

ОПОРНЫЙ РАЗРЕЗ ТОЛОГОЙ (верхний кайнозой, Забайкалье): РЕКОНСТРУКЦИЯ УСЛОВИЙ И ОСОБЕННОСТЕЙ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ

В.В. Иванова^{1,4,8}, М.А. Ербаева², А.А. Щетников^{3,4,5,6}, А.Ю. Казанский^{7,8},
Г.Г. Матасова^{8,9}, Н.В. Алексеева², И.А. Филинов^{3,6,8}, М.И. Кузьмин⁴

¹ ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга, 190121, Санкт-Петербург, Английский просп., 1, Россия

² Геологический институт СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, ба, Россия

³ Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

⁴ Институт геохимии им. А.П.Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия

⁵ Иркутский научный центр СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Россия

⁶ Иркутский государственный университет, 664003, Иркутск, ул. Карла Маркса, 1, Россия

⁷ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

⁸ Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, Россия

⁹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

Приводятся новые данные о строении, литологической, геохимической и гранулометрической характеристиках четвертичных отложений опорного разреза Тологой (верхний кайнозой, Забайкалье). На их базе обосновано выделение в разрезе горизонтов ископаемых почв и уточнена их мощность. Выявлено четыре основных цикла осадконакопления, каждый из которых заканчивается образованием почвенных горизонтов. Показано, что климат во время формирования отложений разреза носил циклический характер: периоды увлажнения сменялись аридными эпохами разной интенсивности и продолжительности. На этапах потеплений и формирования почвенных горизонтов на первый план выходили дальние и средней дальности источники сноса осадочного материала. В периоды наиболее интенсивных педогенных процессов преобладали биохимические постседиментационные преобразования отложений *in situ*, что находит отражение в изменении их химического состава. Наиболее теплыми условиями и усилением процессов выветривания и выщелачивания в плейстоцене характеризуется этап накопления отложений горизонта палеопочв 16.4—15.0 м, сопровождавшийся протеканием различных почвенных процессов и ростом биологической активности, а также уменьшением интенсивности засоления и окисления. В исследуемом геохимическом профиле четко фиксируются этапы, в период которых на территории преобладали криогенные условия, последние отражены в разрезе инволюциями, псевдоморфозами по ледяным клиньям и мощными карбонатными линзами. Для отложений этих уровней типичны минимальные значения коэффициентов засоления, высокие — окисления, а также низкие значения коэффициентов выщелачивания и окисления, положительная европиевая аномалия, повышенные $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$, пониженные La/Sm .

Плейстоцен, плиоцен, геохимия рыхлых отложений, изменения природной среды, литология, опорный разрез Тологой, Забайкалье

THE TOLOGOI KEY SECTION (upper Cenozoic, Transbaikalia): RECONSTRUCTION OF THE PECULIARITIES AND DEPOSITIONAL ENVIRONMENT

V.V. Ivanova, M.A. Erbaeva, A.A. Shchetnikov, A.Yu. Kazansky, G.G. Matasova,
N.V. Alekseeva, I.A. Filinov, and M.I. Kuzmin

This paper presents new data on the structure and lithologic, geochemical, and granulometric features of the Quaternary deposits of the Tologoi key section (upper Cenozoic, Transbaikalia). These data made it possible to determine the location of paleosol horizons throughout the section and their thicknesses. Four main sedimentation cycles have been identified; each of them terminated with the formation of soil horizons. It is shown that the climate during the formation of the deposits had a cyclic nature: Wet periods were changed by dry epochs of different durations. During warming and the formation of soil horizons, distant and medium-range provenance areas prevailed. *In situ* biochemical postsedimentary transformations of the deposits dominated in the periods of the most intense pedogenesis, as reflected in the changes in their chemical composition. It is shown that the warmest climate and the activation of weathering and leaching processes during the Pleistocene were in the pe-

riod of the accumulation of a paleosol horizon in the section interval 16.4–15.0 m. It was a period of pedogenic and biologic activity and reduced salinization and carbonation. Stages with prevailing cryogenic environments are clearly recorded in the studied geochemical profile as involutions, pseudomorphs after ice wedges, and thick carbonate lenses. The deposits formed at these stages are characterized by minimum salinization, high calcification, and low leaching (hydrolysis) and oxidation indices as well as a positive Eu anomaly and high $\Sigma Ce/\Sigma Y$ and low La/Sm values.

Pleistocene, Pliocene, geochemical composition of loose deposits, environmental changes, lithology, Tologoi key section, Transbaikalia

ВВЕДЕНИЕ

Разрез у горы Тологой (рис. 1, А), открытый А.П. Окладниковым в 1951 г., расположен в Иволгинской впадине на левом берегу р. Селенга, к юго-западу от г. Улан-Удэ.

В разрезе вскрывается последовательность континентальных отложений широкого возрастного диапазона: от начала позднего плиоцена до голоцена, с незначительным перерывом (начало позднего плейстоцена). Первая информация о разрезе и его фауне была дана В.И. Бибиковой и соавторами [1953].

Описание разреза плиоцен-четвертичных отложений у горы Тологой приводится в трудах [Александрова и др., 1963; Равский и др., 1964], вещественный состав отложений был изучен И.Г. Лискун и Н.В. Ренгартен [1963]. На основе этих данных были сделаны выводы о генезисе отложений. Все перечисленные авторы считают, что по генетическим признакам разрез разделяется на две части: красноцветные отложения нижней части разреза являются продуктами ближнего переотложения красноцветной коры выветривания в условиях мелководного озерного водоема, а палево-серые супесчаные и песчаные отложения средней и верхней толщ образованы однородными в генетическом отношении породами, имеют делювиально-пролювиальное происхождение. Авторы работ [Равский и др., 1964; Вангенгейм и др., 1966; Иваньев, 1966; Базаров, 1986; Ербаева, 1970; Вангенгейм, 1977; и др.] установили, что многослойный разрез рыхлых отложений у горы Тологой является опорным не только для Западного Забайкалья, но и для всей Восточной Сибири в целом. Он уникален тем, что здесь представлены континентальные отложения Иволгинской впадины, накопление которых происходило с небольшими перерывами от конца среднего плиоцена до голоцена включительно.

Выделенные в разрезе три толщи представляют три стратиграфических уровня [Алексеева, 2005] (см. рис. 1, Б): верхний (голоцен, верхний плейстоцен), средний (средний—нижний плейстоцен) и нижний (верхний плиоцен). В основании разреза в нижней толще вскрываются красноцветные отложения, считающиеся стратотипом чикойской (тологойской) свиты [Базаров, 1968]. В верхней части средней толщи разреза Тологой установлена граница инверсии Брюнес—Матуяма [Гнибиденко и др., 1976]. Характерной особенностью отложений является наличие серии погребенных почвенных горизонтов, залегающих во всех трех толщах разреза [Равский и др., 1964; Вангенгейм и др., 1966; Базаров, 1968; Ербаева, 1970; Алексеева, 2005]. Установлены следы криогенных нарушений пород, залегающих ниже инверсии Брюнес—Матуяма [Алексеева, 1994; Vogt et al., 1995; Alexeeva, Erbajeva, 2000], свидетельствующие о том, что первое появление многолетнемерзлых пород в Западном Забайкалье произошло, по крайней мере, в конце раннего плейстоцена, а не в позднем плейстоцене, как считалось ранее [Базаров, 1968; Равский, 1972].

В 1993 г. на обнажении горы Тологой были выполнены детальные палеонтологические исследования на пяти ступенчатых расчистках, параллельных основной, где вскрываются последовательно отложения верхней и средней толщ [Алексеева, 2005]. Из 13 слоев (ранее из 6) были собраны остатки мелких млекопитающих, состав которых позволил судить о последовательном развитии биоты с плиоцена до голоцена. Позднее на этих расчистках Т.Г. Рященко с коллегами [2012] провели детальную документацию и опробование лессовидных отложений, погребенных почв и плиоценовых красноцветных глин. Была получена информация о микроструктурных параметрах и содержании глинистых минералов в этих отложениях.

В средней толще разреза Тологой описаны и опробованы первый (нижний, около млн лет) и второй (средний, около 800 тыс. лет) погребенные почвенные горизонты. К числу общих особенностей авторы [Рященко и др., 2012] относят их палевоый с серым оттенком цвет, агрегированность, макропористость (отмечаются разнообразные виды макропор), карбонатность. Агрегированность и макропористость, по мнению авторов, являются следствием периодически повторяющихся процессов деградации многолетней мерзлоты, формирование которой происходило в периоды восьми циклов похолоданий начиная с раннего плейстоцена. Образование почвенных горизонтов в лессовой толще связано с потеплением климата; преобладают каштановые почвы, которые формируются в зоне сухих степей в усло-

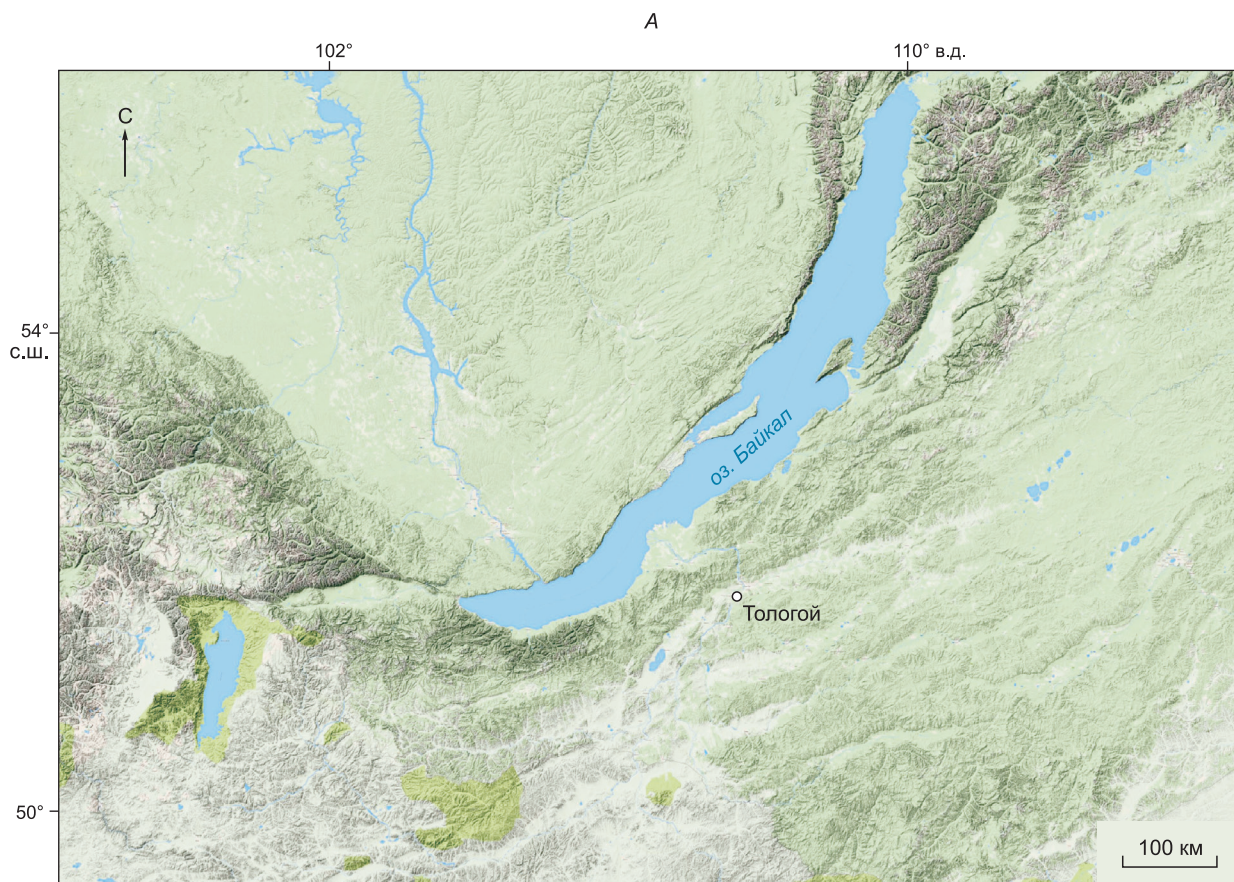


Рис. 1 (начало).

Б

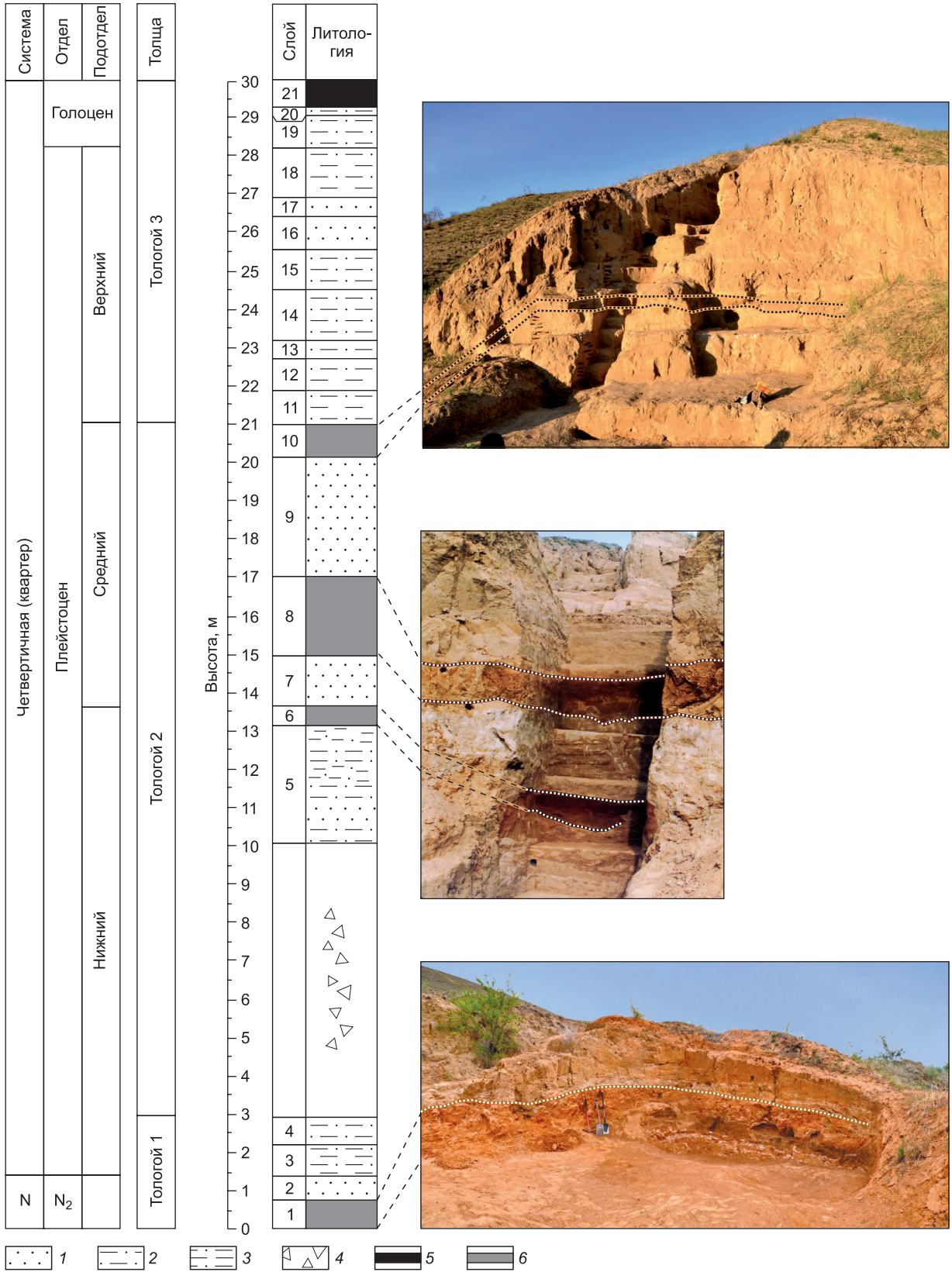


Рис. 1. Общая карта местоположения опорного разреза Тологой (А). Литолого-стратиграфическое строение разреза Тологой и его фотографии (авторы И.А. Филипов и М.А. Ербаева), демонстрирующие положение палеопочв (Б).

1 — пески, 2 — супеси, 3 — суглинки, 4 — осыпь, 5 — современная почва, 6 — палеопочва.

виях неустойчивого увлажнения. Показано, что погребенные почвы по геолого-литологическим и микроструктурным признакам почти не отличаются от лессовидных отложений. Для плиоценовых глин — регионального субстрата лессовой толщи — кроме красновато-коричневого цвета, комковато-плитчатой структуры и цементированных дресвы и гравия отмечены лессовые признаки: пылеватость, макропористость и карбонатность. Предполагается, что глины приобрели эти признаки в результате криогенных воздействий в периоды похолоданий плейстоцена.

Исследования последних лет позволили получить новую информацию о структуре ископаемых почв голоцена и позднего плейстоцена и данные об их образовании. Впервые получен ряд абсолютных датировок осадков и ископаемых почв [Andreeva et al., 2011; Zech et al., 2017].

В настоящей работе представлены результаты мультидисциплинарного изучения отложений разреза Тологой с использованием комплекса гранулометрических и литохимических методов и подходов, проведенного с целью уточнения литолого-стратиграфического строения разреза и реконструкции палеоэкологических условий его формирования. Впервые представлена геохимическая характеристика отложений разреза и подтверждена информативность распределения лантаноидов и ряда петрохимических модулей для уточнения условий образования четвертичных отложений. Показана возможность применения коэффициентов фракционирования РЗЭ для палеоэкологических реконструкций.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В основу исследований положен комплексный анализ литологических особенностей рыхлых отложений разреза Тологой с привлечением гранулометрических и геохимических данных. В работе использована геохронологическая терминология, принятая в соответствии с Международной стратиграфической шкалой, согласно которой граница плиоцена—плейстоцена составляет 2.588 млн лет.

Для характеристики гранулометрического состава отложений разреза Тологой был проведен отбор образцов с интервалом 10 см, коллекция составила 222 образца.

Гранулометрические исследования выполнялись на лазерном микроанализаторе частиц Microtrac X100. Диапазон размеров измеряемых частиц составляет от 704 до 0.146 мкм, которые для удобства были объединены в 50 фракций, представленных в объемных процентах по каждому образцу. Диспергирование образцов проводилось путем ультразвуковой обработки.

Статистическая обработка результатов всех образцов выполнена с помощью программы GRADISTAT [Blott, Pye, 2001]. Для каждого образца определены моды распределения и рассчитаны медианный и средний размер зерна, сортировка, асимметрия и эксцентриситет. По результатам измерений для статистического анализа образцы объединены по классу крупности обломков и частиц в песчаную фракцию (> 100 мкм), крупноалевритовую (50—100 мкм), мелкоалевритовую (10—50 мкм) и глинистую (< 10 мкм), согласно классификации А.В. Раукаса [1981]. В составе глинистой выделена илистая подфракция (< 2 мкм). Расчеты выполнены методом арифметических моментов [Градзинский и др., 1980] и методом Фолка—Варда [Folk, Ward, 1957], модифицированным С. Блоттом и К. Пи [Blott, Pye, 2001], который дает более точные оценки для общей гранулометрической характеристики образца. Дополнительно использовались расчетные параметры: D_{cp} — средний размер зерна, рассчитан как средне-взвешенное значение [Градзинский и др., 1980]; F — динамический фактор, представляющий собой отношение количества физического песка (сумма фракций > 50 мкм) к количеству физической глины (сумма фракций < 50 мкм) в образце. Параметр характеризует условия осадконакопления: при $F > 1$ преобладает привнос обломочного материала из ближних и средних источников посредством волочения и сальтации (~до десятка километров), что, скорее всего, имеет место в высокодинамичной среде при сильных порывистых ветрах; при $F < 1$ поступление материала сокращается, и он привносится в виде воздушных аэрозолей, в основном из дальних источников, преобладают постседиментационные преобразования осадков *in situ*, основными из которых являются почвообразовательные [Казанский и др., 2018]; k — показатель дисперсности, отражающий характер глинистых компонентов, их «отмытость», «выщелоченность», «иллювирированность», что делает его характеристичным для таких явлений, как оподзоливание, оглинение и др., связанных с трансформацией, переносом и локализацией тонкодисперсного вещества в различных отложениях. Он рассчитывается по формуле [Березин, 1983]:

$$k = (\ln\Phi 5 - \ln\Phi 1)/1.609,$$

где $\Phi 5$ — содержание частиц (%) диаметром < 5 мкм; $\Phi 1$ — содержание частиц (%) диаметром < 1 мкм.

Для характеристики вещественного состава отложений разреза Тологой проведены петрохимические (222 образца, интервал опробования 0.1 м) исследования слагающих разрез терригенных пород. Определение содержаний редких и рассеянных элементов (Li, Ba, Sc, Cu, Zn, Co, Ni, Y, Nb, Cs, Th, U) в породах выполнено рентгенофлуоресцентным методом (ИЗК СО РАН, Центр коллективного пользования «Геодинамика и геохронология», г. Иркутск), определение содержаний оксидов породообразующих

элементов — методом «мокрой химии». Результаты анализа содержаний оксидов пересчитаны на прокаленную бескарбонатную навеску, а затем на молярную массу для расчета основных петрохимических параметров.

Определение элементов группы РЗЭ (редкоземельные элементы) в частной выборке проб (22 образца, интервал опробования 0.9 м) выполнено методом ICP-MS (ИГХ СО РАН, г. Иркутск) с относительной погрешностью 5—10 %.

Статистическая обработка результатов анализа проведена с использованием пакета Statistica 10.0.

Для общей характеристики отложений разреза Толгой проведен анализ распределения некоторых геохимических показателей (потери при прокаливании (п.п.п.), Cr, Co/Zr, Cu/Zr) и основных литохимических индикаторов палеоклимата (петрохимические модули: ГМ — гидролизатный, ФМ — фемический, ТМ — титановый, НМ — натриевый, КМ — калиевый, ЩМ — щелочной, НКМ — нормированная щелочность, АМ — алюмокремниевый) [Юдович, Кетрис, 2000; Маслов, 2005]¹.

Качественная и количественная природа геохимического сигнала в применении к молодым рыхлым континентальным отложениям и их сравнительная характеристика описаны в сводных работах [Маслов, 2005, 2006].

