



THE KUYTUN VALLEY AS AN EXOGEODYNAMIC TEST SITE FOR PRACTICING THE APPLICATION OF METHODOLOGY FOR INTERDISCIPLINARY RESEARCH IN THE SEDIMENTATION SETTINGS OF LOESS-LIKE COVER DEPOSITS IN THE LATE PLEISTOCENE TRANSBAIKALIA

G.G. Matasova ^{1,2}, A.Yu. Kazansky ^{2,3}, A.A. Shchetnikov ^{1,2,4✉}, I.A. Filinov ^{1,2}

¹ Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

² Geological Institute, Russian Academy of Sciences, 7-1 Pyzhevsky Ln, Moscow 119017, Russia

³ Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia

