

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Васильчук Ю.К., Пеллинен В.А., Светлаков А.А. Строение, гранулометрический и минералогический состав рыхлых отложений в долине р. Сенца (Восточный Саян) // Арктика и Антарктика. 2024. № 3. DOI: 10.7256/2453-8922.2024.3.71536 EDN: OGNOOY URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=71536

Строение, гранулометрический и минералогический состав рыхлых отложений в долине р. Сенца (Восточный Саян)

Алексеев Сергей Владимирович

ORCID: 0000-0002-3853-5022

доктор геолого-минералогических наук

заведующий лабораторией; лаборатория гидрогеологии; Институт земной коры СО РАН

664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128

✉ salex@crust.irk.ru



Алексеева Людмила Павловна

ORCID: 0000-0001-5687-4143

доктор геолого-минералогических наук

ведущий научный сотрудник; лаборатория гидрогеологии; Институт земной коры Сибирского отделения РАН

664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128

✉ lalex@crust.irk.ru



Васильчук Юрий Кириллович

доктор геолого-минералогических наук

профессор, географический факультет МГУ

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1

✉ vasilch_geo@mail.ru



Пеллинен Вадим Александрович

ORCID: 0000-0003-2181-5594

кандидат геолого-минералогических наук

научный сотрудник; лаборатория гидрогеологии; Институт земной коры СО РАН

664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128

✉ vadim.a.pellinen@ya.ru



Светлаков Артем Александрович

ORCID: 0000-0003-2002-4790

кандидат геолого-минералогических наук

научный сотрудник; лаборатория гидрогеологии; Институт земной коры СО РАН

664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128



✉ sir.swetlackov@yandex.ru

[Статья из рубрики "Природные ресурсы Арктики и Антарктики"](#)**DOI:**

10.7256/2453-8922.2024.3.71536

EDN:

OGNOOY

Дата направления статьи в редакцию:

21-08-2024

Дата публикации:

28-08-2024

Аннотация: Статья посвящена комбинированному анализу литологического, гранулометрического и минералогического состава рыхлых отложений бассейна р. Сенца (Окинское плоскогорье, Восточный Саян). Комплексные аналитические исследования и буровые работы были направлены на изучение озерных, речных и моренных отложений, выполняющих долину реки, с целью реконструкции условий их накопления. Для анализа гранулометрического и минералогического состава рыхлых отложений были отобраны образцы песка в береговом уступе р. Сенца, образцы отложений из стадиальных и конечных моренных валов и керн из скважины, пробуренной в 100 м от русла. Гранулометрический анализ, выполненный ситовым и лазерным дифракционным методами, позволил установить последовательность отложения осадков в подпорном палеоводоеме и положение палеокровли мерзлой толщи (на глубине 1.2 и 2.1 м). Минералогический состав аллювиальных песков, определенный иммерсионным методом, подтвердил преимущественно спокойный водный режим их накопления. Состав моренных отложений и строение моренных валов свидетельствуют о деятельности водных потоков в период таяния ледника, которые формировали «слоеный пирог» конечно-моренного вала, а также стадиальную морену с мощной песчаной толщей (более 3.0 м) в среднем течении р. Сенца. Глубокое бурение позволило впервые установить литологическое строение разреза долины р. Сенца и мощность многолетнемерзлых пород, которая составила 44 м. Скважина глубиной 45.1 м вскрыла разрез, сложенный мерзлыми супесями, суглинками, глинами и песками, а также подмерзлотные подземные воды. Криотекстуры рыхлых отложений преимущественно массивные и редкошлировые, с линзами и прослоями льда мощностью до 8-10 см на разной глубине. Радиоуглеродный анализ отобранного образца керна с глубины 1.5 м показал возраст 3510 ± 120 лет и подтвердил существование открытого водоема в позднем голоцене в долине р. Сенца.

Ключевые слова:

рыхлые отложения, гранулометрический состав, минералогический состав, мощность мерзлоты, криогенное строение, литологический состав, скорость осадконакопления, моренные отложения, радиоуглеродный анализ, Окинское плоскогорье

Введение

Понимание и правильная оценка современных глобальных климатических изменений должны основываться на исследованиях и реконструкции природно-климатических условий прошлого. Позднеплейстоценовое оледенение Восточного Саяна и голоценовая дегляциация обусловили формирование подпрудных озер на Окинском плоскогорье^[1]. В перигляциальной области существовала особая обстановка накопления флювиогляциальных, озерно-аллювиальных, делювиальных и пролювиальных осадков. Динамику осадконакопления в целом характеризуют гранулометрический и минералогический состав отложений, который формируется под влиянием многих факторов – климатических и геологических условий, гидрологических особенностей, гидродинамического режима различных водных систем. Важным показателем для выявления потенциальной среды, движения и динамического состояния частиц рыхлых отложений во время транспортировки является зернистость. В частности, изменение размеров зерен в озерных отложениях обычно дает важную информацию о гидродинамических изменениях в водосборе, что соответствует местному изменению климата^[2,3]. Кроме того, размер зерен осадочных пород, характер окатанности и степень сортировки позволяют установить источник сноса, относительную скорость переноса и условия их образования. Увеличение в осадке объема песчаной фракции и уменьшение глинистой указывает на рост скорости водных потоков; окатанность частиц напрямую зависит от длительности перемещения; на степени сортировки сказывается характер движения водной среды (турбулентный или ламинарный) или отсутствие такового (озерный водоем). Минеральный состав также имеет значение для определения источников питания бассейна обломочным материалом и их изменения во времени^[4-6]. Анализ структурных особенностей и вещественного состава отложений в комплексе с геологическими материалами позволяют выполнить палеогеографические построения для позднечетвертичного периода в одном из бассейнов Окинского плато, уточнить строение долины р. Сенца, включая особенности залегания и распространения многолетнемерзлых пород.

Цель работы – реконструкция режима седиментации рыхлых отложений в долине р. Сенца в голоцене на основе анализа гранулометрического и минералогического состава озерно-аллювиальных, аллювиальных и флювиогляциальных и отложений.

Район исследования

Река Сенца прорезает Окинское плоскогорье (с абс. отм. 1800-2500 м) в пределах юго-восточной части Восточного Саяна. Ее долина представляет собой трог с корытообразным поперечным профилем, крутыми склонами и плоским днищем, с глубиной вреза до 700-800 м. Длина реки небольшая – 55 км – и на всем протяжении ее русло интенсивно меандрирует, за исключением некоторых узких участков, где русло спрямляется (рис. 1). Долина содержит в себе элементы рельефа, образованные деятельностью ледника в позднем голоцене и полностью деградировавшего 14 тыс. лет назад^[1]. Сенцинский ледник оставил конечную морену (валунно-галечные отложения, грубозернистый несортированный материал) протяженностью 8 км и мощностью 90 м в 8.5 км от устья реки, впадающей в р. Оку. При отступании ледника в долине

формировались подпрудные озера, в которых накапливались озерные отложения. Р. Сенца, постоянно меандрируя и меняя местоположение своего русла, перерабатывала неконсолидированные отложения и аккумулировала тонкозернистый материал (супеси, пески). После спуска палеозер происходило прогрессирующее всестороннее промерзание водонасыщенных рыхлых отложений, формирование минеральных бугров пучения на значительной площади, специфического криогенного ландшафта долины.

В целом толща четвертичных рыхлых отложений, выполняющих долину и имеющих различный генезис (гляциальный, флювиогляциальный, аллювиальный, озерный, делювиальный и пролювиальный), представлена глинами, суглинками, супесями, песками, галечниками, валунами.

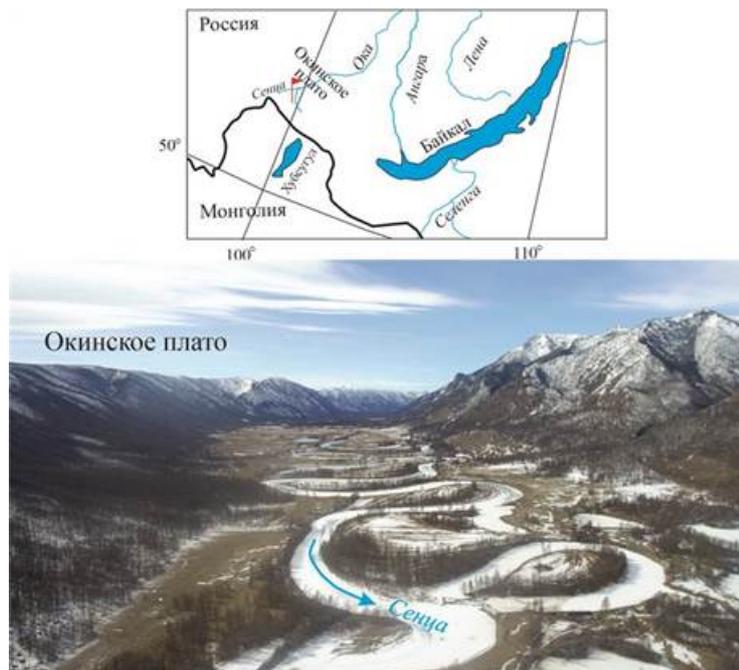


Рис. 1. Местоположение района исследований (красный флажок на схеме) и морфология ландшафта долины р. Сенца (фото внизу. Снимок сделан дистанционным пилотируемым летательным аппаратом DJI Inspire 1 pro, оснащенный фотокамерой Zenmuse 3X (разрешение 3840×2160 пикселей) с пространственным разрешением 5.7–7.8 см/пиксель, высота 500 м, 15 марта 2022 г.).

Материалы и методы исследования

Комплексные исследования в долине р Сенца выполнялись в период 2011-2021 гг. Для анализа гранулометрического и минералогического состава рыхлых отложений были отобраны 18 образцов песка в береговом уступе р. Сенца, 28 образцов отложений из конечно-моренных валов и 15 образцов керн из скважины (координаты объектов указаны в табл. 1).

Гранулометрический анализ образцов выполнен ситовым и лазерным дифракционным методами. Отобранные пробы, высушенные до воздушно-сухого состояния, растирались в фарфоровой ступке пестиком с резиновым наконечником. Разделение грунтов на фракции без промывки водой осуществлялось ситами с размером отверстий 10; 5.0; 2.0 и 1.0 мм. Вес отквартированной пробы составил в среднем 100 г. Взвешенную пробу просеивали через колонку сит с поддоном ручным способом. Потери при просеивании распределены по всем фракциям пропорционально их весу. Результаты анализа представлены в табличной форме. Анализ фракций 2.0–0.00008 мм выполнен с помощью

лазерного дифракционного анализатора размеров частиц «ANALYSETTE 22» NanoTec (FRITSCH GmbH, Germany) класса High-End. Навеска образца 2-15 г помещалась непосредственно в ванночку диспергирования на путь лазерного луча. В результате отклонение пучка лазерного излучения формировалось кольцеобразное распределение интенсивности, которое измерено детектором. По ширине колец и расстоянию между ними рассчитан размер частиц. Программное обеспечение MaScontrol отобразило полученные результаты в виде кумулятивной кривой и табличного распределения частиц.