Для определения интенсивности процессов осадконакопления и почвообразования были использованы следующие параметры:

— индекс интенсивности химического выветривания CIA = $(Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)) \cdot 100$ [Nesbitt, Young, 1982];

— химический индекс выветривания CIW = $(Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O)) \cdot 100$ [Fedo et al., 1995];

— индекс зрелости осадков ICV = $(Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + TiO_2) / Al_2O_3$ [Cox et al., 1995];

— индекс степени преобразования плагиоклазов PIA = $((Al_2O_3 - K_2O) / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O - K_2O)) \cdot 100$ [Fedo et al., 1995];

— показатель интенсивности процессов гидролиза $Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O + MgO)$, представляет отношение Al_2O_3 (глинистая составляющая) к основным катионам, выносимым в почвенные растворы [Retallack, 2001];

— показатель кальцификации почв $(CaO + MgO) / Al_2O_3$ отражает накопление почвенного кальцита и доломита [Retallack, 2007];

— отношение Ba/Sr, характеризует гидротермические условия осадконакопления, в частности, процесс выщелачивания [Retallack, 2001], Ba входит в состав КППШ и выносится из почв слабее Sr, который ассоциирует с карбонатами;

— коэффициент окисления почвенного материала $(Fe_2O_3 + MnO) / Al_2O_3$ [Калинин и др., 2009].

Детализация палеоэкологических условий формирования разреза выполнена с помощью ряда специфических геохимических маркеров [Балашов, 1976; Elderfield, Greaves, 1982; Тейлор, Мак-Леннан, 1988; Trueman et al., 2006; Шатров, 2007; Иванова, 2012; Иванова и др., 2016], в частности:

1. $\Sigma(РЗЭ + Y)$ — суммарное содержание РЗЭ и иттрия — зависит как от состава размываемых пород, так и от фракционирования лантаноидов в зоне гипергенеза. Также оценивается суммарное содержание легких лантаноидов ($\Sigma ЛРЗЭ$, где ЛРЗЭ — La-Pr-Nd), средних ($\Sigma МРЗЭ$, где МРЗЭ — Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho) и тяжелых ($\Sigma ТРЗЭ$, где ТРЗЭ — Er, Tm, Yb, Lu).

2. $\Sigma Ce / \Sigma Y$, где ΣCe — La-Eu, ΣY — Gd-Lu, Y — коэффициент отражает интенсивность процессов выветривания на суше, где при гумидном литогенезе более интенсивно разрушаются полевые шпаты и акцессорные минералы, содержащие церий, что приводит к увеличению отношения. Результаты исследований [Ivanova et al., 2017] показали, что величина этого индекса в криогенных условиях возрастает, что связано с обогащением тонкой фракции отложений полевыми шпатами и гидрослюдами, а также преобразованием гидрослюд в результате криогенного выветривания.

3. Величина цериевой аномалии, выраженная как $Ce^* = 3Ce_n / (2La_n + Nd_n)$ [Тейлор, Мак-Леннан, 1988], — индикатор окислительно-восстановительных условий осадкообразования (составы редких земель нормируются на состав лантаноидов в NASC [Gromet et al., 1984]).

4. Величина европиевой аномалии, $Eu^* = 2Eu_n / (Sm_n + Gd_n)$ [Балашов, 1976] (составы редких земель нормируются на состав лантаноидов в NASC [Gromet et al., 1984]) — индикатор поступления глубинного вещества в осадки. Среднее для осадочных пород фанерозоя — 0.61—0.72 [Балашов, 1985], для постархейских осадочных пород — 0.65 [Тейлор, Мак-Леннан, 1988].

5. Отношения La/Yb, La/Sm — индикаторы физико-химических (pH, Eh) и фациальных условий диагенеза [Reynard et al., 1999; Trueman et al., 2006; Шатров, 2007; Ivanova et al., 2017] (составы редких земель нормируются на состав лантаноидов в NASC [Gromet et al., 1984]).

¹ ГМ = $(Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3 + FeO + MnO) / SiO_2$; ФМ = $(Fe_2O_3 + FeO + MnO + MgO) / SiO_2$;

ТМ = TiO_2 / Al_2O_3 ; НМ = Na_2O / Al_2O_3 ; КМ = K_2O / Al_2O_3 ; ЩМ = Na_2O / K_2O ; НКМ = $(Na_2O + K_2O) / Al_2O_3$; АМ = Al_2O_3 / SiO_2 .

6. Отношение ЛРЗЭ/ТРЗЭ, рассчитываемое как $[(La + Pr + Nd)/(Er + Tm + Yb + Lu)]_{обр.} / [(La + Pr + Nd)/(Er + Tm + Yb + Lu)]_{NASC}$ [Маслов и др., 2007], является показателем присутствия вулканокластике, соотношения кислых и основных пород в источниках сноса, а также индикатором карбонатизации: преимущественно ЛРЗЭ изоморфно замещают Са в решетке карбонатных минералов [Kuřera et al., 2009].

Величина статистической достоверности тетрадного эффекта [Moneske et al., 2002] лантаноидов для третьей (Nd, Sm, Eu, Gd) и четвертой (Er, Tm, Yb, Lu) тетрады — показатель степени фракционирования средних и тяжелых РЗЭ [Иванова, 2012; Иванова и др., 2016], рассчитываемая по формуле:

$$T_i = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left(\left(\left(\frac{v_2}{\sqrt[3]{v_1^2 \cdot v_4}} \right) - 1 \right)^2 + \left(\frac{v_3}{\sqrt[3]{v_1 \cdot v_4^2}} - 1 \right)^2 \right)},$$

где $i = 3, 4$; $v_1—v_4$ — нормированные по NASC содержания редкоземельных элементов в соответствующей тетраде.

Тип тетрадного эффекта t [Irber, 1999]:

$$t_i = \sqrt{\frac{v_1 \cdot v_4}{v_2 \cdot v_3}}.$$

Статистически достоверным тетрадный эффект считается при величине T_i , большей 0.2. Значения t , меньшие 0.8, маркируют тетрадный эффект W -типа, большие 1.1 — M -типа.

Статистическая достоверность и тип тетрадного эффекта могут рассматриваться как показатели физико-химических условий осадконакопления и диагенетических изменений.

ЛИТОЛОГО-СТРАТИГРАФИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РАЗРЕЗА

Разрез у горы Тологой расположен в Иволгинской впадине на левом берегу р. Селенга, к юго-западу от г. Улан-Удэ. Гора Тологой представляет собой останцовый педиментированный гранитный массив, отделенный от Ганзуринского хребта врезанной меандрой р. Селенга. В уступе врезанной меандры вскрывается комплекс плиоцен-четвертичных отложений (см. рис. 1, Б), прислоненных к подошве горы Тологой.

Разрез рыхлых отложений четко делится на три разновозрастные толщи (Тологой 1 — Тологой 3) согласно детальной биостратиграфической характеристике, приведенной в [Алексеева, 2005]. Каждая из толщ залегает на подстилающих породах с размывом, а средняя толща отделяется от верхней еще и горизонтом погребенной почвы.

Описание разреза приводится снизу вверх.

Нижняя толща (Тологой 1)

Верхний плиоцен

Мощность, м

Слой 1. Суглинок вишнево-темно-коричневый с примесью песка и гравия, очень плотный.	
Погребенная почва	0.7
Слой 2. Глинистый песок, красный до темно-шоколадного цвета. В основании прослеживается горизонт карбонатных конкреций мощностью до 15 см. Граница с подстилающим слоем хорошо выраженная, пологоволнистая. Склоновые отложения	0.6

Нижний плейстоцен. Нижняя часть

Слой 3. Суглинок розовый, опесчаненный, плитчатый, плотный, с прослоями песка пылеватого палево-желтого и супеси окаربоначенной, белесой, тонкослойной. Контакт четкий, пологоволнистый.	
Склоновые облессованные отложения	0.8
Слой 4. Супесь палево-желтая опесчаненная, плохо сортированная с примесью гравия, неясно-слоистая, массивная. Граница плохо выраженная, градиентная. Делювий.....	0.7
Осыпь	4—7

Средняя толща (Тологой 2)

Верхняя часть нижнего плейстоцена

Слой 5. Супесь палево-желтого цвета с линзами и прослоями гравелистого плохо сортированного песка, неясно-слоистая, с линзами белесой окаربоначенной супеси. В слое встречаются многочисленные карбонатные стяжения. Контакт четкий пологоволнистый. Делювий	3
--	---

Слой 6. Супесь красновато-бурого цвета. Контакт пологоволнистый, четкий.	
Погребенная почва	0.6

Средний плейстоцен

Слой 7. Песчано-гравелистые отложения, плохо сортированные, пылеватые, палевого цвета, неясно-слоистые с линзами косослойчатого грубозернистого песка и прослоями белесой окарбоначенной супеси.	
Граница с подстилающим слоем пологоволнистая, четкая. Проллювиально-делювиальные отложения	1.3
Слой 8. Супесь красновато-бурого цвета. Граница пологоволнистая, четкая.	
Погребенная почва	2.3
Слой 9. Песок мелкозернистый палево-желтый с линзами гравелистого песка, плохо сортированный, пылеватый. Слоистость пологоволнистая, линзовидная, плохо выраженная. Граница четкая, ровная. Делювий	2.8
Слой 10. Супесь бурая, массивная, плитчатой структуры. Контакт четкий пологоволнистый.	
Погребенная почва	1

Верхняя толща (Тологой 3)

Верхний плейстоцен

Слой 11. Супесь палево-буровато-желтая, белесая, пористая. Отложения слоя сильно окарбоначены. Контакт нечеткий пологоволнистый. Лессовидные отложения	1.7
Слой 12. Супесь палево-буровато-желтая, переслаивающаяся с супесью и песком, с линзами гравия, белесая, пористая. Отложения слоя сильно окарбоначены. Контакт нечеткий пологоволнистый. Делювий облессованный	0.5
Слой 13. Супесь палево-желтая с крупнозернистым песком и гравием, плохо сортированная, неясно-слоистая. Делювиально-пролювиальные отложения. Контакт нечеткий пологоволнистый	1.4
Слой 14. Супесь палево-желтая с линзами и прослоями гравия и пористой супеси белесой окарбоначенной. Слоистость волнистая, линзовидная. Подошва слоя сильно криотурбирована с инволюциями из подстилающих отложений. Делювий облессованный	1.3
Слой 15. Супесь палево-желтая с песком и гравием, переслаивающаяся с супесью сильноокарбоначенной, белесой. Слоистость волнистая, параллельная, тонкая. Контакт с подстилающим слоем четкий, волнистый. Делювий облессованный	0.3
Слой 16. Песок разнозернистый с прослоями гравия, переслаивающийся с сильноокарбоначенной белесой супесью. Цвет светло-палево-желтый. Слоистость тонкая, пологоволнистая. Контакт с подстилающим слоем нечеткий. Делювий облессованный	0.6
Слой 17. Супесь палево-желтая, окарбоначенная, с тонкими прослоями грубозернистого песка, контакт четкий волнистый. Делювий облессованный	0.6
Слой 18. Переслаивание палево-желтых супесей с крупнозернистым и гравелистым песком, белесых за счет окарбоначенности. Слоистость пологоволнистая, ритмичная, мощность слоев 3—5 см. Контакт с подстилающим слоем хорошо выраженный волнистый. Делювий	0.8

Голоцен

Слой 19. Супесь палево-желтая, белесая за счет окарбоначенности, массивная, плохо сортированная. Контакт с подстилающим слоем резкий, волнистый. Склоновые облессованные отложения	0.9
Слой 20. Супесь палево-желтая с гравелистыми линзами. Склоновые облессованные отложения	0.2
Слой 21. Супесь темно-серая, однородная, массивная. Контакт с подстилающим слоем градиентный.	
Современная почва	0.7

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОТЛОЖЕНИЙ

Изменение всех гранулометрических параметров по разрезу приведено на рис. 2.

