонта S5 (400—450 см) и в нижней почве PK1. Обратная картина (высокие значения S и низкие значения B_c, B_{cr}) наблюдается в горизонте S4, в нижних частях S2, S5. Здесь преобладают магнитомягкие минералы. Синхронные колебания данных характеристик, как, например, увеличение в верхней части разреза (P0—S1) или в горизонте S6, свидетельствуют, скорее, об уменьшении размеров зерен магнитомягких минералов.

По температурам Кюри магнитных минералов во всех отложениях разреза обнаружен высокожелезистый титаномагнетит ($T_c=560\div 570$ °C), близкий по составу к чистому магнетиту ($T_c=578$ °C) как основному носителю намагниченности (рис. 10). Подобные эксперименты были проведены для образцов из всех

Таблица 1. Коэффициенты корреляции между концентрационно-зависимыми магнитными и гранулометрическими показателями

| Стратиграфический горизонт | Песчаная фракция | | | | | Крупнолевитовая фракция | | | | | Мелколевитовая фракция | | | | | Глинистая фракция | | | | |
|----------------------------|------------------|-------|-------|-------|-----------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------|------------------------|-------|-------|-------|-----------|-------------------|-------|-------|-------|-----------|
| | χ_{LF} | J_r | J_p | J_f | J_p/J_f | χ_{LF} | J_r | J_p | J_f | J_p/J_f | χ_{LF} | J_r | J_p | J_f | J_p/J_f | χ_{LF} | J_r | J_p | J_f | J_p/J_f |
| P0—S6 | -0,5 | -0,62 | -0,76 | -0,45 | 0,53 | 0,72 | 0,82 | 0,78 | 0,69 | 0,8 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| P0—S1 | 0,66 | — | — | 0,6 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| P0 | — | — | -0,55 | — | — | -0,96 | -0,85 | 0,62 | -0,83 | — | — | -0,86 | 0,56 | -0,84 | 0,75 | — | — | — | — | 0,75 |
| PK1—S2 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 0,79 |
| PK1—S6 | — | -0,69 | -0,93 | — | — | — | — | 0,92 | — | 0,92 | — | — | 0,88 | — | — | — | — | 0,62 | — | — |
| S2—S6 | — | — | — | -0,64 | — | — | — | — | — | — | — | 0,68 | — | — | — | — | — | 0,53 | — | — |
| S3—S6 | — | — | — | — | — | — | 0,91 | — | 0,82 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| S4—S6 | — | -0,9 | — | — | — | 0,85 | — | — | — | — | — | 0,62 | 0,93 | — | — | — | — | — | 0,51 | — |
| P2—S6 | — | — | — | -0,81 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 0,63 | — | 0,47 | 0,64 | — | — | 0,5 |
| S5—S6 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 0,73 | — | — | — | — | — | — | — | — |

стратиграфических горизонтов, из некоторых горизонтов, неоднородных по составу, было исследовано по 3—4 образца.

Все кривые однотипны, различие между образцами заключается только в величине части J_s , оставшейся после нагрева свыше 600 °С. Эта величина варьирует от 3 до 15 % от начального значения J_s . Начальное значение J_s во втором нагреве (J_{s2}) составляет 0,8—0,9 от J_{s1} , т. е. намагниченность насыщения несколько уменьшается, что, вероятно, объясняется небольшой степенью окисления титаномагнетита. Остаточная часть J_s после 600 °С обусловлена присутствием гематита и парамагнитных минералов, для разделения вклада которых проведенных экспериментов недостаточно. О несомненном присутствии в небольшом количестве гематита (возможно, и/или гетита) свидетельствуют, во-первых, значения параметра S , устойчиво отличающиеся от единицы по всему разрезу; во-вторых, высокие значения остаточной коэрцитивной силы B_{cr} (~50 мТл в горизонтах P0—S4 и 50 и 65 мТл в горизонтах S5—S6, см. рис. 9), не характерные для титаномагнетитов/магнетитов.