Таблица 1. Координаты расчисток и скважины

Объект		Координаты	Абс. высота, м	Высота расчистки, глубина скважины, м
Расчистки в береговом уступе	Se-14-2	52°39'45.59 '' с.ш. 99°30'06.09 '' в.д.	1381	4.1
	Se-20-3	52°39.768' с.ш. 99°30.08' в.д.	1386	2.25
Расчистки в пределах моренных валов	Se-17-2-mor1		1403	1.1
	Se-17-2-mor2	52°40'03.30 '' с.ш.	1393	0.9
	Se-17-2-mor3	99°30'35.00 '' в.д.	1382	1.4
	Se-17-2-mor4		1364	1.0
	Se-19-R1	52°38'08'' с.ш. 99°26'56.96 '' в.д.	1383	2.5
	Se-19-R2	52°37'59.58 '' с.ш. 99°27'06.39 '' в.д.	1388	4.0
Скважина	Se-20-скв. 5	52°39'50.11 '' с.ш. 99°30'03.54 '' в.д.	1380	45.1

Рентгенофлуоресцентный анализ песков (9 проб) выполнен на оборудовании ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН (оператор – ведущий инженер М. Н. Рубцова). Для определения минерального состава образцы проб, истертые в агатовой ступке со спиртом, исследованы методом порошковой дифракции на дифрактометре ДРОН – 3.0, излучение – CuK α , Ni – фильтр, V= 25 кВ, I = 20 мА, в диапазоне 3 – 65°2 θ , шаг сканирования – 0.05°. Для идентификации глинистых минералов осуществлялась подготовка ориентированного материала проб осаждением

глинистой фракции на стеклянной подложке, прогреванием при температуре 550° в течение 3-х часов и насыщением этиленгликолем [7]. Фазовый состав проб расшифрован с помощью программы EVA (DiffraPlus, PDF-2, 2007 г.). Приведены данные полуколичественного анализа определенных фаз в пробах, расчеты проведены методом RIR по корундовым числам минеральных фаз из кристаллографической базы данных PDF-2 [8].

Количественный минералогический анализ производился иммерсионным методом [9] (оператор – ведущий инженер И. А. Калашникова). Исследована гранулометрическая фракция 0.25-0.05 мм, предварительно разделенная в бромформе на легкую и тяжелую части. Препарат, в котором должно содержаться не менее 500 зерен, приготовлен методом квартования. Иммерсионная жидкость имела показатель преломления для легкой фракции 1.540 и 1.530, для тяжелой фракции – 1.630. Диагностика и подсчет минералов осуществлялись с помощью микроскопа Микромед и поляризационного микроскопа МИН-8.

Скважина глубиной 45 м пробурена с использованием буровой установки УРБ 2А2 (ООО «ИНГЕО», г. Иркутск). Отбор керна осуществлялся через 0.5-0.8 м.

Радиоуглеродный анализ 5 образцов рыхлых отложений с растительными остатками, отобранных из расчисток и скважины, выполнен в Томском ЦКП СО РАН (ИМКЭС СО РАН (оператор – ведущий научный сотрудник Г. В. Симонова). Анализы активности радиоизотопа углерода проводились жидкостно-сцинтилляционным методом с использованием ультра-низкофонового спектрометрического радиометра Quantulus 1220, производства фирмы Wallac Oy, Финляндия. Прибор обеспечивал фон по ^{14}C – 0.4 СРМ (СРМ – counts per minutes (скоростью счета в минуту)).

Результаты

Литологические и криогенные особенности рыхлых отложений в долине р. Сенца по данным бурения

В 2020 г. впервые на надпойменной террасе в 100 м от русла реки Сенца пробурена глубокая скважина **Se-20-скв. 5** (рис. 2).



Рис. 2. Положение скважины Se-20-скв.5 и расчисток Se-14-2 (синий треугольник) и Se-20-3 (красный треугольник) в береговом уступе р. Сенца.

Глубина скважины составила 45.1 м, разрез сложен супесями, голубовато-серыми суглинками, глинами такого же цвета и песками (детальное описание разреза – на рис.

3). На глубине 1.1 м зафиксирована кровля мерзлоты, подошва многолетнемерзлых пород установлена на глубине 44 м. Льдистость пород уменьшается по глубине от 84-114 % в верхней части (в интервале 1.5-4.5 м) до 20-33 % в нижней части (в интервале 4.5-44 м) разреза. Криотекстуры мерзлых пород преимущественно редкошлировые, массивные, но встречаются линзы и прослои льда толщиной до 8-10 см. На глубине 44 м вскрыт напорный водоносный горизонт, водовмещающие породы представлены песками. Напор над кровлей составил 16.7 м, уровень воды установился на глубине 27.3 м.

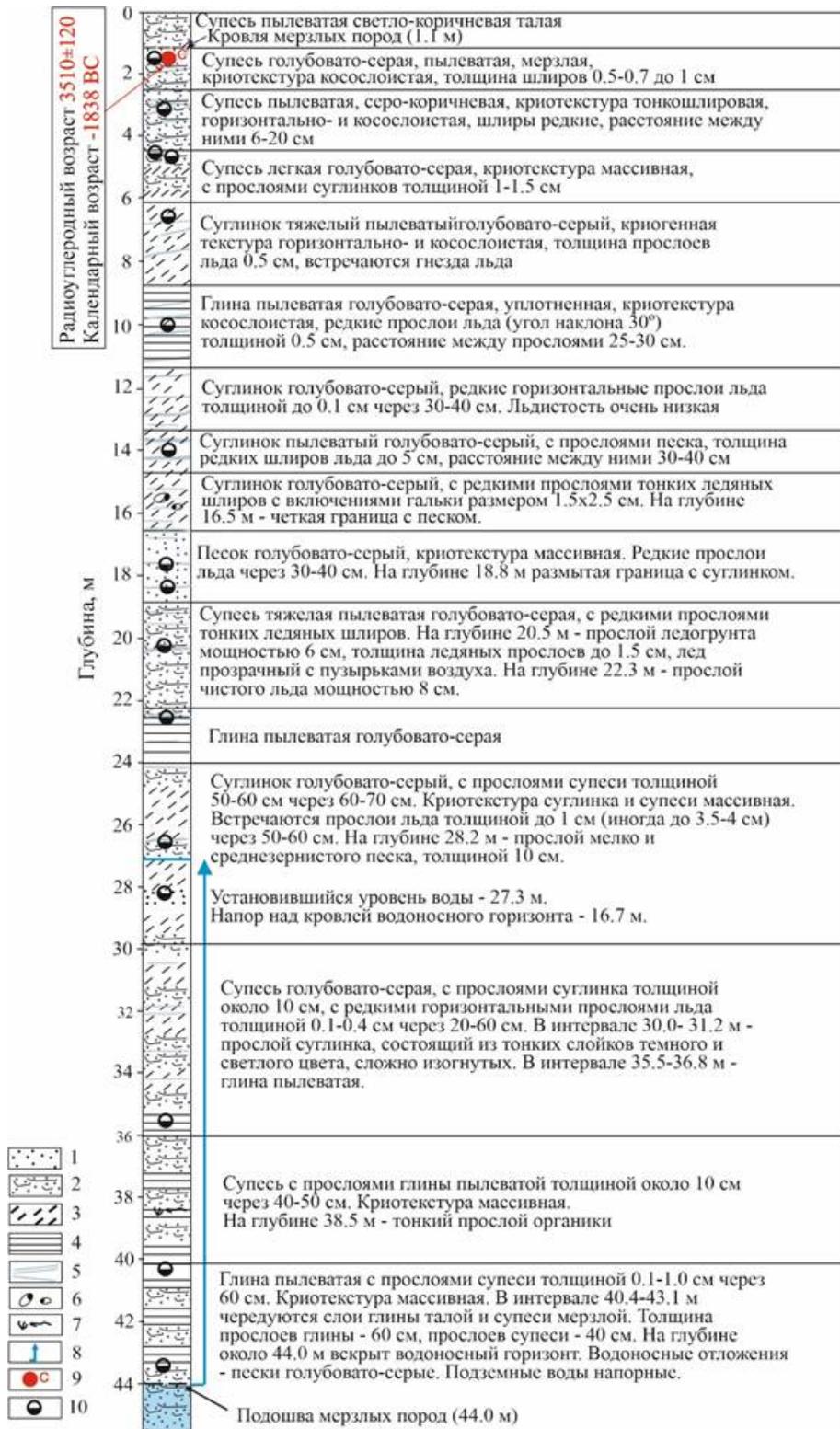


Рис. 3. Литологический состав и криогенное строение разреза скважины Se-20-скв. 5, пробуренной в долине р. Сенца. 1 – песок; 2 – супесь; 3 – суглинок; 4 – глина; 5 – шлиры и прослои льда; 6 – галька; 7 – органика (растительные остатки); 8 – глубина

вскрытия воды и напор над кровлей водоносного горизонта; 9 – место отбора образца на радиоуглерод; 10 – место отбора образцов горных пород на грансостав.

Гранулометрический и минералогический состав песков надпойменной террасы р. Сенца

Расчистки Se-14-2 и Se-20-3 произведены в уступе левого берега р. Сенца на участке крутого (90°) поворота русла на север (см. рис. 2).

В расчистке Se-14-2, которая находится в 50 м выше по течению реки от Se-20-3, кровля мерзлоты зафиксирована в конце июня на глубине 1.05 м (рис. 4). В целом разрез представлен супесями и суглинками голубовато-серого цвета со слоистой и косослоистой криотекстурой, с горизонтальными и косонаклонными линзами льда (толщиной до 5 см). Видимая объемная льдистость довольно высокая – до 50 %. На глубине 3.8 м суглинки сменяются желтовато-серым песком, включающим окатанную гальку и гравий. Контакт неровный с прослоями и гнездами оторфованного и ожелезненного песка. Криотекстура песчаного слоя в интервале 3.8-4.1 м – редко- и неполношлифовая, горизонтально слоистая и массивная.



Рис. 4. Литологический состав и криогенное строение разреза Se-14-2.

Многолетние наблюдения за состоянием уступа реки на этом участке показало, что ежегодно происходит оттаивание рыхлых отложений, их интенсивная термоэрозия в периоды паводков и отступление бровки террасы. В отдельные годы этот процесс сопровождается образованием глубоких полостей в береговом уступе (рис. 5).



Рис. 5. Динамика отступления уступа террасы р. Сенца в результате протаивания сильнольдистых мерзлых суглинков, залегающих на аллювиальных песках и перекрытых супесчаной толщей.

Разрез расчистки Se-20-3 высотой 2.5 м сложен талыми аллювиальными песками. Кровля мерзлоты зафиксирована на глубине от поверхности земли более 2.5 м. Исследования *гранулометрического состава* аллювиальных песков (в разрезе Se-20-3), отмытых, отсортированных и накопленных речной водой в период активного формирования меандры, основаны на анализе дифференциального распределения и кумулятивных кривых 18 образцов (рис. 6), отобранных из интервала разреза 0.1-2.25 м.