Ископаемые почвы выделяются как более мелкозернистые слои, представленные легким—средним суглинком. Формальным параметром для их выделения является динамический фактор F . Он характеризует условия осадконакопления: при $F > 1$ преобладает привнос обломочного материала из ближних и средних источников посредством волочения и сальтации (~до десятка километров), что, скорее всего, имеет место в высокодинамичной среде при сильных порывистых ветрах; при $F < 1$ поступление материала сокращается и происходит приток в виде воздушных аэрозолей, в основном из дальних источников, преобладают постседиментационные преобразования осадков *in situ*, основными из которых являются почвообразовательные [Казанский и др., 2018]. Пониженные значения коэффициента дисперсности k свидетельствуют о локализации тонкодисперсного материала.

На основании гранулометрических данных в разрезе обнаруживается шесть ископаемых почв, верхнюю (слой 17, уровень 26.8—26.2 м) можно отнести к слаборазвитым, визуальным обследованием

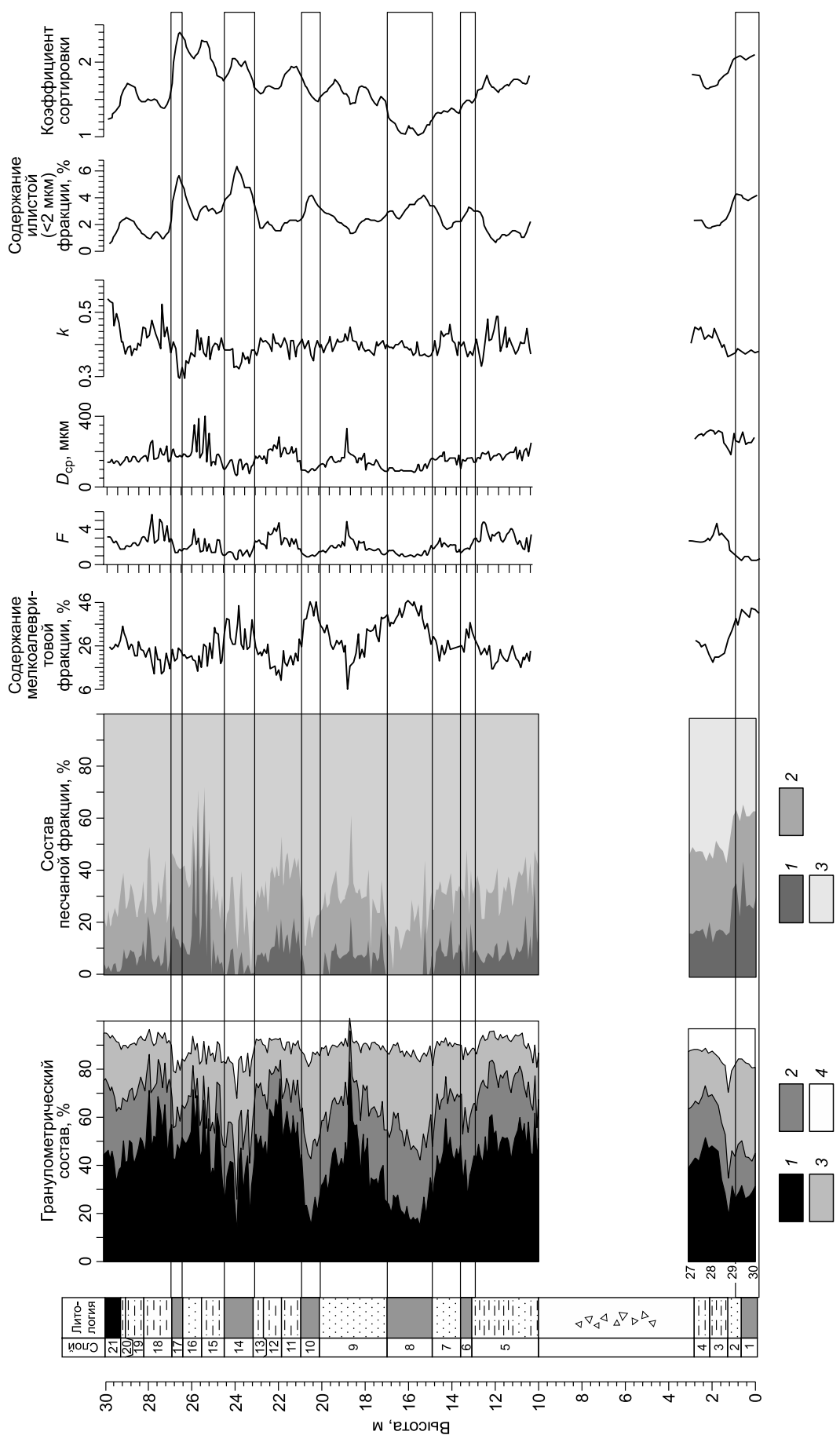


Рис. 2. Гранулометрический состав оглаженных разрезов Тололой.

F — динамический фактор, $D_{ср}$ — средний размер зерна, k — показатель дисперсности отложений. Литологический состав — усл. обозн. см. на рис. 1; гранулометрический состав — фракция: 1 — песчаная, 2 — крупноалевритовая, 3 — мелкоалевритовая, 4 — глинистая; состав песчаной фракции — 1 — крупнозернистый (>500 мкм), 2 — среднезернистый (250—500 мкм), 3 — мелкозернистый (100—250 мкм).

отложений она не фиксируется. Почвенный горизонт 13.6—13.0 м (слой 6) сильно денудирован, но четко выделяется по цвету и текстуре при полевом описании. Для этих почв характерны пониженные по отношению к вмещающим отложениям значения среднего размера зерна: 120—150 мкм. Для сравнения D_{cp} во вмещающих отложениях меняется от 140 до 375 мкм.

Два горизонта погребенных почв в средней части разреза (Тологой 2, слои 10, 8) явно выражены, имеют значительную мощность (от 1 до 2 м). В них D_{cp} варьирует между 73 и 88 мкм.

Погребенная почва в нижней части разреза (Тологой 1) отчетливо выделяется при геологическом описании, явно выражена, имеет мощность 0.7 м. В ней D_{cp} варьирует от 113 до 150 мкм, а значения динамического фактора меньше единицы. Отложения здесь обладают недостаточной степенью сортировки, что связано, видимо, с особенностями генезиса отложений нижней толщи (продукты ближнего переотложения красноцветной коры выветривания в условиях мелководного озерного водоема). Близость коренных берегов сказывается в обогащении субстрата мелким обломочным материалом.

По совокупности гранулометрических показателей в верхней и средней частях разреза выделяются уровни наиболее крупнозернистых отложений: 28.0—27.0; 26.0—25.2; 23.0—21.0; 18.7 м. Начиная с уровня 14.6 м, средний размер зерна довольно монотонно возрастает, кроме почвенного горизонта.

Предметом дискуссии является слой 14 (уровень 24.5—23.4 м, Тологой 3, верхняя часть разреза), обладающий повышенным (относительно других слоев) содержанием глинистой фракции, снижением среднего размера зерна, пониженным значением показателя дисперсности k и значением динамического фактора $F < 1$. Все эти параметры сравнимы с таковыми в почвенных горизонтах 21—20 м и 16.4—15.0 м (слои 10 и 8) и отличны от характеристик подстилающих и перекрывающих слой 14 отложений.

Поскольку, за исключением погребенных почв, отложения содержат 40—80 % песчаной фракции (> 100 мкм) и от 65 до 95 % — физического песка (сумма крупноалевритовой и песчаной фракций), то имеет смысл рассмотреть отдельно состав песчаной фракции: содержание мелкозернистого (100—250 мкм), среднезернистого (250—500 мкм) и крупнозернистого песка (>500 мкм) (см. рис. 2, справа).

В предполагаемых интервалах погребенных почв преобладает мелкозернистый песок и в большинстве образцов отсутствует крупнозернистый песок, за исключением самой верхней слабообразованной почвы (26.8—26.2 м). В целом по распределению песчаных фракций картина сохраняется и даже становится более четкой.

Из полученных данных следует, что отложения разреза представлены песками, супесями и суглинками, которые циклически чередуются, что видно из диаграмм на рис. 2. Но наиболее ярко цикличность осадконакопления отражена на диаграммах песчаных фракций (см. рис. 2, справа). Цикличность проявляется в снижении поступления крупнозернистого песка (формировались лессовидные супеси), в определенные периоды до нуля, и в увеличении количества этой фракции песка до 20—30 % (для горизонта 26—25 м до 70 %) в другие периоды (формировались связные пески). Таких циклов на диаграммах для толщ Тологой 2 и Тологой 3 отражено четыре, все они заканчиваются формированием почвенных горизонтов, включая современную почву. Все почвы в этой части разреза (включая современную) являются более однородными по гранулометрическому составу и, соответственно, лучше сортированы, чем песчаные и супесчаные отложения.

По совокупности гранулометрических характеристик верхнюю часть разреза (Тологой 2 и Тологой 3) можно поделить на два участка, граница между которыми проходит приблизительно по ископаемой почве слоя 10 (21—20 м). Верхняя часть (Тологой 3) сложена отложениями с большой изменчивостью гранулометрического состава, большинство отложений характеризуется умеренной и недостаточной степенью сортированности (см. рис. 2). Отложения толщи Тологой 2 сформировались при более спокойном характере осадконакопления с постепенно меняющимися значениями гранулометрических показателей внутри слоев. Большинство отложений здесь имеют умеренную степень сортированности, а на уровне 17—13 м их можно считать даже хорошо сортированными. Слои 7, 8, 9, 10 формировались достаточно цельной толщей, без существенных перерывов. Небольшие перерывы могут подразумеваться до и после образования почв. Верхняя часть разреза (слои 11—21) полностью формировалась в режиме переменного осадконакопления либо денудации, об этом же свидетельствуют резкие скачки параметров на границе и внутри слоев.

Средняя дисперсность глинистых компонентов в разрезе Тологой (коэффициент k) составляет 0.4, что характеризует глинистые компоненты, слагающие разрез, как мелкопылеватые и свидетельствует о слабом развитии почвообразующих процессов и о преимущественном присутствии в составе глинистых компонентов минералов хлорит-иллитовой группы.

Таким образом, гранулометрический анализ отложений выделяет следующие особенности седиментации в разрезе Тологой:

1. Циклическое осадконакопление, прослеживаемое по поведению всех фракций, но особенно ярко по изменению содержания песка. В пределах толщ Тологой 2 и Тологой 3 выявлено четыре основных цикла, каждый из которых заканчивается формированием почвенных горизонтов.

2. Большая часть отложений имеет сложный гранулометрический состав, представленный различными, но часто равными или близкими по количеству популяциями зерен, основными являются зерна различной песчаной размерности. Такие фракции, как правило, доставляются путем волочения на небольшие (до первых км) расстояния. Второй по объему популяцией можно считать зерна крупноалевритовой размерности, основным способом поступления которых является сальтация. Источником зерен такой размерности может быть область сноса в нескольких километрах (первых десятков километров) от участка седиментации. Третью популяцию (мелкозернистую) составляет мелкоалевритовая фракция, способом транспортировки которой является воздушная взвесь. Эти зерна могут быть принесены с расстояний в сотни километров. Четвертая популяция по размерам зерен классифицируется как глинистая или глинисто-илистая фракция, в которой илистая фракция представляет собой зерна размером < 2 мкм (см. рис. 2). Изменения содержания илистой фракции отражают влияние нескольких процессов. В палеопочвах ее повышенное содержание связано с постгенетическим преобразованием отложений в периоды педогенеза и криогенеза и, как следствие, с образованием глинистых минералов [Добровольский, 1976]. По объему илистая фракция в ископаемых почвах достигает 4—7 % и, соответственно, является значимым компонентом в ансамбле зерен, составляющих изученные отложения. При делювиальных процессах происходит вынос тонкозернистого материала под действием процессов плоскостного смыва, что приводит к пониженной концентрации илистой фракции в делювиальных слоях.

3. Осадочный материал транспортировался на участок седиментации в основном из ближнего источника. На этапах потеплений и формирования почвенных горизонтов порывы ветра снижались, уменьшалась сила ветрового потока, в этих условиях на первый план выходили дальние и средней дальности источники сноса осадочного материала. В периоды наиболее интенсивных педогенных процессов поступление песчаного материала снижалось и иногда до нуля (см. рис. 2), преобладали биохимические постседиментационные преобразования отложений *in situ*.

4. Если считать гранулометрические особенности отложений климатически обусловленными, то в данном районе долины Селенги можно предположить аридный климат с небольшими изменениями в сторону повышения влажности в периоды формирования почв. При этом вероятна интенсивная ветровая деятельность в сухие периоды с сильными ураганскими порывами.

5. Отложения толщи Тологой 2 (уровни 20—10 м) формировались в относительно более спокойных ветровых условиях, чем отложения толщи Тологой 3.

6. В гранулометрическом составе проявлена специфика осадконакопления, почвообразования с криогенным преобразованием субстрата и делювиального перераспределения материала по склону, выраженная в закономерном изменении гранулометрических параметров. Учитывая гранулометрический состав, генезис отложений толщ Тологой 2 и Тологой 3 можно интерпретировать как делювиальный (или олово-делювиальный, вторично-делювиальный).

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОТЛОЖЕНИЙ

Главные и рассеянные элементы. Анализ валового химического состава отложений Тологойского разреза показывает, что описываемые породы характеризуются малыми вариациями содержаний петрогенных оксидов, за исключением CaO и CO_2 , и микроэлементов (кроме хрома).

Вариабельность петрохимических модулей невысока, что говорит об интенсивном перемешивании и гомогенизации отложений при протекании склоновых процессов.

Высокие значения щелочного модуля ЩМ и НКМ и пониженные значения ГМ указывают на преобладание в отложениях кварца и полевого шпата на общем фоне низкого содержания глинистых минералов. О значительном количестве полевых шпатов в отложениях свидетельствуют и повышенные (более 0.4) значения НКМ.

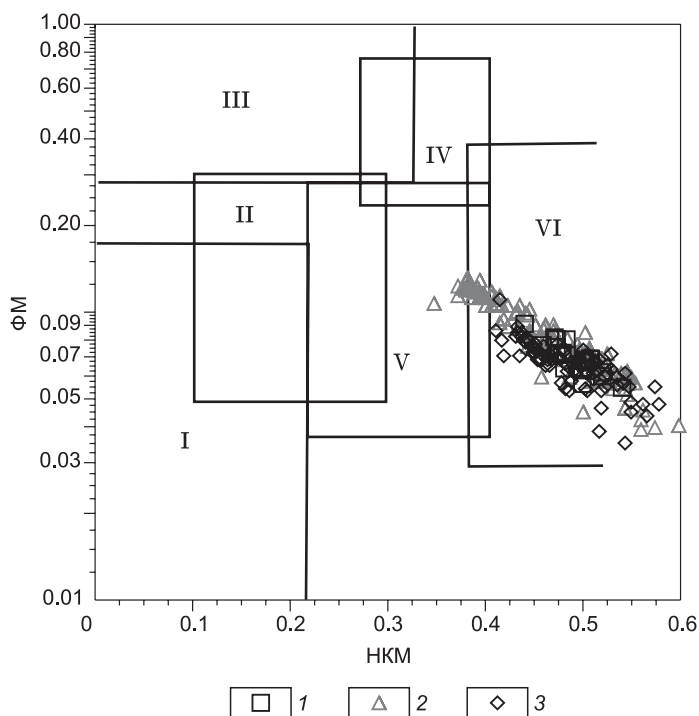
Исследованные породы по средней величине гидролизатного модуля ($\text{ГМ} = 0.29$) могут быть отнесены к гипогидролизатам, т. е. слабо преобразованным процессами выветривания образованиям. Натриевый модуль НМ отражает течение процессов химического выветривания и вызревания поступающего в области осадконакопления материала. Он тем ниже, чем выше степень химической дифференциации вещества на палеоводосборах [Акульшина, 1990]. Изученные нами отложения характеризуются крайне низкой степенью химической дифференциации, значения НМ варьируют от 0.17 до 0.26 (значение модуля для слабой степени химической дифференциации считается большим 0.03). Сопоставление значений модулей ЩМ, НМ и КМ показывает, что отложениям разреза свойственно преобладание плагиоклазов, а не калиевых полевых шпатов.

Расположение фигуративных точек составов отложений на модульной диаграмме для систематичности глинистых пород (рис. 3) имеет кластерный характер.

Большинство точек сосредоточено в поле VI — гидрослюдистого состава со значительной примесью дисперсных полевых шпатов с наложением поля V хлорит-сметтит-гидрослюдистого состава.

Рис. 3. Диаграмма соотношения ФМ и НКМ [Юдович, Кетрис, 2000].

1 — Тологой 1, 2 — Тологой 2, 3 — Тологой 3. Отложения: I — преимущественно каолиновые, II — преимущественно смектитовые с примесью каолинита и гидрослюды, III — преимущественно хлоритовые с примесью гидрослюды, IV — хлорит-гидрослюдистые, V — хлорит-смектит-гидрослюдистые, VI — гидрослюдистые со значительной примесью дисперсных полевых шпатов.



Таким образом, по ассоциациям глинистых минералов между палеопочвами и субстратом различия отсутствуют.

Индекс зрелости осадков ICV изменяется от 0.8 до 1.3, что может служить доказательством преобладания в отложениях неглинистых силикатных минералов (значения индекса зрелости осадков больше единицы говорят о низкой степени зрелости пород (малое количество глинистых минералов) в области седиментации).

Вариации значений основных литохимических индикаторов палеоклимата CIA, CIW и PIA свидетельствуют о преобладании аридных и субаридных обстановок осадконакопления, это же следует и из положения фигуративных точек составов отложений разреза на диаграмме Ерофеева—Цеховского [Ерофеев, Цеховский, 1983] (рис. 4). Максимальные значения индексов CIW и PIA характерны для горизонтов палеопочв — слои 1 и 14.

Изменение петрохимических модулей и индикаторов палеоклимата по разрезу показано на рис. 5, ряда геохимических индексов на рис. 6.

Для оценки палеоклимата использованы значения коэффициента ТМ. Вариации коэффициента по разрезу (см. рис. 5) свидетельствуют о накоплении осадков нижней толщи (Тологой 1) в условиях теплого аридного климата, а средней толщи (Тологой 2) — в условиях более холодного и влажного климата, с усилением аридизации климата при накоплении осадков верхней части разреза (Тологой 3).

Распределение ТМ по разрезу согласуется с изменением гранулометрического состава пород, а также с изменением CIA и ICV (см. рис. 5).

Средние величины химического индекса изменения CIA в изучаемых отложениях составляют 65, показатель варьирует от 49 до 69, что подтверждает незначительную степень изменения пород на палеоводосборах. Изменения CIA и ICV синхронны, увеличение значений CIA при одновременном уменьшении ICV маркирует периоды гумидизации климата.

Значения алюмокремниевого модуля АМ (см. рис. 4), являющегося индикатором количества глинистых минералов, варьируют от 0.19 до 0.25, что говорит о незначительном фракционировании материала в процессе транспортировки и слабом его преобразовании в процессе выветривания.

Распределение петрохимических модулей и индексов по разрезу показывает слабую геохимическую стратификацию, различия

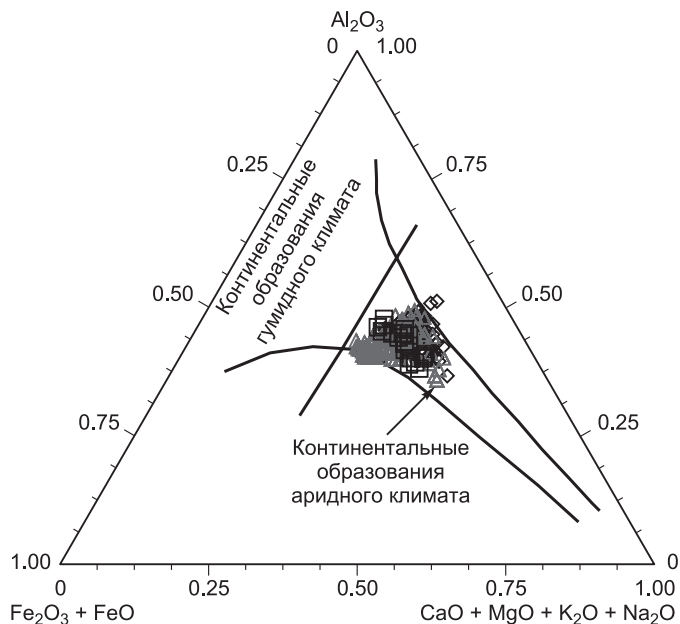


Рис. 4. Распределение проб разновозрастных толщ разреза Тологой на диаграмме Ерофеева—Цеховского.

Усл. обозн. см. на рис. 3.