Отношения магнитных характеристик (B_{cr}/B_c , J_r/J_f , χ_{LF}/J_r) оценивают эффективные размеры магнитных зерен на качественном уровне и относятся к структурно-чувствительным параметрам. Судя по поведению данных отно-

шений, относительно мелкие зерна содержат магнитные фракции отложений верхней части разреза (P0—S1) и ископаемой почвы P2. Уменьшение значений обсуждаемых отношений в горизонте S5 можно отнести за счет изменения состава магнитной фракции. При увеличении структурно-чувствительных отношений отмечается увеличение размеров магнитных зерен в песчаном прослое и верхней почве педокомплекса PK1, а также в середине горизонта S2. В целом, более крупнозернисты по магнитному зерну отложения PK1—S3 и S5 (низ)—S6.

Колебания состава магнитной фракции отложений (параметр S) совпадают с вариациями содержания крупноалевритовой фракции, коэффициент корреляции $R=0,6$. Этот коэффициент увеличивается до значения 0,82 в нижней части разреза (S4—S6), поскольку верхняя часть разреза (PK1—P0) характеризуется отрицательной связью рассматриваемых параметров ($R=-0,5$), но довольно тесной положительной связью между параметром S и содержанием песчаной фракции ($R=0,72$). Таким образом, колебания состава магнитной фракции, как и концентрации магнитных минералов, в верхней части связаны с песчаной фракцией, в средней и нижней части — с крупноалевритовой фракцией.

Полуколичественные оценки содержания магнетита в отложениях и эффективных раз-

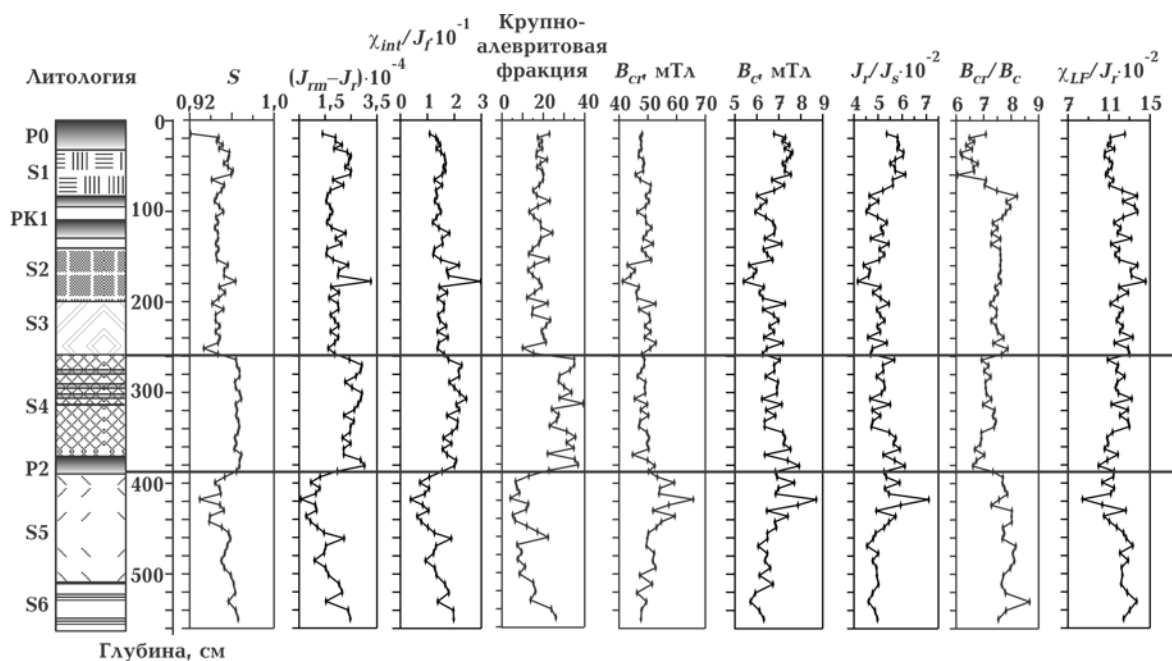


Рис. 9. Изменение коэрцитивных магнитных характеристик и их соотношений по глубине: S — параметр магнитной жесткости; B_c , B_{cr} — коэрцитивная сила, остаточная коэрцитивная сила соответственно; $(J_m - J_r)$ — характеристика магнитной вязкости.