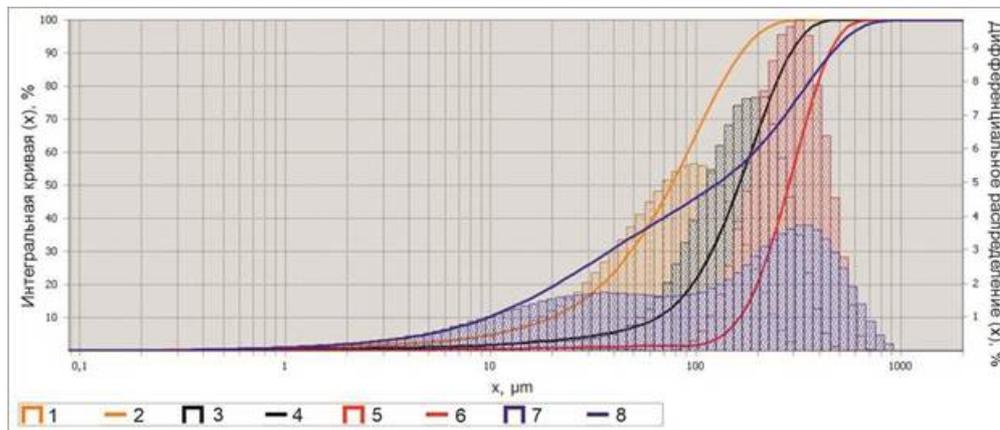


Рис. 6. Результаты гранулометрического анализа отложений из расчистки Se-20-3. Гистограмма (1, 3, 5 и 7) и кумулятивная кривая (2, 4, 6 и 8) для образцов: g41, g42 и g44 (оранжевый цвет); g43 и g45 (черный цвет); g40, g46, g47, g48, g50-g55 и g57 (красный цвет); g49 и g56 (синий цвет).

Три из полученных кумулятивных кривых (2, 4 и 6) демонстрируют однородность частиц, их хорошую и очень хорошую сортированность – коэффициент сортировки So [10] изменяется от 1.55 до 1.99. Четвертая кривая (8) отличается большей размытостью распределения фракций и указывает на среднюю степень сортировки отложений – коэффициент So максимальный (до 3.09). Значение коэффициента асимметрии Sk для всего разреза меньше единицы (0.23-0.96, в среднем 0.75), кроме одного образца с глубины 1.23 м, т.е. в разрезе доминирует крупная фракция.

Анализ гранулометрического состава отложений и сравнение с классификацией фракций И. П. Иванова [11] позволили выделить 4 группы отложений, объединяющие разные фракции песков и характеризующиеся различной степенью сортировки (рис. 7).

К **первой** группе отнесены отложения с крупно песчаной фракцией (0.5-0.25 мм), которые залегают в интервалах 0.80-1.10 м (обр. g46-g48, So 1.29-1.42), 1.55-2.00 м (g52-g55) и в основании расчистки (g57), у уреза воды, т.е. слагают большую часть разреза. Песок в этих слоях очень хорошо сортирован (So 1.34-1.40), отличается высокой степенью однородности.

Вторая группа включает мелкозернистый песок с размером фракций 0.25-0.05 мм (g43 и g45), который прослеживается в слоях небольшой мощности – 0.5-0.15 см. Для группы характерна однородность и хорошая степень сортировки (So 1.56-1.71).

В **третью** группу включены фракции 0,05-0,01 мм – мелко- и тонкозернистый песок, неоднородный и средне сортированный (g40, g41, g42 и g44), залегающий в верхней части уступа до глубины 0.2 м и в интервале 0,6-0,75 м. Для этих фракций характерны высокие значения So (2.04-2.32) и низкие величины коэффициента асимметрии Sk (0.23-0.46).

Четвертая группа резко отличается от описанных трех групп и по более пологой форме кумулятивной кривой, и по наличию крупно- и мелкопылеватых частиц (до 0,002 мм), о чем также свидетельствуют максимальный коэффициент асимметрии Sk 1.15 и минимальный эксцесс Ku 0.19. Она охватывает слои (прослой) песков мелкозернистых, неоднородных и средне сортированных, залегающих на глубине 1.25 и 2.1 м (g49 и g56). Как правило, повышенная пылеватость характерна для пород сезонноталого и сезонномерзлого слоев, которые подверглись циклическим процессам промерзания-

оттаивания, что позволяет идентифицировать слои IV группы песков как положение палеокровли мерзлой толщи.

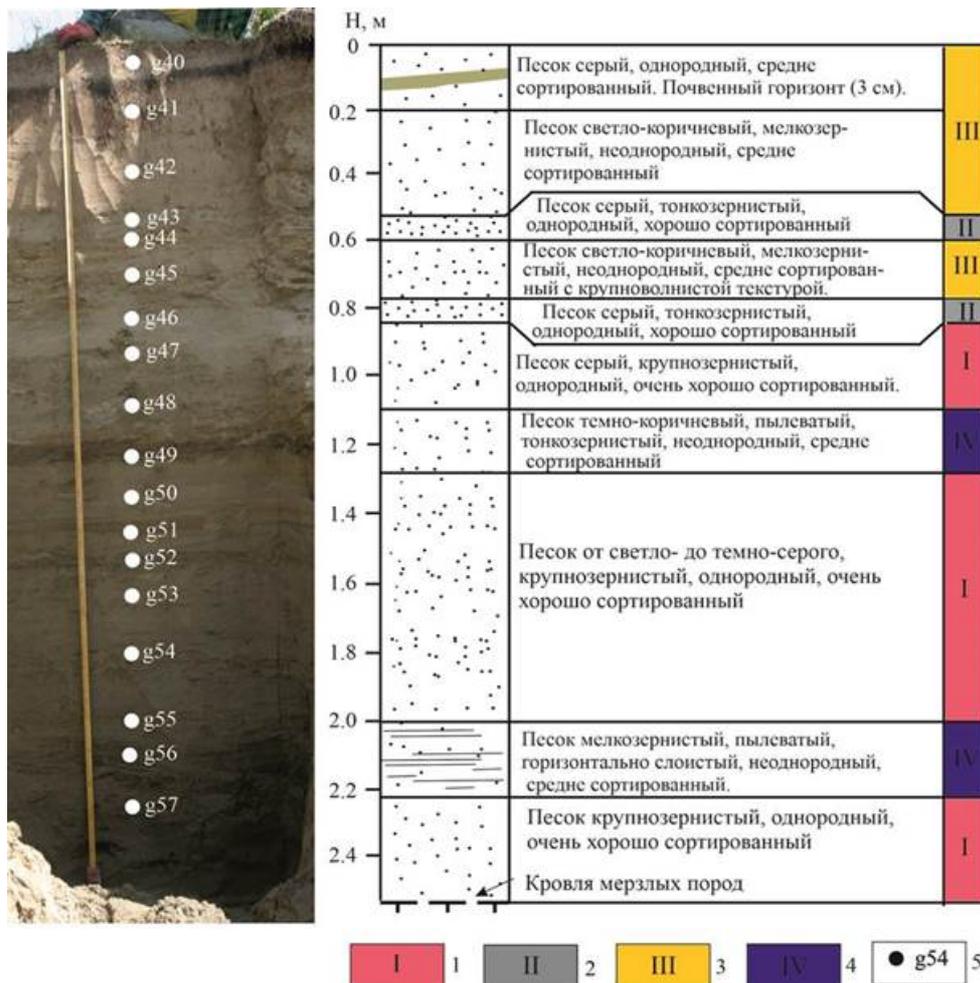


Рис. 7. Литология разреза Se-20-3 и выделенные группы песчаных отложений по гранулометрическому составу: 1 - I группа, 2 - II группа, 3 - III группа, 4 - IV группа, 5 - места отбора образцов и их наименования. Характеристика групп приведена в тексте.

Рентгенофазовый анализ минерального состава пяти проб аллювиальных песков дал возможность получить представление о вещественном составе каждой из выделенных групп (табл. 2), который служит индикатором областей сноса материала. I группа характеризуется максимальным содержанием кварца (55 %) и минимальным - глинистых минералов (около 5 %). Во II группе также превалирует кварц, но в меньшем количестве (40 %), а глинистых минералов больше (до 20 %). Для III и IV группы характерно преобладание полевых шпатов над кварцем и довольно высокое содержание глинистых частиц (20-35 %). Амфибол тремолит-актинолитового ряда присутствует во всех пробах в количестве 5-10 %.

Таблица 2. Результаты рентгенофазового анализа минерального состава аллювиальных песков

№ п.п.	№ образца, глубина отбора (м),	Фазовый состав

	группа	
1	g41 0.2 м III группа	Полевые шпаты (40%±5), кварц (30%±5), амфибол тремолит-актинолитового ряда (~5%), следы кальцита. Глинистые минералы (20%±5): хлорит, гидрослюда, смектит, смешанослойный минерал иллит-смектит, возможно следы каолинита и смешанослойного минерала хлорит-смектит.
2	g44 0.6 м III группа	Полевые шпаты (25%±5), кварц (20%±5), амфибол тремолит-актинолитового ряда (10%±5), кальцит (~5%). Глинистые минералы (35%±5): хлорит, гидрослюда, смектит, смешанослойный минерал иллит-смектит, возможно следы каолинита.
3	g45 0.7 м II группа	Кварц (40%±5), полевые шпаты (25%±5), амфибол тремолит-актинолитового ряда (10%±5), возможно следы пироксена и кальцита. Глинистые минералы (20%±5): хлорит, смектит, гидрослюда, смешанослойный минерал иллит-смектит, возможно следы каолинита.
4	g49 1.23 м IV группа	Полевые шпаты (40%±5), кварц (20%±5), амфибол тремолит-актинолитового ряда (10%±5), следы кальцита. Глинистые минералы (25%±5): хлорит, гидрослюда, смектит, возможно следы смешанослойного минерала иллит-смектит.
5	g57 2.25 м I группа	Кварц (55%±5), полевые шпаты (30%±5), амфибол тремолит-актинолитового ряда (5%±5), следы пироксена и кальцита. Глинистые минералы (~5%): хлорит, гидрослюда, смектит, смешанослойный минерал иллит-смектит, возможно следы каолинита.

Количественный анализ минералогического состава песков выполнен на основе иммерсионного метода, исследована гранулометрическая фракция 0.25-0.05 мм. Степень окатанности зерен различна – от полуокатанных и окатанных частиц до остроугольных, угловатых обломков, которые преобладают и в тяжелой, и в легкой фракции.

Изучение минералогического состава песков, слагающих уступ левого берега р. Сенца показало, что тяжелая фракция представлена амфиболом – в среднем 44 %, диопсидом и гиперстеном – 8-12 % (только на глубине 0.7-1.25 м), биотитом – 10 % (на глубине 0.6 м); остальные минералы (ильменит, гранат, циркон, рутил, сфен, тремолит, магнетит, эпидот, апатит, турмалин, ставролит, дистен, силлиманит и хлорит) встречаются или единичными зернами, или их содержание не превышает 1-4% (рис. 8).