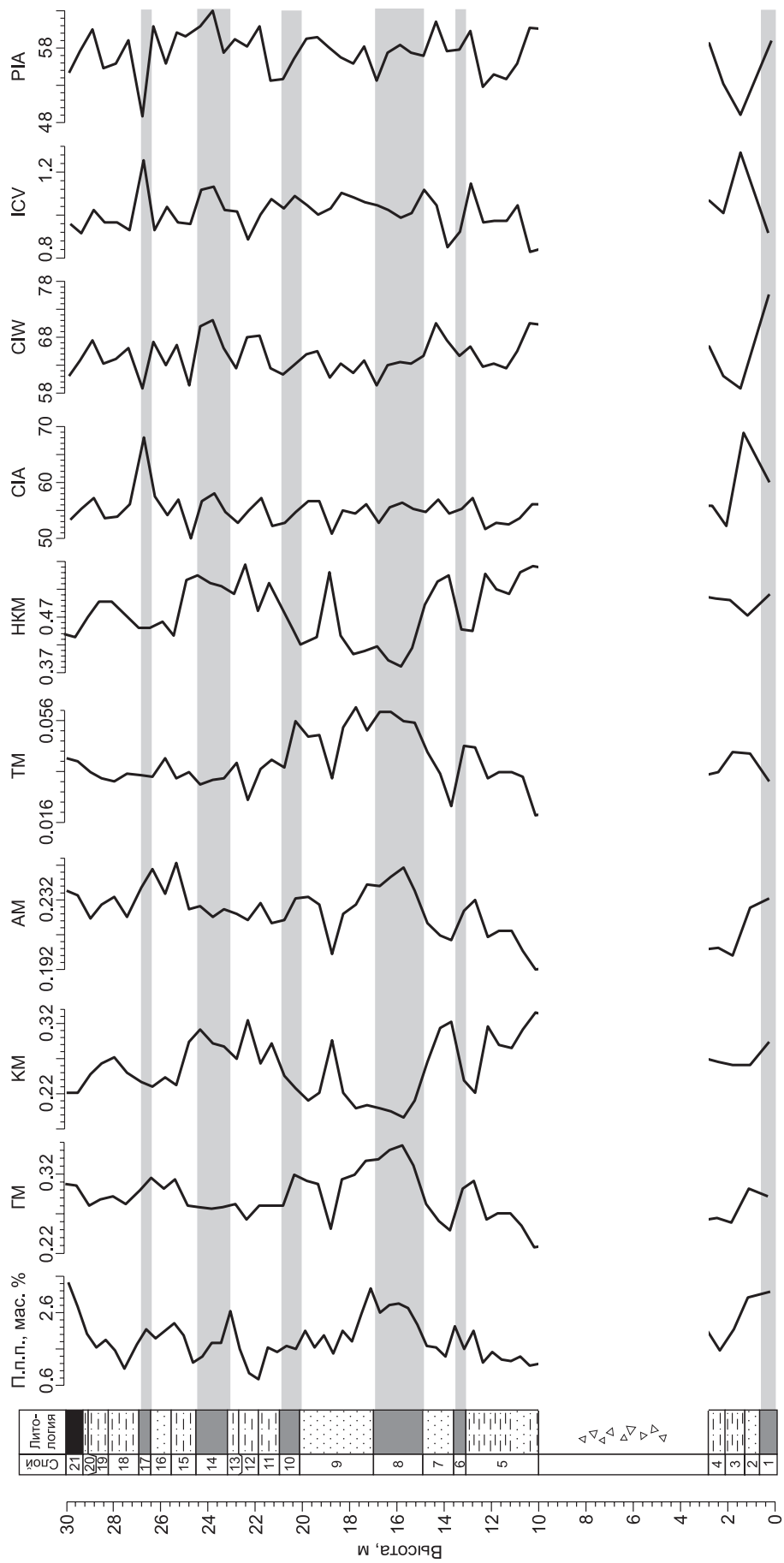


Рис. 5. Распределение в геохимическом профиле петрохимических модулей и индикаторов палеоклимата.

Усл. обозн. см. на рис. 1.

между погребенными почвами и вмещающими их лессовидными супесями и суглинками отсутствуют, однотипны ассоциации глинистых минералов. Это может быть результатом проявления флювиальных процессов, а также процессов постседиментационного преобразования осадков в условиях криогенеза.

Преобразование осадка в результате криогенных воздействий определяется в основном его исходным составом (наличием устойчивых к криогенному выветриванию минералов и активных компонентов: коллоидных форм соединений железа, алюминия и марганца, карбонатов, растворимых солей и др.), а также присутствием органического вещества и природой порового раствора. Глинистые минералы отличаются высокой дисперсностью, большой удельной поверхностью, гидрофильностью, способностью к адсорбции и ионному обмену. Очевидно, что химический состав глинистой фракции дисперсных отложений в общем будет отражать степень криогенных изменений осадка.

Вариации $A/CMKN$ ($Al_2O_3/(CaO + MgO + Na_2O + K_2O)$) (см. рис. 5) — показателя концентрации относительно нерастворимых (глинистых) компонентов по сравнению с компонентами, высвобождаемыми при процессах гидролиза [Гражданкин, Маслов, 2012], показывают, что большая часть разреза (слои 5—16) формировалась в условиях многократного циклического промерзания—протаивания: значения коэффициента, меньшие единицы, при одновременном увеличении значений индекса кальцификации палеопочв $(CaO + MgO)/Al_2O_3$ свидетельствуют об аутигенном образовании карбонатов.

Для горизонта палеопочв (слой 17) типичны повышенные значения $Al_2O_3/(CaO + MgO + Na_2O + K_2O)$ и повышенные значения величины индикатора кальцификации палеопочв $(CaO + MgO)/Al_2O_3$. Изменения интенсивности окисления, характеризующиеся коэффициентом $(Fe_2O_3 + MnO)/Al_2O_3$, максимально проявлены при формировании палеопочвы слоя 1 (Тологой 1), палеопочв средней части разреза (Тологой 2, слои 8 и 10).

Высокие значения коэффициента Ba/Sr свидетельствуют о развитии процессов гидролиза.

Наблюдаемое по разрезу изменение геохимических палеомаркеров — Co/Zr , Cu/Zr , Cr (см. рис. 6) — позволяет провести геохимическую стратификацию разреза и сделать вывод, что:

- в целом изменения климата надежно фиксируются распределением этих палеомаркеров;
- в холодные периоды при наличии сезонно-талого слоя Co и Cr выносятся более интенсивно, чем в безмерзлотных ландшафтах, а Zr инертен, поэтому понижение значений параметров маркирует наличие похолодания, и наоборот;

- наиболее резкие изменения климата свойственны средней части разреза (горизонты 10—20 м).

Полученные данные показали, что климат во время формирования отложений разреза носил циклический характер: периоды увлажнения сменялись аридными эпохами разной интенсивности и продолжительности. Положение горизонтов ископаемых почв согласуется с установленным по гранулометрическим характеристикам. Слой палеопочв в интервале 24.5—23.4 м, выделяемый таким образом, отчетливо выражен в геохимическом профиле.

Наиболее теплыми условиями и усилением процессов выветривания и выщелачивания характеризуется этап накопления отложений горизонта палеопочв слоя 8 (16.4—15.0 м), который сопровождался протеканием различных почвенных процессов и ростом биологической активности, а также уменьшением интенсивности засоления и окарбоначивания.

Резкое ухудшение климатических условий по геохимическим данным фиксируется между горизонтами палеопочв 16.4—15.0 м и 13.6—13.0 м. Уменьшается содержание органики (п.п.), падают содержания Cr , значения индексов Co/Zr , Cu/Zr , уменьшаются значения всех петрохимических индексов, за исключением НКМ, характеризующим отношение легкорастворимых компонентов к глинистым, оно растет (количество глинистой фракции падает, т. е. уменьшается интенсивность выветривания). По данным [Алексеева, 2005], именно в этом интервале разреза была зафиксирована крупная псевдоморфоза по ледяному клину с внедрением этой криогенной структуры в подстилающую почву и ее разрывом. Те же закономерности фиксируются и для интервала разреза 20.0—16.4 м.

На основании комплекса данных геохимических исследований составлена гипотетическая модель изменения климатических условий в среде осадконакопления разреза Тологой (см. рис. 6, справа). В исследуемом геохимическом профиле четко фиксируются этапы, в период которых на территории преобладали криогенные условия: время формирования слоев 5, 7, 9, 11—13. Отложениям этих уровней свойственны минимальные значения коэффициентов засоления и высокие — окарбоначивания, а также низкие значения коэффициентов выщелачивания и окисления.

Систематика редкоземельных элементов. Характеры распределения РЗЭ для всех образцов четвертичных отложений однотипны, отмечается избыток легких лантаноидов при относительном дефиците тяжелых, коэффициент $LP3Э/TP3Э$ варьирует в пределах 1.7—2.4. Тетрадный эффект лантаноидов, рассчитанный для третьей (Nd , Sm , Eu , Gd) и четвертой (Er , Tm , Yb , Lu) тетрад, близок к M -типу (его значения варьируют от 0.9 до 1.1). По сумме РЗЭ породы Тологойского разреза различаются незначительно (рис. 7), что соответствует невысоким скоростям осадконакопления [Балашов, 1976].

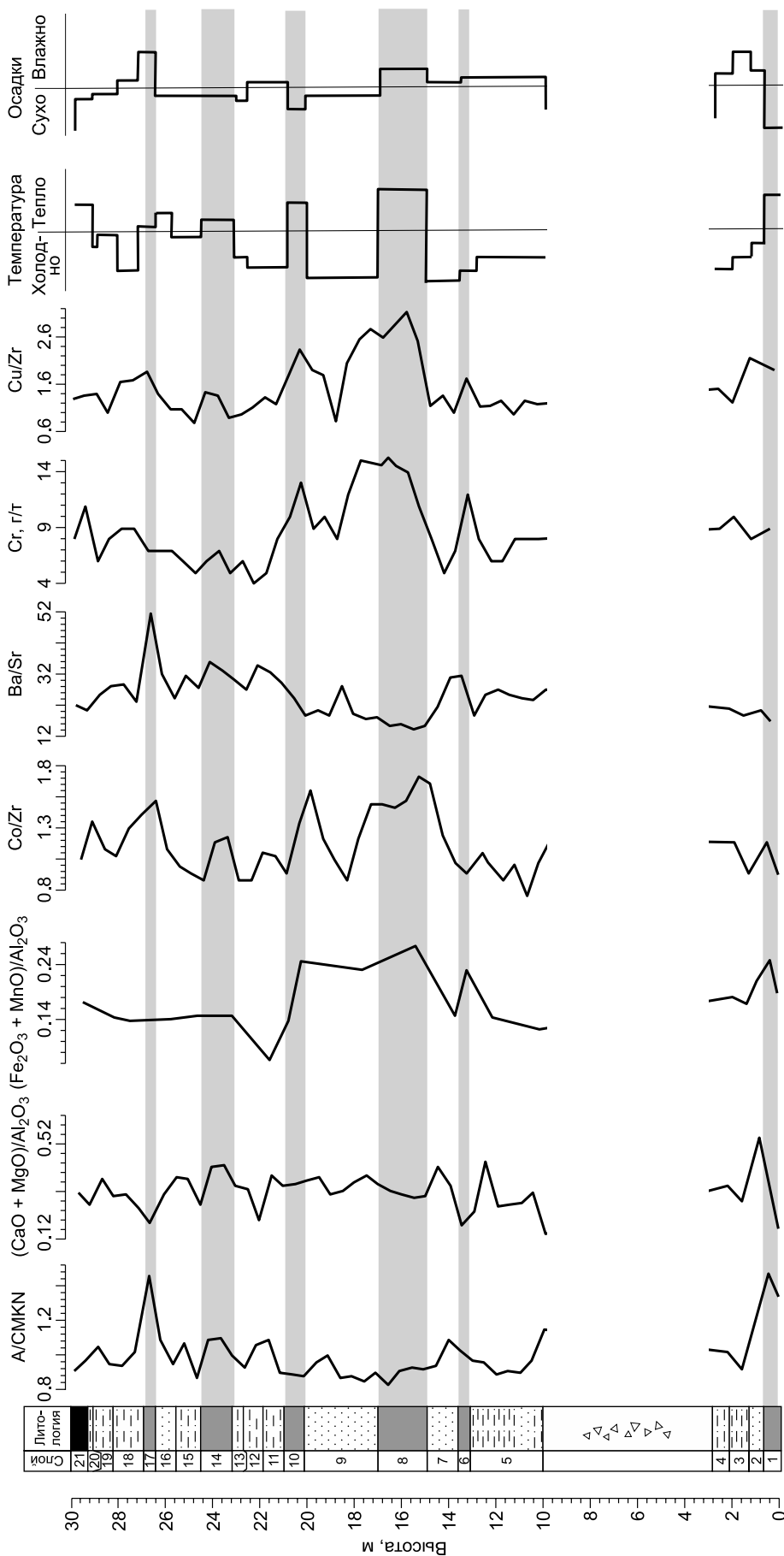


Рис. 6. Распределение геохимических индексов в профиле.