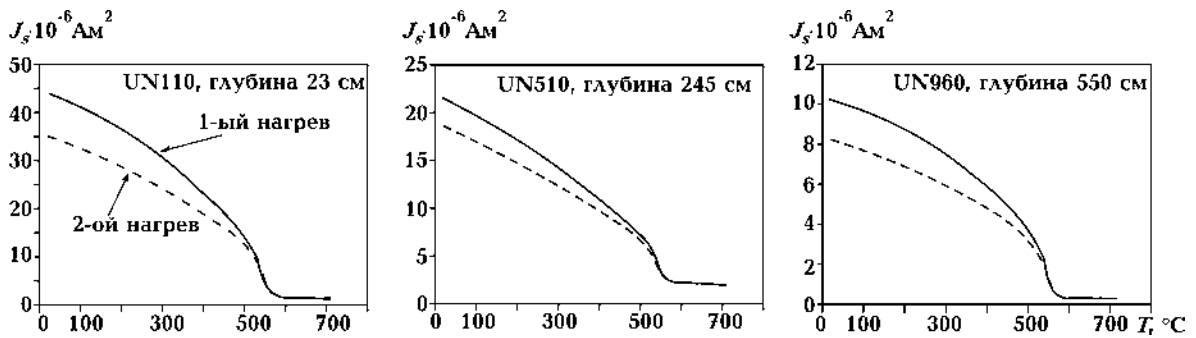


Рис. 10. Температурное поведение намагниченности насыщения (J_s) при двух последовательных нагревах до 710°C .

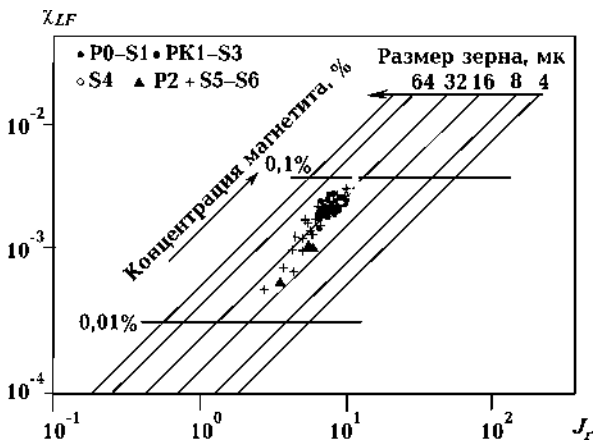


Рис. 11. Оценка концентрации и размеров зерен магнетита в горных породах и рыхлых отложениях.

меров его частиц можно получить, используя диаграмму Томпсона—Олдфилда [Thompson, Oldfield, 1986] (рис. 11), из которой следует, что в большей части изучаемых рыхлых отложений концентрация магнетита $0,03\text{—}0,1\%$, размеры частиц магнетита около $30\text{—}50\text{ мкм}$. Учитывая разницу в удельном весе кварца и магнетита более чем в 2 раза, можно убедиться, что основная масса магнетита переносится в составе крупноалевритовой фракции ($50\text{—}100\text{ мкм}$).

Интересно проанализировать связь между размерами магнитных и обломочных (преимущественно) кварцевых частиц. Соответствующие коэффициенты корреляции приведены в табл. 2. Анализ таблицы показывает, что, как и в случае всех остальных параметров, связь между магнитными и гранулометрическими показателями размеров зерен различна для верхней и средне-нижней частей разреза. Теснее других показателей со средним размером обломочного зерна в средней и нижней частях разреза связано отношение B_{cr}/B_c .

Таким образом, изучение магнитных свойств и их связи с гранулометрическим составом рыхлых отложений, вскрытых котлова-

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между магнитным и обломочным размером (D_{cp}) зерна

| Стратиграфический горизонт | χ_{LF}/J_r | B_{cr}/B_c |
|----------------------------|-----------------|--------------|
| P0 | -0,89 | -0,93 |
| S3—P2 | 0,68 | — |
| P0—S6 | — | 0,5 |
| S6 | 0,66 | — |
| PK1—S6 | — | 0,62 |
| S2—S6 | — | 0,73 |
| S4—S6 | — | 0,82 |

ном на площадке строительства нового корпуса НГУ, показало, что:

- покровные отложения мощностью $5,5\text{ м}$ представляют собой переслаивание различных песчаных разностей и горизонтов ископаемых почв;
- наиболее четко границы горизонтов и подгоризонтов устанавливаются по изменению содержания грубозернистых фракций — песчаной и крупного алеврита;
- магнитные свойства обусловлены магнитными минералами крупноалевритовой фракции с преимущественными размерами магнитных частиц $30\text{—}50\text{ мкм}$;
- основной носитель магнитных свойств всех отложений — высокожелезистый титаномагнетит, близкий по составу к чистому магнетиту, его концентрация в отложениях варьирует в пределах $0,03\text{—}0,1\%$. В магнитной фракции в небольшом количестве присутствует магнитожегкий минерал, это, вероятно, гематит и/или гетит;
- по изменению гранулометрического состава и большинства магнитных параметров в разрезе выделяются две литолого-генетические границы разного уровня, разделяющие отложения по обстановкам

осадконакопления и условиям их седиментации;

- верхняя часть разреза, состоящая из современной почвы и подстилающего ее песчаного горизонта, отличается от остальной части разреза противоположным характером корреляционных связей между гранулометрическим составом отложений и магнитными характеристиками, что можно объяснить продолжением процессов современного почвообразования в верхних 80 см разреза. Из этого следует, что изучение только верхней части рыхлых отложений до глубины около 0,8—1,0 м может не дать адекватного представления обо всем разрезе в целом, поэтому рекомендуется опробовать рыхлые отложения на глубину не менее 5 м.

Электрические свойства рыхлых отложений, их связь с гранулометрическим составом и магнитными свойствами. Протекание постоянного электрического тока в рыхлых осадочных породах обусловлено ионной электропроводностью. Таким образом, УЭС рыхлых пород будет зависеть от количества воды в порах и концентрации растворенных солей. Кроме того, на электросопротивление опосредовано влияет и дисперсность (гранулометрический состав) отложений. Чем выше дисперсность, тем больше пористость и удельная поверхность порового пространства, соответственно выше влагоемкость грунта. В общем, с увеличением дисперсности грунтов в ряду песок—алеврит—супесь—суглинки—глина УЭС уменьшается.

На резистивной модели разреза (см. рис. 1, а) верхний горизонт просадочных грунтов выделяется как один слой высокого сопротивления. Для грубой оценки границ его распространения такой разрешающей способности электротомографии вполне достаточно. Для изучения распределения УЭС внутри слоя просадочных грунтов были выполнены детальные измерения электросопротивления по разрезу. Измеренное УЭС сопоставлено с расчленением разреза по гранулометрическому составу и геологическим описанием обнажения. На рис. 12 показано распределение ρ_k выделенных литологических разностей по глубине. Сопротивление слоя определялось как среднее арифметическое в соответствующем интервале глубин.

Каждому выделенному по литологическим признакам слою соответствует определенное значение ρ_k . Максимальными значениями ρ_k характеризуются песок алевритистый в при-

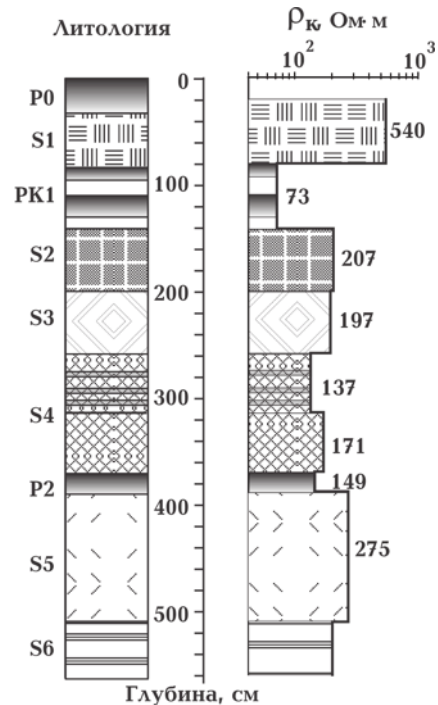


Рис. 12. Распределение усредненных значений ρ_k слоев по глубине по данным измерений на стенке обнажения.

поверхностной части разреза (S1) и горизонт косослоистых песков S5. Погребенные почвы выделяются пониженными значениями ρ_k на фоне УЭС песчаных слоев. На примере слоя S4 видно, что даже незначительные колебания в гранулометрическом составе отложений в пределах одного стратиграфического комплекса проявляются в изменении УЭС. Тонкие слои глинистого алевропеска в подгоризонте S4a заметно понижают ρ_k по отношению к сопротивлению алевропеска в подгоризонте S4b.

Корреляционный анализ показал, что взаимосвязи между электросопротивлением и гранулометрическим составом отложений имеют обратный характер по сравнению со связями между магнитными характеристиками и гранулометрическим составом отложений (см. табл. 1). Электросопротивление отложений по всему разрезу, за исключением верхнего горизонта S1, прямо коррелирует с содержанием песчаной фракции (рис. 13), в то время как большинство магнитных характеристик (в основном это концентрационно-зависимые параметры) определяется содержанием крупноалевритовой фракции, а не песчаной. Содержание всех остальных фракций отрицательно коррелирует с изменением электросопротивления, в отличие от магнитных характеристик, имеющих прямую корреляцию со всеми фрак-

Таблица 3. Коэффициенты корреляции между электросопротивлением (ρ_k) и содержанием гранулометрических фракций

| Стратиграфический горизонт | Песчаная фракция | Крупноалевритовая фракция | Мелкоалевритовая фракция | Глинистая фракция |
|----------------------------|------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------|
| S1 | -0,44 | 0,59 | -0,43 | 0,4 |
| PK1—S6 | 0,65 | — | -0,66 | -0,61 |
| S2—S6 | 0,7 | -0,7 | -0,56 | — |
| S4—S6 | 0,74 | -0,74 | -0,61 | — |

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между электросопротивлением (ρ_k) и некоторыми магнитными характеристиками

| Стратиграфический горизонт | χ_{LF} | J_r | J_p | B_{cr}/B_c | S | B_{cr} |
|----------------------------|-------------|-------|-------|--------------|-------|----------|
| S1 | 0,81 | 0,72 | — | — | — | -0,74 |
| S1—PK1 | 0,69 | 0,67 | -0,71 | -0,78 | 0,78 | — |
| S2—S6 | -0,58 | -0,64 | — | 0,64 | — | — |
| S3—S6 | -0,65 | -0,73 | — | 0,68 | -0,51 | — |
| S3—S4 | — | — | -0,68 | — | — | 0,56 |
| S4—S6 | — | — | -0,73 | 0,72 | -0,68 | — |
| PK1—S6 | — | — | -0,64 | — | — | — |
| PK1—S2 | — | — | — | — | — | -0,68 |
| S5 (низ)—S6 | -0,82 | -0,83 | -0,78 | — | -0,86 | 0,7 |
| S3—S4 (верх) | -0,78 | — | — | 0,61 | — | — |
| S4 (низ)—S5 (верх) | — | — | — | 0,84 | — | 0,66 |

циями за исключением песчаной. В обоих случаях эти связи достаточно сильны в отдельных горизонтах, но ослабляются при рассмотрении всего разреза в целом (табл. 1, табл. 3).

Подобное изменение характера корреляционных связей по разрезу, как и у магнитных параметров с гранулометрическим составом, наблюдается и для электросопротивления. Верхняя часть разреза (здесь она представлена только горизонтом S1) показывает противоположную по знаку корреляцию между гранулометрическим составом и электросопротивлением по сравнению с остальной частью разреза.

Как видно из табл. 4, противоположная по знаку корреляция для верхнего песчаного горизонта (в некоторых случаях и для нижележащего PK1), с одной стороны, и остальной части разреза, с другой стороны, имеет место и между электрическими и магнитными параметрами отложений разреза. В большей (нижней) части отложений концентрационно-зависимые магнитные характеристики (χ_{LF} , J_r , J_p) и параметры, характеризующие состав магнитной

фракции (B_{cr} , S), связаны обратно пропорционально с электросопротивлением отложений. Это означает, что чем больше магнитных и парамагнитных минералов в составе отложений, тем меньше электросопротивление отложений, и, наоборот, чем больше в магнитной фракции магнито жестких минералов, тем выше электросопротивление. Такие закономерности могут быть объяснены как свойствами самой магнитной фракции (высокая концентрация проводящих зерен, наличие окисленных зерен с слабопроводящей гематитовой оторочкой и др.), так и структурой самой матрицы осадка (пористость за счет увеличения пространства между крупными зернами и водонасыщенность за счет повышенного содержания глинистой фракции).