Значительную часть проанализированных образцов составляют обломки пород (до 63 % общего веса тяжелой фракции), представляющие собой черно-серые полублестящие частицы, относительно мягкие с серой крошкой (вероятно, примесь угля, хлорита, зернистого эпидота и амфибола). Среди минералов легкой фракции преобладает биотит (в среднем 48.8 %), содержание плагиоклаза и кварца достигает 44 и 34 % соответственно на глубине 2.25 м, составляя в среднем по разрезу 24 и 16 %. Содержание К-полевых шпатов и мусковита не превышает 8 %, а хлорит, графит и карбонаты составляют десятые доли % или проявляются как редкие знаки. В песке на глубине 0.7 и 1.25 м встречаются редкие знаки (<0.001 %) углефицированных растительных остатков – хрупких, черных полублестящих удлинённых фрагментов.

Карбонаты, присутствующие в песках в виде редких мелких зерен, могут быть, по-видимому, отнесены к диагенетическим новообразованиям [\[12\]](#).

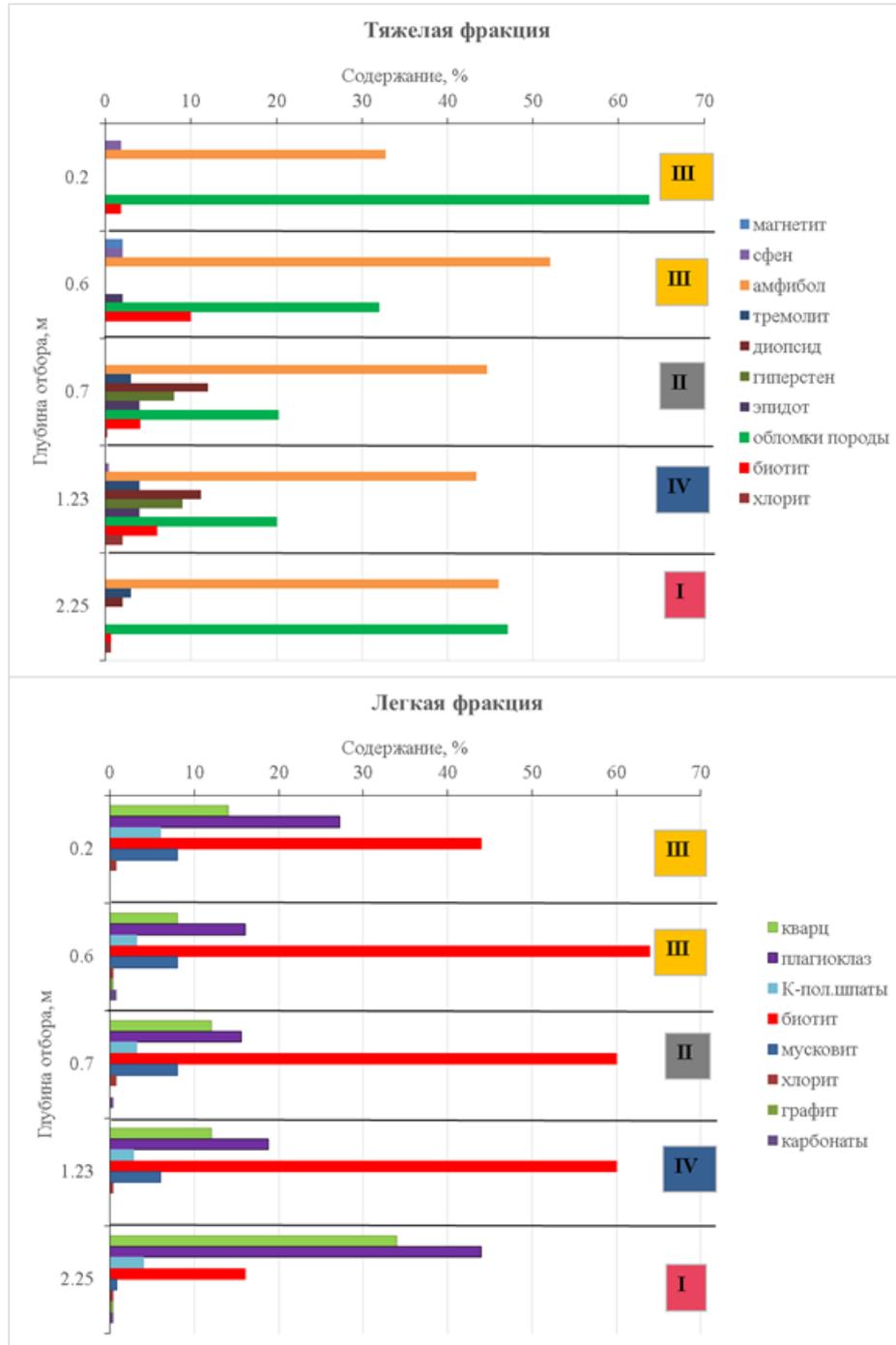


Рис. 8. Содержание минералов тяжелой и легкой фракции в песках.

Гранулометрический и минералогический состав отложений конечной морены

Отложения конечной морены изучены по четырем расчисткам: **Se-17-2-mor1**, **Se-17-2-mor2**, **Se-17-2-mor3**, **Se-17-2-mor4**, выполненным в пределах вала конечной морены в долине р. Сенца у оз. Хухэ-Нур (рис. 9).



Рис. 9. Фото и схема положения конечной морены у оз. Хухэ-Нур (красный квадрат – местоположение расчисток Se-17-2-mor1, mor2, mor3, mor4).

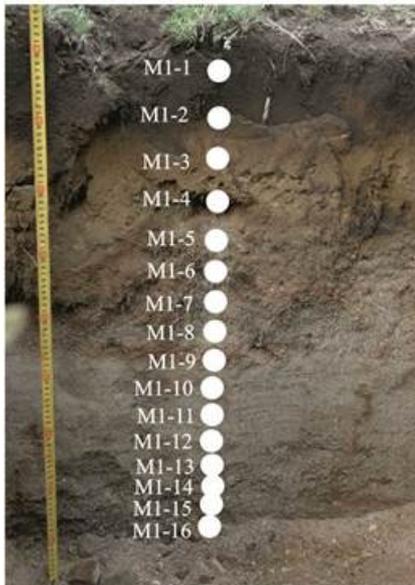
Высота вала над урезом воды 24 м, четыре расчистки (высотой от 0.9 до 1.4 м) сверху вниз характеризуют разрез моренных отложений (рис. 10 А и Б). В целом вал конечной морены на исследованном участке сложен средне-крупнообломочным материалом с песчаным заполнителем. Результаты *гранулометрического анализа* (рассева) моренных отложений Se-17-2 представлены в таблице 3.

Таблица 3. Гранулометрический состав моренных отложений в разрезе Se-17-2

Расчистка	№ пробы	Глубина отбора, м	Содержание фракций, %							
			>10	10-7	7-5	5-3	3-2	2-1	1-0.5	<0.5
	1	0.1	1.1	0.2	0.2	0.5	1.6	11.1	7.8	77.5
	2	0.1-0.35	-	0.9	-	1.4	2.8	14.5	11.2	69.2
	3		-	-	0.6	1.0	2.2	10.5	6.4	79.3
	4		0.8	1.2	1.7	1.4	1.2	5.7	5.6	82.4
	5		-	3.3	2.6	2.5	1.2	3.9	6.3	80.2
	6		2.6	2.3	1.2	1.8	1.5	7.5	9.5	73.6
	7		3.2	0.4	0.7	1.2	4.5	12.3	12.2	65.5

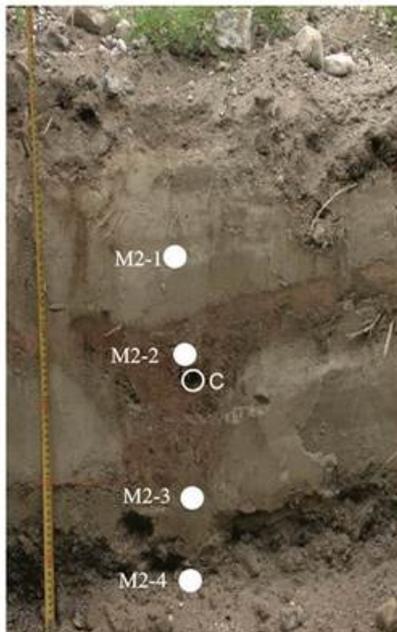
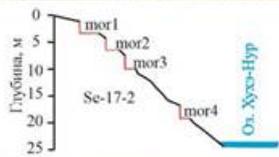
mor1	8	0.35-0.5	1.5	3.3	4.4	6.6	6.5	16.9	12.8	48.0
	9		11.5	5.2	6.7	10.3	9.9	20.9	10.2	25.3
	10		3.5	4.2	4.8	11.5	9.3	24.8	11.7	30.2
	11	0.5-0.9	-	-	0.7	3.8	8.6	35.0	20.0	31.9
	12		-	-	0.9	1.9	3.8	23.8	19.9	49.7
	13		-	-	0.3	0.4	1.0	25.0	18.0	55.3
	14	0.9-1.0	-	-	0.1	0.9	2.9	30.5	17.9	47.7
	15		0.7	1.7	2.0	4.8	6.4	38.6	12.5	33.3
	16		9.0	1.1	3.0	8.5	9.7	38.2	6.3	24.1
mor2	1	0.22	-	-	-	-	0.2	0.8	0.3	98.7
	2	0.37	-	-	0.1	0.2	0.5	1.7	0.9	96.6
	3	0.62	-	-	-	0.4	0.4	0.3	0.5	98.4
	4	0.74	22.6	10.6	10.1	14.2	10.3	16.5	5.3	10.4
mor3	1	0.40	0.7	0.1	0.5	0.6	1.0	8.9	9.8	78.4
	2	0.75	-	0.1	1.0	1.5	1.9	14.1	12.4	69.0
	3	1.10	-	0.8	0.5	1.1	1.8	21.5	26.1	48.2
mor4	1	0.31	-	-	0.2	0.6	1.6	10.5	3.4	83.7
	2	0.56	1.6	0.8	0.6	2.7	4.0	16.4	14.2	59.7
	3	0.76	-	0.2	0.3	1.2	2.6	13.6	11.8	70.3
	4	0.84	2.2	-	0.1	0.9	3.5	17.9	14.7	60.7
	5	0.89	20.0	2.6	3.1	5.6	4.5	11.3	7.4	45.5

A



Se-17-2-mor1
расчистка 1, Н 1403 м абс.

0		Почвенный горизонт, темно-коричневая супесь
20		Песок мелко- и тонкозернистый, пронизанный тонкими корнями растений
40		Песок крупнозернистый с гравием, размером 0.5-1.0 см
60		Песок серый крупнозернистый с редким мелким гравием (0.3-0.4 см)
100		Гравийно-галечные отложения (размер до 5 см), местами ожеженные, заполнитель - разнозернистый песок



Se-17-2-mor2, расчистка 2,
ниже по склону от расчистки 1 на 10.8 м (Н 1393 м абс.)