Справа показано гипотетическое изменение температуры и влажности, реконструированное по комплексу геохимических данных для среды осадконакопления разреза. Усл. обозн. см. на рис. 1.

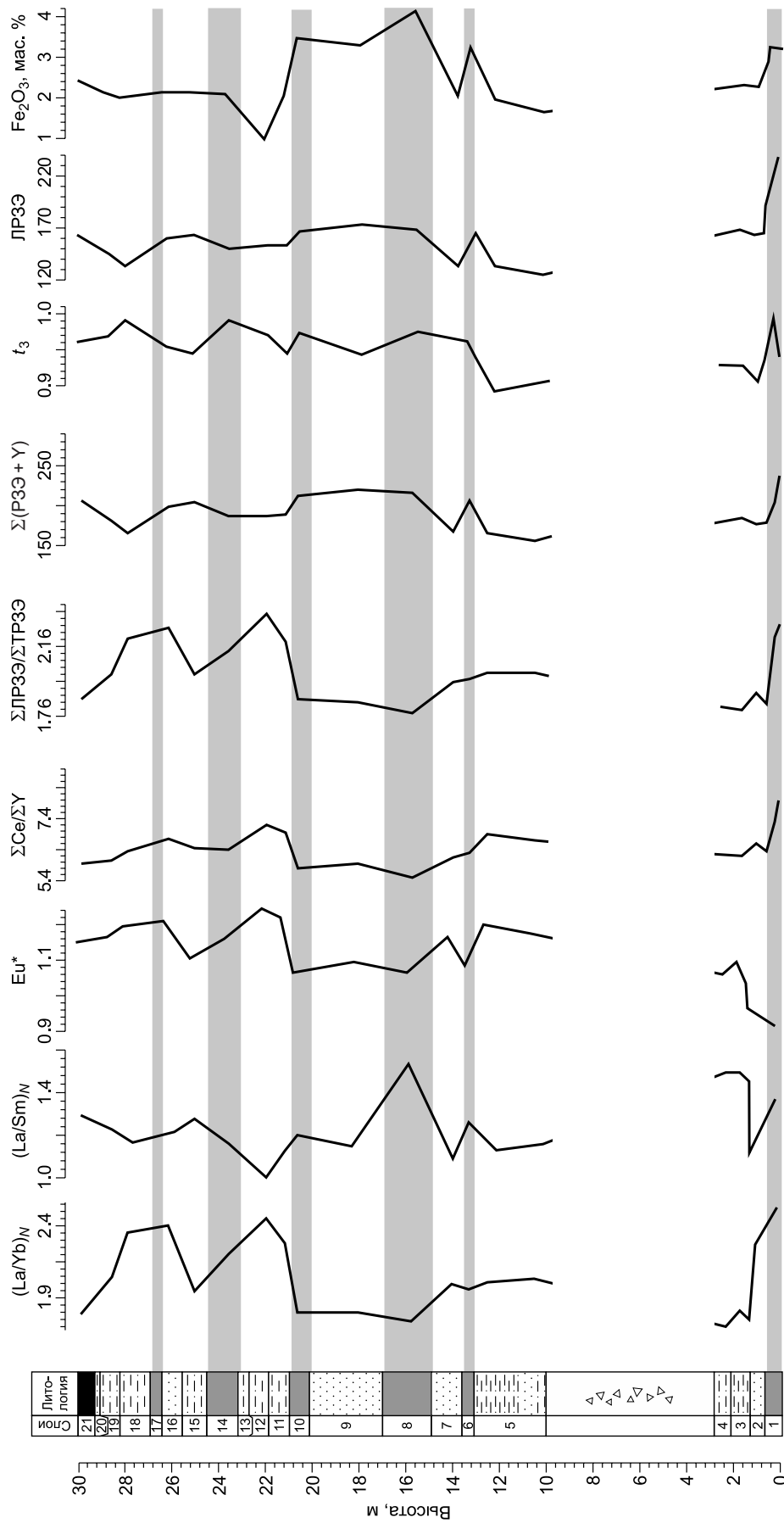


Рис. 7. Вариации показателей, отражающих степень фракционирования P33, в геохимическом профиле.

Усл. обозн. см. на рис. 1.

Цериевая аномалия не выражена, в среднем составляет 0.96. В большинстве проб проявлена европиевая аномалия (1.10—1.23), что может свидетельствовать о значительных количествах плагиоклаза в отложениях разреза.

Фракционирование между ЛРЗЭ, СРЗЭ и ТРЗЭ в осадке связано с различными соотношениями присутствующих Fe- и Mn-оксидов (гидроксидов). Легкие РЗЭ сорбируются на поверхности этих минеральных фаз преимущественно и быстрее, чем тяжелые РЗЭ, особенно с увеличением pH раствора [De Vaar et al., 1988]. Данные рисунка 7 показывают, что максимальное обогащение ЛРЗЭ происходит в палеопочвенных горизонтах.

Повышенные значения показателя $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$ (среднее 6.53) связаны с обогащением тонкой фракции отложений полевыми шпатами и гидрослюдами, а также преобразованием гидрослюдов в результате криогенного выветривания.

Основные механизмы, приводящие к фракционированию РЗЭ (селективному обогащению — выносу различных членов группы лантаноидов в осадке), представлены сорбционными процессами, реакциями ионного обмена, реакциями изоморфного замещения щелочноземельных элементов в структуре породообразующих и аутигенных минералов, комплексообразованием [Ivanova et al., 2017]. Степень фракционирования РЗЭ зависит, в первую очередь, от кислотно-щелочных условий среды и ионной силы раствора. В случае раннего диагенеза отложений в криогенных условиях при повышении щелочности поровых растворов и их высокой ионной силы глинистая фракция отложений будет обогащена СРЗЭ, которые сорбируются на поверхности глинистых частиц или вступают в реакции ионного обмена с катионами щелочных и щелочноземельных металлов в гексагональных углублениях межслоевого промежутка в структуре глинистых минералов. ЛРЗЭ преимущественно сорбируются на поверхности гидроксосоединений железа и марганца, также участвуют в изоморфном замещении Ca^{2+} в структуре аутигенных или породообразующих минералов. При доминировании сорбционных процессов отношение La/Yb возрастает, а La/Sm не изменяется. При доминировании процессов изоморфного замещения наблюдается увеличение отношения La/Sm , при (хемосорбции) — уменьшение, при незначительном изменении отношения La/Yb .

Полученное для пород разреза соотношение $(\text{La}/\text{Yb})_N—(\text{La}/\text{Sm})_N$ (см. рис. 7) отражает характер фракционирования РЗЭ в водной среде (поровые растворы) и осадке. La/Yb варьирует в пределах 1.70—2.54, медианное значение 2, La/Sm — в пределах 1.03—1.57, медианное значение 1.15.

Очевидно, что ведущую роль в процессе фракционирования РЗЭ играли как сорбционные процессы, так и процессы изоморфного замещения. Это подтверждается и близким к *M*-типу тетрад-эффектом для третьей и четвертой тетрад. Обычно тетрадный эффект *M*-типа указывает на ассоциацию РЗЭ с твердой фазой [Masuda et al., 1987].

Распределение показателей $(\text{La}/\text{Yb})_N$ и $(\text{La}/\text{Sm})_N$ по разрезу позволяет выделить участки профиля, затронутые криогенезом: слои 5, 7, 9, 11—13.

В ряде образцов, как было показано на рис. 7, отмечается близкий к порогу статистической значимости тетрадный эффект лантаноидов для третьей тетрады (t_3), значения его близки к *M*-типу. Максимальные его изменения проявлены в основном в палеопочвенных горизонтах. Уменьшение его в ряде горизонтов также может быть свидетельством криогенных условий, так как этот параметр отражает фракционирование СРЗЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная ревизия разреза Тологой позволила выделить ряд особенностей седиментации и раннего диагенеза отложений:

1. Циклическое осадконакопление, прослеживаемое по поведению всех гранулометрических фракций, но особенно — по изменению содержания песка. В пределах толщ Тологой 2 и Тологой 3 выявлено четыре основных цикла осадконакопления, каждый из которых заканчивается формированием почвенных горизонтов (педокомплексов).

2. Осадочный материал транспортировался на участок седиментации в основном из ближнего источника. На этапах потеплений и формирования почвенных горизонтов порывы ветра снижались, уменьшалась сила ветрового потока, в этих условиях на первый план выходили дальние и средней дальности источники сноса осадочного материала. В периоды наиболее интенсивных педогенных процессов поступление песчаного материала снижалось и иногда до нуля (см. рис. 2), преобладали биохимические постседиментационные преобразования отложений *in situ*.

3. Если считать гранулометрические особенности отложений климатически обусловленными, то в данном районе долины Селенги можно предположить аридный климат с небольшими изменениями в сторону повышения влажности в периоды формирования почв. При этом вероятно интенсивная ветровая деятельность в сухие периоды с сильными ураганскими порывами.

4. Отложения толщи Тологой 2 (высота 10—20 м) формировались в относительно более спокойных ветровых условиях, чем отложения толщи Тологой 3.

5. В гранулометрическом составе проявлена специфика осадконакопления, почвообразования с криогенным преобразованием субстрата и делювиального перераспределения материала по склону, выраженная в закономерном изменении гранулометрических параметров. Учитывая гранулометрический состав, генезис отложений толщ Тологой 2 и Тологой 3 можно интерпретировать как делювиальный (или олово-делювиальный, вторично делювиальный).

6. Климат во время формирования отложений разреза носил циклический характер: периоды увлажнения сменялись аридными эпохами разной интенсивности и продолжительности.

7. Наиболее теплыми условиями и активизацией процессов выветривания и выщелачивания в плейстоцене характеризуется этап накопления отложений горизонта палеопочв слоя 8 (16.4—15.0 м), который сопровождался активизацией различных почвенных процессов и биологической активности, а также уменьшением интенсивности засоления и окисления.

8. В исследуемом геохимическом профиле четко фиксируются этапы, в период которых на территории преобладали криогенные условия: время формирования слоев 5, 7, 9, 11—13. Для отложений этих уровней типичны минимальные значения коэффициентов засоления, высокие — окисления, а также низкие значения коэффициентов выщелачивания и окисления, положительная европиевая аномалия, повышенные $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$, пониженные $(\text{La}/\text{Sm})_N$.

9. Распределение петрохимических модулей и индексов по разрезу показывает слабую геохимическую стратификацию, различия между погребенными почвами и вмещающими их лессовидными супесями и суглинками отсутствуют, однотипны ассоциации глинистых минералов. Это может быть результатом проявления флювиальных процессов, а также процессов постседиментационного преобразования осадков в условиях криогенеза.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФ (грант 19-17-00216, геохимия, гранулометрия), РФФИ (гранты 15-05-01858, 16-05-00586, 18-05-00215, 20-05-00247), интеграционного проекта № 0341-2016-001 и проекта № 075-15-2019-866.

ЛИТЕРАТУРА

Акульшина Е.П. Эволюция физико-химических условий осадкообразования в рифее и фанерозе (на примере Сибири) // *Среда и жизнь в геологическом прошлом*. Новосибирск, Наука, 1990, с. 17—26.