В верхней части разреза (горизонты S1, PK1) картина обратная: чем больше ферромагнетиков и выше содержание магнитомягких минералов, тем выше электросопротивление отложений. По-видимому, это является отражением продолжающегося процесса современного почвообразования, существенно изменяющего

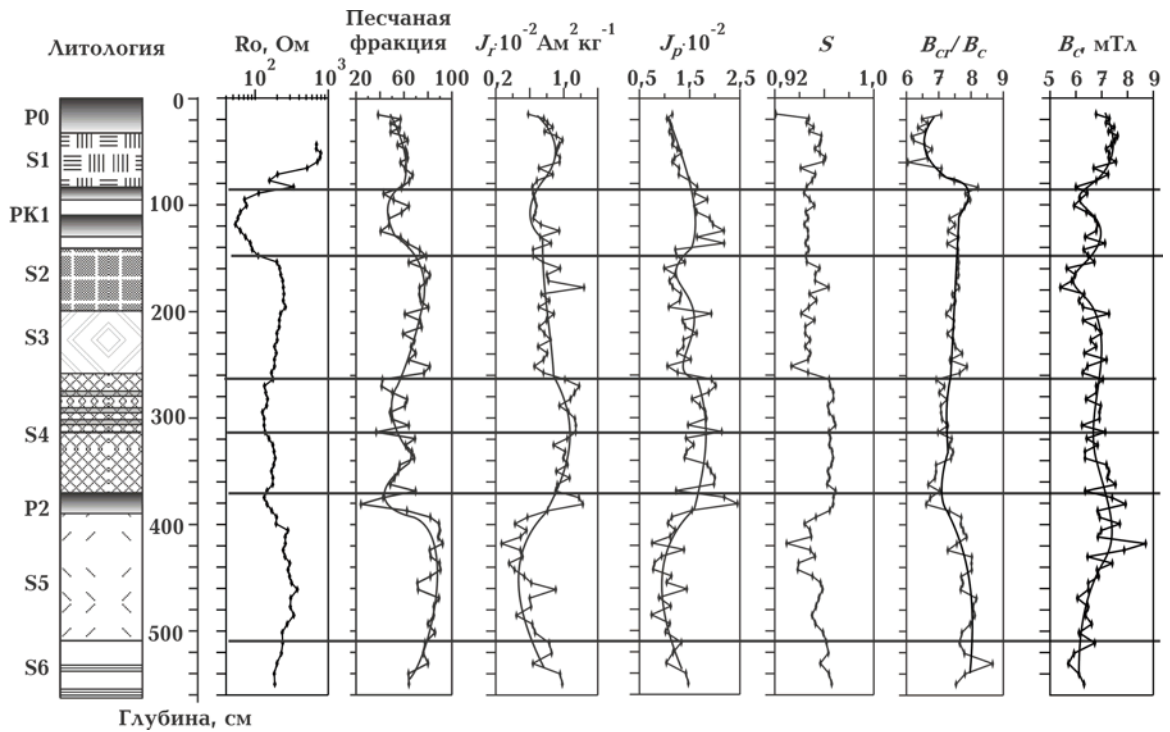


Рис. 13. Изменение ρ_k отложений по глубине разреза в сравнении с гранулометрическим составом и магнитными характеристиками.

физические и электрические свойства приповерхностного горизонта.

Наиболее сильные колебания электросопротивления (на порядок) характерны для верхней части разреза (S1—PK1), в остальных отложениях электросопротивление плавно изменяется в пределах 150—250 Ом. Изрезанность магнитных и гранулометрических кривых намного выше, поэтому на рис. 13 приведены сглаживающие кривые для тех и других параметров. Границы, выделенные по небольшим скачкам электросопротивления, в большинстве случаев совпадают с литологическими границами и наиболее резкими изменениями магнитных параметров.