0		Оторфованный песчаный горизонт
20		Песок серый мелко- и среднезернистый с прослоями крупнозернистого песка
40		Песок серый мелко- и среднезернистый с прослоями и карманами погребенной почвы бурого цвета (с остатками детрита размером 5-15 см) и линзами серой супеси
80		Гравийно-галечные отложения с окатанными валунами размером до 20 см

Б

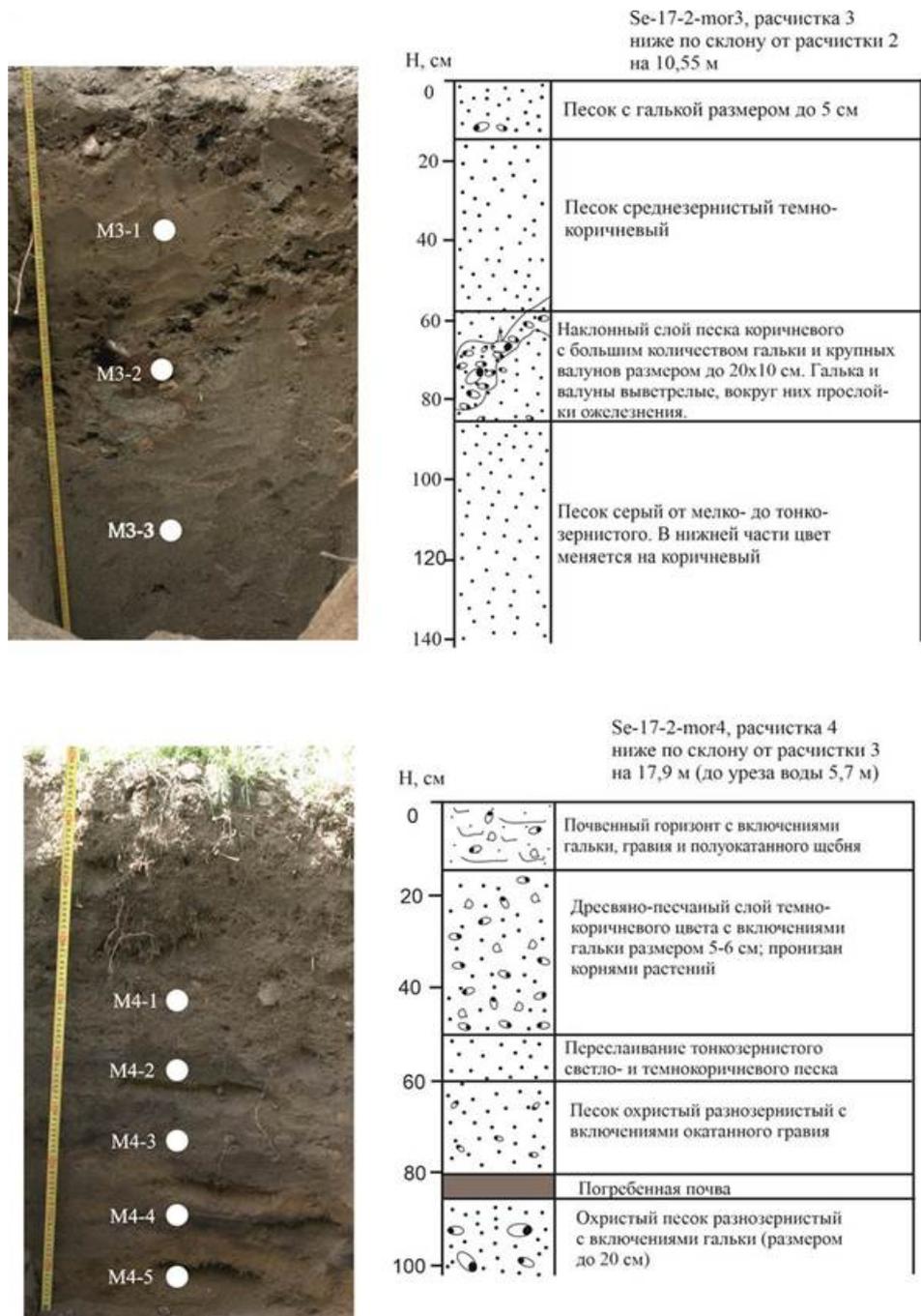


Рис. 10. Литология и строение отложений конечной морены в разрезе Se-17-2: А – расчистки mor1 и mor2, Б – расчистки mor3 и mor4. 1 – гравийно-галечник; 2 – песок; 3 – супесь; 4 – погребенная почва; 5 – место отбора проб на грансостав и радиоуглеродное датирование.

Незалесенная поверхность вала покрыта гравийно-галечно-валунным материалом с обломками пород различного цвета – от темно-серого до белого – и различной степени окатанности. Вмещающие пески различной зернистости, коричневого и серого цвета. В вертикальных разрезах на разной глубине также фиксируются слои гравийно-галечных отложений с песчаным заполнителем, размер гальки и гравия 1-10 см, иногда с крупными окатанными валунами (в диаметре до 20 см). Гравийно-галечный материал хорошо и средне окатанный. Для песчаных отложений характерна хорошая сортировка материала, иногда косая и диагональная слоистость, что присуще отложениям проточных вод, вместе с наличием более или менее крупных валунов.

В средней части склона в слое серого мелко-среднезернистого песка зафиксирован

прослой погребенной почвы (расчистка mor2, см. рис. 10А), который имеет форму клина и, возможно, образовался в результате морозобойного растрескивания в период залегания близко к поверхности. В самой нижней расчистке (mor4, см. рис. 10Б), расположенной в 5 м над урезом воды озера также вскрыт прослой погребенной почвы толщиной 8-10 см в слое охристого крупнозернистого песка с включениями гальки размером до 20 см.

Для всех разрезов в пределах вала конечной морены характерно присутствие базального слоя гравийно-галечных отложений с песчаным заполнителем, часто с включением валунного материала, на глубине 1-1.5 м от поверхности.

Для определения минералогического состава отложений выполнен рентгенофазовый анализ образцов (табл. 4), отобранных из расчистки Se-17-2-mor2 с глубины 0.37 см (образец М2-2), из расчистки Se-17-2-mor3 с глубины 0.80 см (образец М3-3), из расчистки Se-17-2-mor4 с глубины 0.56 см (образец М4-2) и 0.89 (образец М4-5).

Таблица 4. Минеральный состав исследованных образцов

Образец	Кальцит, %	Полевые шпаты, %	Кварц, %	Амфибол, %	Глинистые минералы
М2-2 (песок)	40±5	20±5	30±5	5	Следы (хлорит, гидрослюда)
М3-3 (песок)	5	40±5	35±5	10±5	5 (хлорит, гидрослюда, смешанослойные минералы)
М4-2 (песок)	следы	45±5	40±5	5	5 (хлорит, гидрослюда, смешанослойные минералы)
М4-5 (песок)	-	40±5	40±5	10±5	5 (хлорит, гидрослюда, смешанослойные минералы)

В целом, минеральный состав песков и супеси моренных отложений представлен преимущественно полевыми шпатами – 40-45 % и кварцем – 30-40 %. В верхней части моренного вала на глубине около 0.40 м в значительном количестве отмечается кварц – 40 %, амфиболы составляют 5-10 %. Глинистые минералы содержатся в незначительном количестве – от следов до 5 %.

Иммерсионный метод показал подобное, но более точное, распределение минералов тяжелой и легкой фракции в отобранных образцах песка (рис. 11).

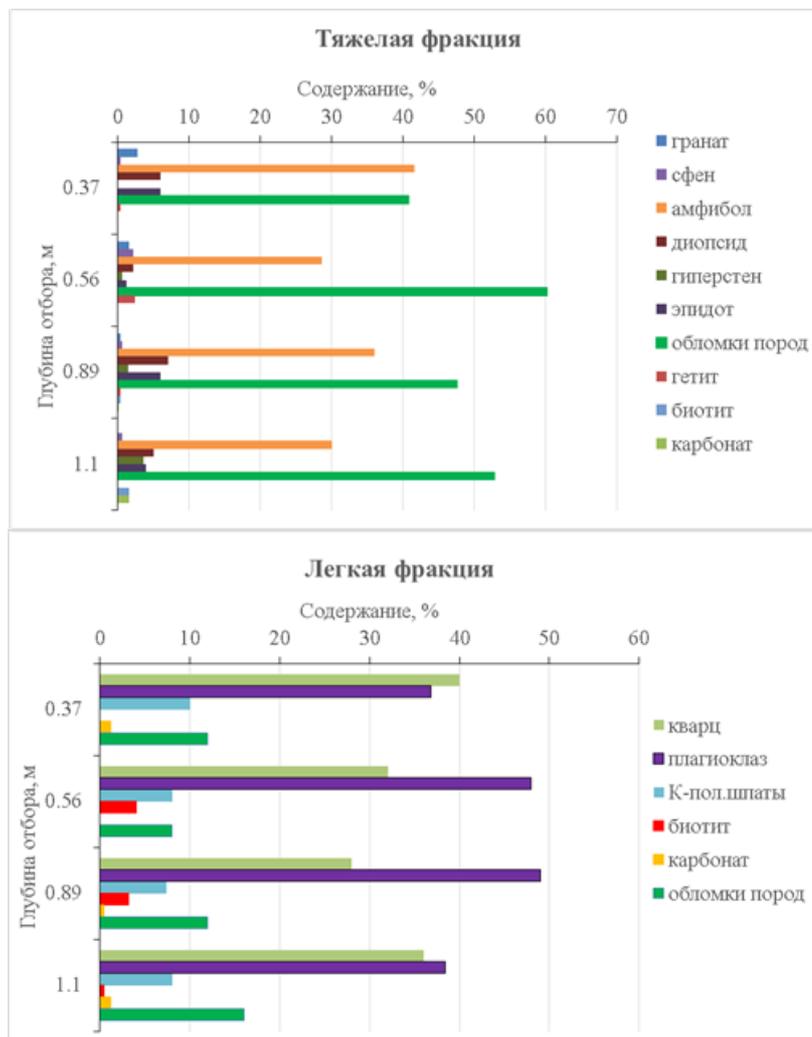


Рис. 11. Содержание минералов тяжелой и легкой фракции в песках моренных отложений.

В тяжелой фракции доминирует амфибол (до 42 %), остальные минералы (сфен, гиперстен, эпидот, гетит, биотит, карбонаты) содержатся в количестве $n \cdot 10^{-1}$, редко – 2-7 % (гранат, диопсид). Обломки пород, представляющие агрегаты из кварца с амфиболом, реже с эпидотом, составляют до 60 % общего веса. Легкая фракция отличается преимущественным содержанием плаггиоклаза (Na-Ca-полевых шпатов) – до 50 % и кварца – до 40 %. В подчиненном значении К-полевые шпаты (до 10 %) и биотит (до 3 %).