Александрова Л.П., Вангенгейм Э.А., Гербова В.Г., Голубева Л.В., Равский Э.И. Новые данные о разрезе антропогенных отложений горы Тологой (Западное Забайкалье) // *Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода*, 1963, № 28, с. 84—101.

Алексеева Н.В. Новые данные о времени возникновения мерзлоты в Забайкалье // *Байкал — природная лаборатория для исследований изменений окружающей среды и климата*. Международное совещание. Тезисы докладов. Т. 2. Иркутск, Лисна, 1994, с. 1—2.

Алексеева Н.В. Эволюция природной среды Западного Забайкалья в позднем кайнозое (по данным фауны мелких млекопитающих) / Ред. А.В. Додонов. М., ГЕОС, 2005, 141 с.

Базаров Д.Б. Четвертичные отложения и основные этапы развития рельефа Селенгинского среднегорья. Улан-Удэ, Бурят. кн. изд-во, 1968, 166 с.

Базаров Д.Б. Кайнозой Прибайкалья и Западного Забайкалья. Новосибирск, Наука, 1986, 179 с.

Балашов Ю.А. Геохимия редкоземельных элементов. М., Наука, 1976, 268 с.

Балашов Ю.А. Изотопно-геохимическая эволюция мантии и коры Земли. М., Наука, 1985, 224 с.

Березин П.Н. Особенности распределения гранулометрических элементов почв и почвообразующих пород // *Почвоведение*, 1983, № 2, с. 64—72.

Бибикова В.И., Верещагин Н.К., Гарутт В.Е., Юрьев К.Б. Новые материалы по четвертичной фауне Забайкалья (Ошурково, Тологой) // *Материалы и исследования по археологии СССР*. М.-Л., Изд-во АН СССР, 1953, вып. 39, с. 463—475.

Вангенгейм Э.А. Палеонтологическое обоснование стратиграфии антропогена Северной Азии. М., Наука, 1977, 172 с.

Вангенгейм Э.А., Беляева Е.И., Гарутт В.Е., Дмитриева Е.Л., Зажигин В.С. Млекопитающие эоплейстоцена Западного Забайкалья. М., Наука, 1966, 164 с.

Гнибиденко З.Н., Ербаева М.А., Поспелова Г.А. Палеомагнетизм и биостратиграфия некоторых отложений верхнего кайнозоя Западного Забайкалья // *Палеомагнетизм мезозоя и кайнозоя Сибири и Дальнего Востока*. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1976, с. 75—95.

Градзинский Р., Костецкая А., Радомский А., Унруг Р. Седиментология. Пер. с польского / Ред. Р. Унруг. М., Недра, 1980, 640 с.

Гражданкин Д.В., Маслов А.В. Литохимические особенности примитивных палеопочв в разрезе средней части бедерьшинской подсвиты зильмердакской свиты верхнего рифея на южной окраине г. Миньяр // Ежегодник-2011, 2012, с. 77–84. (Тр. ИГТ УрО РАН, вып. 159).

Добровольский В.В. География почв с основами почвоведения. М., Просвещение, 1976, 288 с.

Ербаева М.А. История антропогенной фауны зайцеобразных и грызунов Селенгинского среднегорья. М., Наука, 1970, 132 с.

Ерофеев В.С., Цеховский Ю.Г. Парагенетические ассоциации континентальных отложений (Сеймейство аридных парагенезов. Эволюционная периодичность). М., Наука, 1983, 192 с.

Иванова В.В. Редкоземельные элементы в отложениях плейстоцена Центральной и Восточной Якутии // Материалы совместной Международной конференции «Геоморфология и палеогеография полярных регионов». СПб, Изд-во СПб ун-та, 2012, с. 199—203.

Иванова В.В., Щетников А.А., Филинов И.А., Вещева С.В., Казанский А.Ю., Матасова Г.Г. Усть-Одинский опорный разрез верхнего неоплейстоцена Иркутского амфитеатра Сибирской платформы: лито- и геохимические особенности // Литология и полезные ископаемые, 2016, № 3, с. 215—232.

Иваньев Л.Н. К вопросу стратиграфического расчленения кайнозойских красноцветов Западного Забайкалья по данным палеонтологии // Изв. Вост.-Сиб. отд. Геогр. общества СССР, 1966, т. 65, с. 88—94.

Калинин П.И., Алексеев А.О., Савко А.Д. Лессы, палеопочвы и палеогеография квартала юго-востока Русской равнины. Воронеж, ВГУ, 2009, 139 с. (Труды НИИ геологии ВГУ, вып. 58).

Казанский А.Ю., Матасова Г.Г., Щетников А.А., Филинов А.И., Ербаева М.А. Петромагнитные и гранулометрические характеристики четвертичных отложений опорного разреза Тологой (Бурятия, Россия) // Проблемы геокосмоса: материалы 12-й Международной школы-конференции (г. Санкт-Петербург, Петергоф, 8—12 октября 2018 г.). СПб, Изд-во СПб ун-та, 2018, с. 105—112.

Лискун И.Г., Ренгартен Н.В. Состав и условия образования антропогенных отложений горы Тологой (Западное Забайкалье) // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода, 1963, № 28, с. 101—110.

Маслов А.В. Осадочные породы: методы изучения и интерпретации полученных данных. Екатеринбург, Изд-во УГГУ, 2005, 289 с.

Маслов А.В. Использование лито- и геохимических данных для реконструкции условий накопления осадочных образований // Металлогения древних и современных океанов: материалы XII школы-конференции (г. Миасс). Миасс, Имин УрО РАН, 2006, с. 25—30.

Маслов А.В., Крупенин М.Т., Петров Г.А., Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П., Корнилова А.Ю. Некоторые геохимические особенности и условия образования тонкозернистых терригенных пород себриянской и сывлицкой серий Среднего Урала // Литосфера, 2007, № 2, с. 3—28.

Равский Э.И. Осадконакопление и климаты Внутренней Азии в антропогене. М., Наука, 1972, 336 с.

Равский Э.И., Александрова Л.П., Вангенгейм Э.А., Гербова В.Г., Голубева Л.В. Антропогенные отложения юга Восточной Сибири. М., Наука, 1964, 278 с. (Тр. ГИН АН СССР, вып. 105).

Раукас А.В. Донные отложения Псковско-Чудского озера. Таллин, АН ЭССР, 1981, 160 с.

Рященко Т.Г., Акулова В.В., Ербаева М.А. Формирование лессовидных отложений Забайкалья (на примере ключевых участков) // География и природные ресурсы, 2012, № 4, с. 117—125.

Тейлор С.Р., Мак-Леннан К.Дж. Континентальная кора, ее состав и эволюция. М., Мир, 1988, 384 с.

Шатров В.А. Лантаноиды как индикаторы обстановок осадкообразования (на основе анализа опорных разрезов протерозоя и фанерозоя Восточно-Европейской платформы): Автореф. дис. ... д. г.-м.н. М., ИМГРЭ, 2007, 36 с.

Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основы литохимии. СПб, Наука, 2000, 479 с.

Alexeeva N.V., Erbaeva M.A. Pleistocene permafrost in Western Transbaikalia // Quat. Int., 2000, v. 68—71, p. 5—12.

Andreeva D.B., Leiber K., Glaser B., Hambach U., Erbaeva M., Chimitdorzhieva G.D., Tashak V., Zech W. Genesis and properties of black soils in Buryatia, southern Siberia, Russia // Quat. Int., 2011, v. 243, p. 313—326.

Blott S.J., Pye K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments // Earth Surf. Processes. Landforms, 2001, v. 26, p. 1237—1248.

Cox R., Lowe D.R., Cullers R.L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States // Geochim. Cosmochim. Acta, 1995, v. 59, p. 2919—2940.

De Baar H.J.W., German C.R., Elderfield H., van Gaans P. Rare earth element distributions in anoxic waters of the Cariaco Trench // Geochim. Cosmochim. Acta, 1988, v. 52, № 5, p. 1203—1219.

- Elderfield H., Greaves M.J.** The rare earth elements in seawater // *Nature*, 1982, v. 296, p. 214—219.
- Fedo C.M., Nesbitt H.W., Young G.M.** Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance // *Geology*, 1995, v. 23, p. 921—924.
- Folk R.L., Ward W.C.** Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters // *J. Sediment. Petrol.*, 1957, v. 27, p. 3—26.
- Gromet L.P., Haskin L.A., Korotev R.L., Dymek R.F.** The «North American shale composite»: Its compilation, major and trace element characteristics // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1984, v. 48, p. 2469—2482.
- Irber W.** The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1999, v. 63, p. 489—508.
- Ivanova V.V., Nikolskiy P.A., Basilyan A.E.** Stratigraphic interpretation of rare earth element signatures in Pleistocene mammal bones: A case study from Kharabai site, East Siberia // *Quat. Int.*, 2017, v. 445, p. 279—288.
- Kučera J., Cempírek J., Dolníček Z., Muchez P., Prochaska W.** Rare earth elements and yttrium geochemistry of dolomite from post-Variscan vein-type mineralization of the Nížký Jeseník and Upper Silesian Basins, Czech Republic // *J. Geochem. Explor.*, 2009, v. 103, № 2—3, p. 69—79.
- Masuda A., Kawakami O., Oohmoto Y., Takenaka T.** Lanthanide tetrad effects in nature: Two mutually opposite types, W and M // *Geochem. J.*, 1987, v. 21, p. 119—124.
- Monecke T., Kempe U., Monecke J.** Tetrad effect in rare earth element distribution patterns: A method of quantification with application to rock and mineral samples from granite-related rare metal deposits // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2002, v. 66, № 7, p. 1185—1196.
- Nesbitt H.W., Young G.M.** Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // *Nature*, 1982, v. 299, p. 715—717.
- Retallack G.J.** *Soils of the Past: an Introduction to Paleopedology*. Oxford, Blackwell, 2001, 600 p.
- Retallack G.J.** Soils and global change in the carbon cycle over geological time / Eds. H.D. Holland, K.K. Turekian // *Treatise on geochemistry*. Oxford, Pergamon Press, 2007, v. 5, p. 1—28.
- Reynard B., Lécuyer C., Grandjean P.** Crystal-chemical controls on rare-earth element concentrations in fossil biogenic apatites and implications for paleoenvironmental reconstructions // *Chem. Geol.*, 1999, v. 155, p. 233—241.
- Trueman C.N., Behrensmeyer A.K., Potts R., Tuross N.** High-resolution records of location and stratigraphic provenance from the rare earth element composition of fossil bones // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2006, v. 70, p. 4343—4355.
- Vogt T., Erbajeva M., Vogt H.** Premières preuves de conditions périglacières au Pléistocène inférieur en Transbaikalie (Sibérie, Russie) // *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 1995, Séries A 320, p. 861—866.
- Zech W., Andreeva D., Zech M., Bliedtner M., Glaser B., Hambach U., Erbajeva M., Zech R.** The Tologoi Record: a terrestrial key profile for the reconstruction of Quaternary environmental changes in semiarid Southern Siberia // *The 3rd Asian Association for Quaternary Research. Conference Abstract Book*. 4—8 September 2017, Jeju Island, Republic of Korea. Lotte City, 2017, p. 13.

*Рекомендована к печати 27 марта 2020 г.
И.С. Новиковым*

*Поступила в редакцию 10 октября 2018 г.,
после доработки — 26 января 2020 г.*