Выводы. Данные электрических зондирований показали, что грунты верхней части разреза, обладающие просадочными свойствами, характеризуются аномально высокими значениями УЭС по сравнению с остальной части разреза. Они распространены на глубину порядка 5 м.

Полевое геологическое описание искусственного обнажения и результаты лабораторных гранулометрических исследований позволили установить, что в верхней части разреза покровные рыхлые отложения мощностью 5,5 м представляют собой переслаивание раз-

личных песчаных разностей и горизонтов ископаемых почв.

По гранулометрическому составу просадочные грунты относятся к алевритистым пескам с содержанием глинистой фракции до 2 % и не могут быть отнесены к супесям, как предполагалось ранее по данным инженерно-геологических изысканий. Наиболее вероятный генезис просадочных грунтов — эоловый. Эти образования покрывают маломощным чехлом аллювиальные отложения р. Обь.

По изменению гранулометрического состава и большинства магнитных параметров в разрезе выделяются две литолого-генетические границы разного уровня, разделяющие отложения по обстановкам осадконакопления и условиям их седиментации (см. рис. 8, 9).

Верхняя часть разреза до глубины 0,8 м, состоящая из современной почвы и подстилающего ее песчаного горизонта, отличается от остальной части разреза аномально высоким УЭС, противоположным характером корреляционных связей между гранулометрическим составом отложений и магнитными характеристиками, что может быть обусловлено продолжением современных постгенетических процессов, прорабатывающих верхние 80—100 см разреза.

Средняя мощность выделенных по гранулометрическим, электрическим и магнитным характеристикам различных стратиграфических горизонтов на данном участке строительства нового корпуса НГУ составляет ~0,5 м. Опробование грунтов на данной территории в скважинах разведочного бурения рекомендуется производить не через 2 м, как предусмотрено методиками, регламентированными государственными стандартами, а через 0,5 м. В этом случае появляется уверенность в том, что разные по своим свойствам отложения будут детально представлены в стратиграфическом разрезе, построенном на стадии опережающих строительство инженерно-геологических изысканий.

Результаты ситового и седиментометрического анализов (стандартные лабораторные анализы) определения гранулометрического состава грунтов дают не точную, а частично смещенную в сторону мелкозернистых фракций картину, в частности, на исследуемом

участке отложения верхней части покрова были отнесены к супеси пылеватой просадочной. Исследования размеров частиц на лазерном седиграфе позволили определить эти отложения, в основном, как пески алевритистые. С этой точки зрения в инженерно-геологических изысканиях, выполняемых на стадии проектирования, рекомендуется переходить на более современные методы исследований фракционного состава рыхлых отложений с использованием аппаратуры мирового уровня.

Учитывая особенности просадочных грунтов субаэрального (золотого) покрова аллювиальных террас р. Обь, представленных на территории Новосибирского Академгородка песками, супесями, суглинками, рекомендуется проведение детальных комплексных исследований инженерно-геологических свойств грунтов на площадках будущего строительства бурно развивающегося Академгородка и технопарка современными методами в референтных (опорных) скважинах или обнажениях.

Список литературы

- Верзилин Н. Н. О классификации осадочных пород при литолого-палеогеографических исследованиях // Геология и геофизика. — 1995. — 36. — № 11. — С. 131—141.
- Инструкция по электроразведке: Наземная электроразведка, скважинная электроразведка, шахтно-рудничная электроразведка, аэроэлектроразведка, морская электроразведка. — Ленинград: Недра, 1984. — 352 с.
- Панин Г. А. Многоэлектродная аппаратура методов сопротивления «Скала-48» // Инженерная и рудная геофизика: матер. конф. — Геленджик: EAGE, 2009. — С. 2.
- Романовский С. И. Физическая седиментология. — Ленинград: Недра, 1988. — 240 с.
- Thompson R., Oldfield F. Environmental Magnetism. — London: Allen and Unwin, 1986. — 229 p.
- Jasonov P. G., Nourgaliev D. K., Bourov B. V., Heller F. A modernized coercivity spectrometer // Geologica Carpathica. — 1998. — 49, № 3. — P. 224—226.