Гранулометрический и минералогический состав отложений стадильной морены

С целью изучения строения и состава отложений четко выраженного в рельефе вала, расположенного в двух километрах выше по течению и поперечно к руслу реки, исследованы 2 разреза, сложенные песчаными осадками в районе урочища Урда-Хурьелок. Один из них – **Se-19-R1** – находится на левом берегу р. Сенца (рис. 12), другой – **Se-20-R2** – на правом (рис. 13).

Разрез **Se-19-R1** –немерзлый до глубины 2.50 м. Исследование вскрытого разреза и проанализированный гранулометрический состав 9 образцов грунта, отобранных с

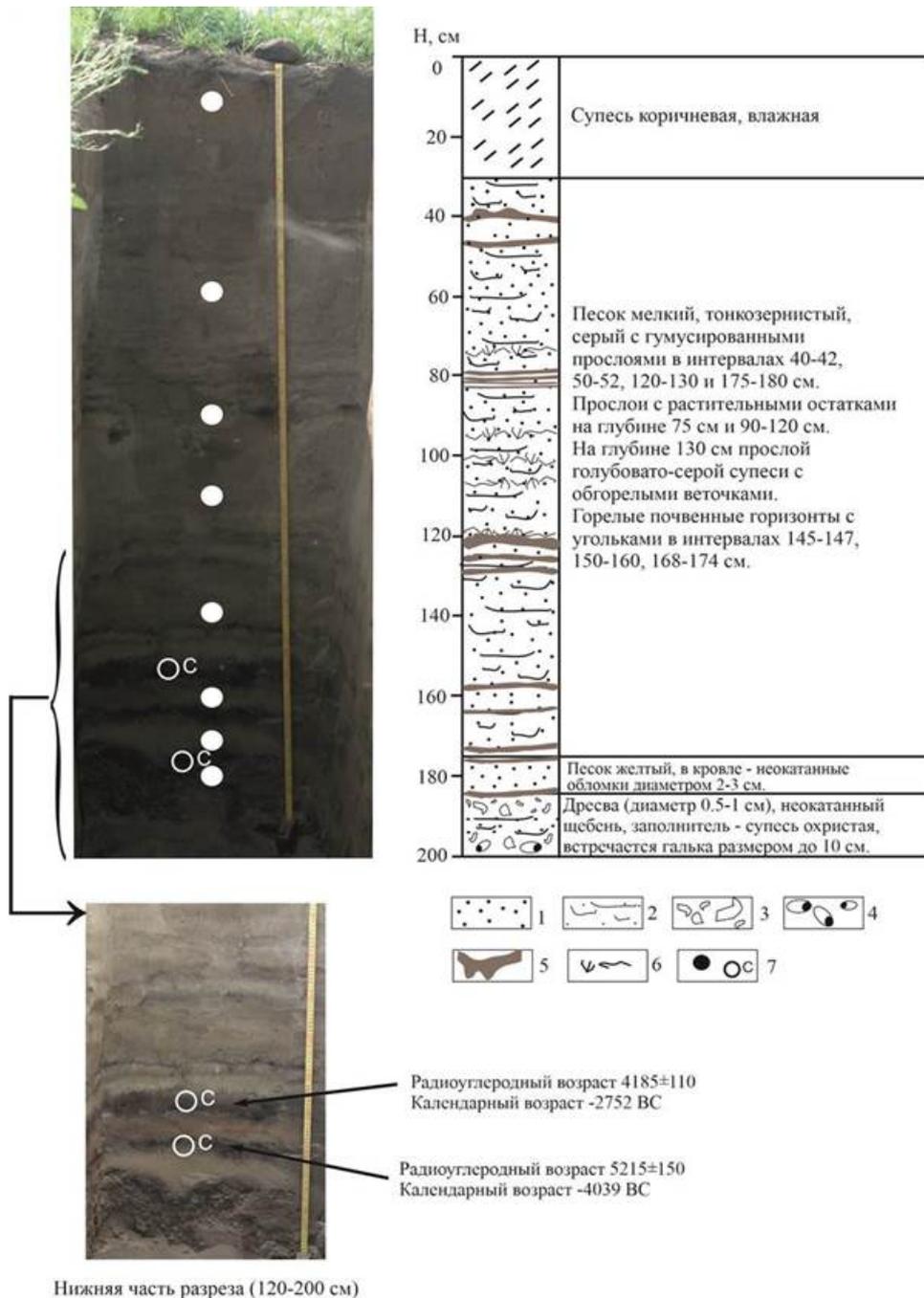


Рис. 12. Разрез Se-19-R1 на левом берегу р. Сенца, в пределах конечно-моренного вала (II фаза). 1 – песок; 2 – супесь; 3 – дресва, щебень; 4 – галька; 5 – погребенная почва; 6 – растительные остатки; 7 – место отбора образцов на грансостав и радиоуглерод.

глубины 0.15, 0.60, 0.90, 1.10, 1.40, 1.60, 1.70, 1.80 и 2.00 м, позволили установить, что толща сложена мелко- и тонкозернистым песком с прослоями супесей, растительных остатков и гумусированных горизонтов до глубины 1.85 м. Ниже залегает слой дресвы и неокатанного щебня размером 0.5-1.0 см; под слоем щебня встречается галька (окатанная) и валуны размером до 10 см. Заполнителем служит песок и супесь охристого цвета.

Радиоуглеродное датирование двух образцов органического детрита из почвенных горизонтов, отобранных с глубины 1.55–1.60 и 1.60–1.70 м, показало возраст 4185±110 и 5215±450 лет соответственно.

Второй разрез – **Se-20-R2** – находится в урочище Урда-Хурьелок и вскрывает вал, поперечный руслу реки на правом берегу р. Сенца, который продолжает вал R1 с левого

берега. Разрез немерзлый, сложен песками желтого и серого цвета, песчинки окатанные и полуокатанные. На глубине 3.50 – слой галечника, средний размер гальки 3x2x1.5 см. На глубине 3.95 м залегают валуны размером 0.5-1.2 м.

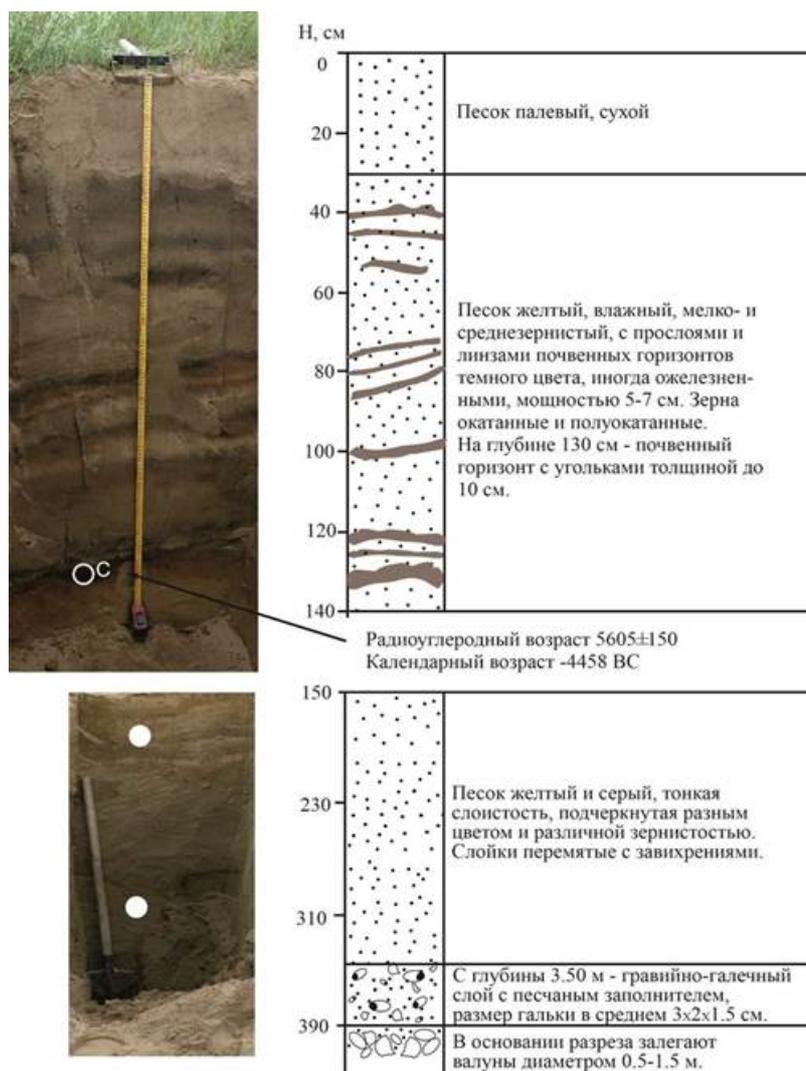


Рис. 13. Разрез Se-20-R2 на правом берегу р. Сенца, в пределах конечно-моренного вала (II фаза). Условные обозначения на рис. 11.

Обсуждение

Исследование гранулометрического состава керна скважины показало, что в разрезе рыхлых отложений (до глубины 44 м) преобладают суглинки средней и плохой сортировки, которые редко переслаиваются с глинами средней и плохой сортировки, а также с супесями хорошей, средней и плохой сортировки, хорошо сортированными песками. Соотношение типов грунтов в разрезе рыхлых отложений долины четко видно из треугольника Ферре, который построен с использованием коэффициента сортировки Траска ^[13] (рис. 14). Коэффициент Траска рассчитывается по формуле $SO = \sqrt{Q_{25}/Q_{75}}$, где Q_{25} – 25%-ный квантиль для частиц большого размера, Q_{75} – 75%-ный квантиль для частиц меньшей размерности.

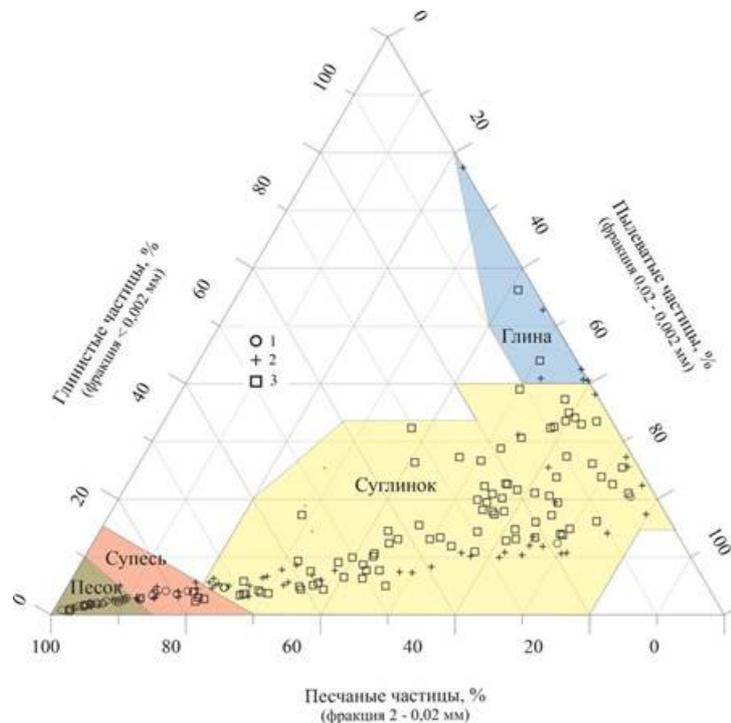


Рис. 14. Треугольная диаграмма соотношения частиц разного размера в рыхлых отложениях, вскрытых опорной скважиной Se-20-скв.5 в долине р. Сенца. Коэффициент сортировки отложений Траска: 1 – хорошо сортированные (1.00-1.58); 2 – средне сортированные (1.58-2.12); 3 – плохо сортированные (> 2.12).

Анализ гранулометрического состава рыхлых отложений, вскрытых опорной скважиной Se-20-скв.5, позволил определить последовательность накопления осадков в озерном палеоводоеме, который существовал в долине р. Сенца в голоцене и образовался в результате подпора конечно-моренными отложениями [14]. На первом этапе происходило накопление озерно-ледниковых глин (не сортированных или плохо сортированных) в условиях минимальной энергии водного потока. В дальнейшем при врезе р. Сенца в конечно-моренный комплекс в условиях увеличения энергии потока формировалась толща суглинков (средне сортированных) в подпрудном озере. На этапе активного врезе реки в конечно-моренный комплекс и смены местоположения русла аккумуляровались хорошо сортированные супеси и пески.

Судя по керну пробуренной скважины, можно констатировать, что в течение голоцена режим седиментации в подпрудном озере неоднократно изменялся, обеспечивая чередующееся накопление прослоев глин, суглинков, супесей и песков различной мощности. Периодическое колебание уровня воды в палеозере, вызванное, возможно, тектоническими факторами, обусловило вариации особенностей седиментации.

Радиоуглеродный анализ отобранного образца керна (супесь голубовато-серая, пылеватая, мерзлая с растительными остатками) с глубины 1.5 м показал возраст 3510 ± 120 лет (календарный возраст –1838 AD) (лаб. № ИМКЭС-14C2215). Этот результат подтверждает существование открытого водоема в позднем голоцене. Согласно расчетам, средняя скорость осадконакопления в позднем голоцене в озере составила 0.4 мм/год. Предыдущие исследования установили, что активное формирование почвенных горизонтов после осушения палеозера стартовало лишь 500-200 лет назад [14, 15]. В это время на осушенных участках долины р. Сенца началось промерзание рыхлых отложений, активное пучение и образование литальза.

Состав породообразующих минералов в аллювиальных отложениях р. Сенца является кварц-плагиоклазово-биотитовый, а характерный для него комплекс тяжелых минералов – пироксен-амфиболовым. Такой состав позволяет предполагать относительно недалекий перенос в пределах области питания, поскольку эти минералы (амфиболы и пироксены) легко истираются при механическом переносе и быстро разрушаются при выветривании в условиях гумидного климата, а значительное содержание кварца указывает на размыв метаморфических комплексов ^[16-19].

Пески по минералогическому составу отражают петрографический состав питающей провинции: размыву подвергались интрузивные породы саянского комплекса верхнего протерозоя γ_2PR_3 и δ_1PR_3 (плагиограниты, гранодиориты, диориты) и огнитского комплекса палеозоя $\gamma\xi-\xi PZ$ (грано-сиениты, сиениты) и $\gamma\eta PZ$ (гранит-порфиры), а также метаморфические и осадочные отложения протерозоя PR_{1-2} и PR_3 (мраморизованные, графитизированные и доломитизированные известняки, с прослоями гнейсов и кристаллических сланцев). Эти породы выходят на поверхность в истоке р. Сенца, который образуется при слиянии трех рек, и слагают весь транзитный путь реки на протяжении 50 км (до участка исследования). Средний минералогический состав пород (табл. 5) предопределил состав песков, которые залегают в устье реки в среднем течении.

Таким образом, однотипный минералогический состав всех групп песчаной фракции, тонкая горизонтальная слоистость (редко кося микрослоистость), наличие углефицированных растительных остатков и значительного количества угловатых, угловато-окатанных и полуокатанных зерен свидетельствуют о спокойном водном режиме, об озерных и озерно-болотных условиях отложения осадков. Сравнительная выдержанность комплекса тяжелых минералов говорит о том, что область сноса была единой и постоянной, а смена четырех выделенных по грансоставу групп песков явилась результатом смены состава размываемых пород локальных питающих провинций (интрузивных, метаморфических или осадочных пород). Материал переносился водными потоками на небольшие расстояния, поскольку зерна сохранили угловатую форму, после отложения подвергался одинаковым диагенетическим преобразованиям. Крупнозернистый серый песок I группы, доминирующий в разрезе по мощности, указывает на большую энергию формирующего его водного потока и увеличение скорости седиментации ^[20].

В расчистке Se-14-2, вскрытой в устье в 50 м выше по течению реки (см. рис. 3), описываемые аллювиальные пески с глубины 3.8 м перекрыты льдистыми голубовато-серыми и коричнево-серыми суглинками озерных фаций, которые фиксировались во всех ранее выполненных расчистках и керне скважин, пробуренных в долине р. Сенца. Как установлено по результатам палинологического анализа, они формировались в условиях относительного похолодания и уменьшения влажности, о чем свидетельствует широкое распространение светлохвойных лиственнично-сосновых лесов с незначительным участием темнохвойных пород ели и пихты ^[21].

Таблица 5. Средний минералогический состав пород питающей провинции, % (по Карте полезных ископаемых СССР, 1966).

Породы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Монгошинская свита (PR ₃ mg): известняки,										

доломитизированные известняки с прослоями сланцев, конгломераты.	+	+			+			+	+	+
Дибинская толща (PR _{3db}): песчаники и сланцы с прослоями известняков и основных эффузивов	+	+	+	+	+	+		+	+	+
Балыктыгхемская свита (PR _{1-2bl}): мраморизованные, графитизированные известняки, прослои гнейсов и кристаллических сланцев	+	+			+			+	+	+
Огнитский комплекс интрузий (γξ-ξPZ): грано-сиениты, сиениты	+	+		+		+				
Огнитский комплекс интрузий (γпPZ): гранит-порфиры	+		+	+						
Саянский комплекс интрузий, II фаза (γ ₂ PR ₃): плагиограниты, гранодиориты	+	+	+	+		+	+			
Саянский комплекс интрузий, I фаза (δ ₁ PR ₃): диориты, гранодиориты	+	+	+	+		+	+			

Примечание. 1 – кварц, 2 – полевой шпат, 3 – плагиоклаз, 4 – биотит, 5 – мусковит, 6 – амфибол, 7 – пироксен, 8 – хлорит, 9 – эпидот, 10 – карбонаты. Знак + указывает только на наличие минерала в усредненном составе породы, вне зависимости от его количества.

Учитывая расположение вскрытых расчисток один под другим по вертикали (см. рис. 10А) и тот факт, что в основании каждой из них залегает слой гравийно-галечниковых отложений, хорошо и средне окатанных, с песчаным заполнителем, с крупными окатанными валунами, можно представить разрез моренного вала высотой более 20 м как «слоеный пирог», в котором чередуются грубо обломочные отложения (валунно-галечные), неоднородные и несортированные, и рыхлые накопления (супеси, пески), которые хранят следы деятельности водно-ледниковых потоков в период таяния ледника. Эти потоки перемывали моренный материал и переоткладывали его при выходе из-под ледника, формируя сложно построенный конечно-моренный вал. Минералогический

состав отложений унаследован от состава пород, слагающих окружающие долину р. Сенца горные хребты (см. табл. 5).

Изучение морфологических особенностей этого участка долины р. Сенца показало, что валы на левом и правом берегах, вероятно, представляли собой единый вал конечной стадальной морены. Он сформировался в результате деградации краевой части ледника от границы максимального распространения в 8.5 км от устья р. Сенца до рассматриваемого участка долины 4-5 тыс. лет назад в период потепления. В межледниковье образовывались почвы, которые в настоящее время залегают на глубине 130-170 см (см. рис. 9, 10), и происходило расширение зоны растительности. Последующее похолодание, которое подтверждается широким распространением светлехвойных лиственнично-сосновых лесов с незначительным участием темнохвойных пород ели и пихты (по результатам палинологического анализа рыхлых отложений долины^[21]), привело к торможению процесса дегляциации или даже к временной активизации развития долинного ледника. В период последующего потепления происходило окончательное разрушение массивов льда, и формирование поперек долины стадального конечно-моренного вала, который позднее был прорезан руслом реки. В основании моренного вала залегают крупно-глыбовые отложения, а наиболее крупные обломки – эрратические валуны – наблюдаются повсюду на земной поверхности (рис. 13). Талые ледниковые воды в период деградации и отступления ледника сформировали мощную толщу флювиогляциальных отложений: поверх глыбовых накоплений откладывались галечные и гравийные, а сверху их покрывала толща песков. В песчаной толще наблюдаются завихрения, перевороты слоев разной зернистости и цвета, которые свидетельствуют о движении водных потоков.



Рис. 13. Эрратический валун в отложениях конечной морены.

Конечно-моренные валы создали барражи для поверхностных водотоков и условия для образования подпорных палеозер. Обращает на себя внимание тот факт, что спрямленные участки русла р. Сенца приурочены к этим аккумулятивным ледниковым формам рельефа, а интенсивное меандрирование характерно для отрезков долины, где существовали озерные условия и накапливался мелкозернистый осадочный материал при дегляциации и отступании ледника. Можно предположить (вслед за В. Г. Чувардинским^[22]), что формированию краевого грядово-холмистого вала способствовали и тектонические движения по активным разрывным нарушениям, оперяющим Сенцинский региональный разлом субширотного простирания и заложенным поперек долины.

Обломочный материал конечной и боковой морены частично перекрыл более древние делювиальные отложения конусов выноса с окружающих горных массивов (рис. 14).

Залегающие в основании описанных разрезов в урочище Урда-Хурьелок гравийно-галечные накопления с песчаным заполнителем с встречающимися окатанными и полуокатанными валунами могут представлять смешанные отложения конусов выноса и ледникового материала, разделить которые довольно сложно. Поверхности конусов выноса задернованы, большей частью ниже проксимальной зоны покрыты древесной растительностью, ложбины стока заболочены с небольшими ручейками, что свидетельствует о стабильности этих геоморфологических форм.

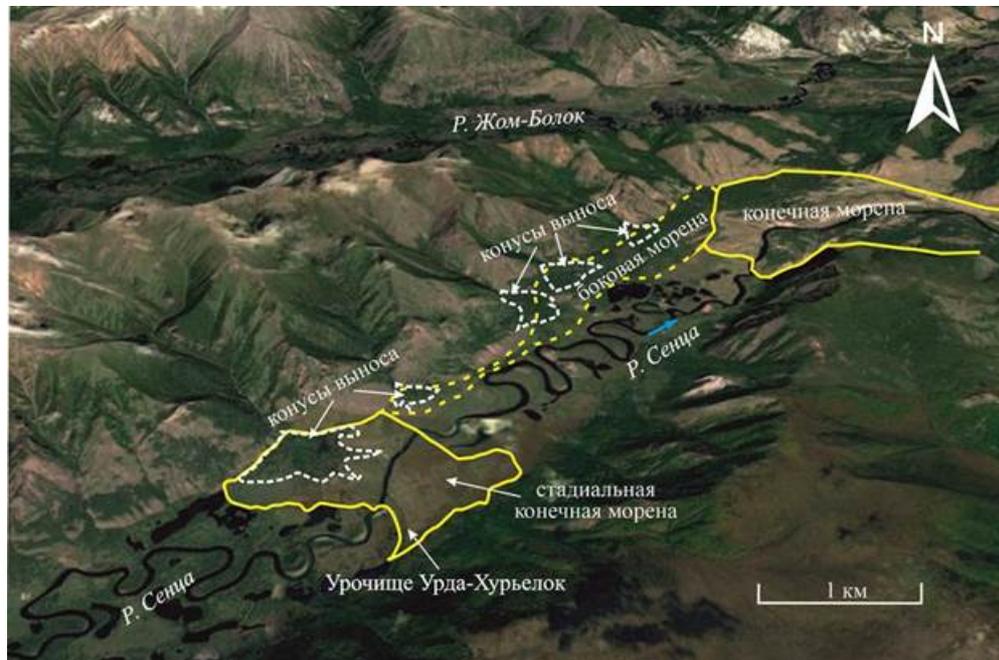


Рис. 14. Схема расположения конечно-моренных отложений (сплошная желтая линия), боковой морены (прерывистая желтая линия) и конусов выноса (прерывистая белая линия) в долине р. Сенца.

Заключение

Результаты выполненных исследований позволили сформулировать следующие выводы:

1. Пески надпойменной террас р. Сенца по гранулометрическому составу уверенно разделяются на четыре группы, характеризующиеся разной степенью сортировки и пылеватости, что позволяет рассматривать слои песков на глубине 1.25 и 2.1 м как отложения, вероятно, маркирующие положение палеокровли мерзлой толщи. По минералогическому составу пески отражают петрографический состав питающей провинции. Ряд характерных признаков свидетельствует о спокойном водном режиме их накопления, с редкой сменой динамического режима в сторону увеличения скорости энергии потока и скорости седиментации.
2. Для конечной морены в долине р. Сенца характерно чередование грубо обломочного материала (валунно-галечного), неоднородного и несортированного, и рыхлых отложений (супесей, песков) со следами деятельности водных потоков в период таяния ледника, которые перемывали моренный материал и переоткладывали его при выходе из-под ледника, формируя сложно построенный конечно-моренный вал. Минералогический состав флювиогляциальных отложений также унаследован от состава коренных пород, слагающих окружающие долину р. Сенца горные хребты.
3. Песчаная толща, слагающая четко выраженный в рельефе вал, расположенный в двух километрах выше по течению от конечной морены и поперечно к руслу реки Сенца,

залегает на крупно-глыбовых отложениях. Строение всего разреза указывает на формирование этой мощной толщи в результате деятельности талых ледниковых вод в период отступления ледника и образование поперек долины стадиального конечно-моренного вала, который позднее был прорезан руслом реки. Обломочный материал конечной и боковой морены позднее частично перекрыл более древние делювиальные отложения конусов выноса с окружающих горных массивов.

4. Гранулометрический и минералогический состав рыхлых отложений долины р. Сенца, вскрытых скважиной до глубины 45 м, свидетельствует о неоднократной смене режима седиментации в подпрудном палеозере в голоцене, который сопровождался чередующимся накоплением прослоев глин, суглинков, супесей и песков различной мощности.

Библиография

1. Arzhannikov S., Braucher R., Jolivet M., Arzhannikova A., Vassallo R., Chauvet A., Bourlès D., Chauvet F. History of late Pleistocene glaciations in the central Sayan-Tuva Upland (Southern Siberia) // *Quaternary Science Review*, 2012, 49. P. 16-32. <https://doi.10.1016/j.quascirev.2012.06.005>.
2. Talbot M.R., Allen P.A. Lakes. In: Reading H. G. (Ed.). *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*. Oxford UK: Blackwell Publishing, 1996. P. 83-124.
3. Xiao J., Fan J., Zhou L., Zhai D., Wen R., Qin X. A model for linking grain-size component to lake level status of a modern clastic lake // *Journal Asian Earth Science*, 2013, 69 (5). P. 149-158. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.07.003>.
4. Jacobs E., Rogiers B., Frederickx L., Swennen R., Littke R., Krooss B., Amann-Hildenbrand A., Bruggeman C. The relation between petrophysical and transport properties of the Boom Clay and Eigenbilzen Sands // *Applied Geochemistry*, 114 (2020). 104527. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104527>.
5. Oglesbee T., McLeoda C.L., Chappella C., Faraci O., Gibson B., Krekeler MPS. A mineralogical and geochemical investigation of modern aeolian sands near Tonopah, Nevada: Sources and environmental implications // *Catena*, 194 (2020). 104640. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104640>.
6. Khedr M.Z., Zaghloul H., Takazawa E., El-Nahas H., Azer M.K., A El Shafei S. Genesis and evaluation of heavy minerals in black sands: A case study from the southern Eastern Desert of Egypt // *Geochemistry*, 83 (2023). 125945. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2022.125945>.
7. Рентгеновские методы изучения и структуры глинистых минералов / Под ред. Г. Брауна. М.: Издательство «Мир», 1965, 599 с.
8. Hubbard C.R., Snyder R.L. RIR – Measurement and Use in Quantitative XRD. *Powder Diffraction*, 1988, 3. P. 74–77.
9. Сахарова М.С., Черкасов Ю.А. Иммерсионный метод минералогических исследований. М.: Изд-во МГУ, 1970, 89 с.
10. Страхов Н.М., Бродская Н.Г., Князева Л.М., Разживина А.Н., Ратеев М.А., Сапожников Д.Г., Шишова Е.С. Образование осадков в современных водоемах. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 792 с.
11. Иванов И.П. Инженерная геология месторождений полезных ископаемых: учебное пособие. М.: Недра, 1990. 302 с.
12. Мизеров Б.В., Черноусов С.И., Абрамов С.П., Сухорукова С.С., Вотях М.Р. Аллювиальные и озерно-аллювиальные кайнозойские отложения среднего Приобья. Новосибирск: Наука, 1971. 214 с.
13. Trask P.D. Origin and environment of source sediment of petroleum. Houston, USA. 1932. 323 p.

14. Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Vasil'chuk Yu.K., Svetlakov A.A., Kulagina N.V. Permafrost of the Oka Plateau (Eastern Sayan Ridge). *Permafrost and Periglacial Processes*. 2021. Vol. 32. P. 368–391. <https://doi.org/10.1002/ppp.2103>
15. Васильчук Ю.К., Васильчук Дж.Ю., Алексеев С.В., Буданцева Н.А., Алексеева Л.П., Васильчук А.К., Козырева Е.А., Светлаков А.А. Циклитное строение изотопной диаграммы ледоминарального бугра пучения и его радиоуглеродный возраст, долина реки Сенца, Восточный Саян. *Доклады академии наук. Науки о Земле*. 2019. Т. 489. № 5. С. 506–511, <https://doi.org/10.31857/S0869-56524895506-511>.
16. Крашенинников Г. Ф. Учение о фациях. М.: Высшая школа. 1971. 368 с.
17. Петтиджон Ф. Осадочные породы: пер. с англ. М.: Недра. 1981. 751 с.
18. Прошляков Б.К., Кузнецов В.Г. Литология и литолого-фациальный анализ. М.: Недра. 1981. 284 с.
19. Ежова А.В., Тен Т.Г. Практическая литология: учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ. 1999. 103 с.
20. Страхов Н.М. Основы теории литогенеза (Гранулометрическая сортировка песчано-алевритовых и глинистых осадков разных фациальных типов). Т. 2. М.: Изд-во АН СССР. 1960. 574 с.
21. Алексеева Л.П., Кулагина Н.В., Алексеев С.В., Светлаков А.А. Палинология мерзлых толщ в долине р. Сенца (Восточные Саяны). В сб.: *Актуальные проблемы науки Прибайкалья*. Вып. 3. Иркутск: Изд-во ИГУ. 2020. С. 262-272.
22. Чувардинский В.Г. Букварь неотектоники. Новый взгляд на ледниковый период. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН. 2008. 85 с

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предмет исследования являются, по мнению автора, реконструкция режима седиментации рыхлых отложений в долине р. Сенца в голоцене на основе анализа гранулометрического и минералогического состава озерно-аллювиальных, аллювиальных и флювиогляциальных и отложений.

Методология исследования, исходя из анализа статьи можно сделать вывод о комплексных исследованиях в долине р Сенца в период 2011-2021 гг. с анализом гранулометрического и минералогического состава рыхлых отложений образцов песка в береговом уступе, образцов отложений из конечно-моренных валов, образцов керна из скважины, а также анализ литературных данных. Анализ фракций 2.0–0.00008 мм выполнен с помощью лазерного дифракционного анализатора размеров частиц «ANALYSETTE 22» NanoTec (FRITSCH GmbH, Germany) класса High-End Рентгенофлуоресцентный анализ песков (9 проб) выполнен на оборудовании ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН. Фазовый состав проб расшифрован с помощью программы EVA (Diffraclplus, PDF-2, 2007 г.). Количественный минералогический анализ производился иммерсионным методом. Судя по иллюстративным материалам автором предпринятой экспедиционные полевые методы исследования, с последующих камеральной обработкой.

Актуальность затронутой темы безусловна и состоит в оценке современных глобальных климатических изменений на основе на исследованиях и реконструкции природно-климатических условий прошлого. Анализ структурных особенностей и вещественного состава отложений в комплексе с геологическими материалами позволяют выполнить палеогеографические построения для позднечетвертичного периода в одном из

бассейнов Окинского плато, уточнить строение долины р. Сенца, включая особенности залегания и распространения многолетнемерзлых пород. Исследования автора статьи помогают понять механизм изменения погодно-климатических условий и геохимической миграции микроэлементов реконструкцией режима седиментации рыхлых отложений в долине р. Сенца в голоцене.

Научная новизна заключается в констатации автором статьи на основе проведенных исследований сделать вывод о гранулометрическом и минералогическом составе рыхлых отложений долины р. Сенца, вскрытых скважиной до глубины 45 м, свидетельствует о неоднократной смене режима седиментации в подпрудном палеоозере в голоцене, который сопровождался чередующимся накоплением прослоев глин, суглинков, супесей и песков различной мощности.

Стиль, структура, содержание стиль изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена богатым иллюстративным материалом, рисунки, фотографии и схемы иллюстративны уместны. Библиография весьма исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса.

Библиография весьма исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса, но не содержит ссылки на нормативно-правовые акты и методические рекомендации по геохимическому анализу особенности грунтов.

Апелляция к оппонентам представлена в выявлении проблемы на уровне имеющейся информации, полученной автором в результате анализа.

Выводы, интерес читательской аудитории в выводах есть обобщения, позволившие применить полученные результаты. Целевая группа потребителей информации в статье не указана.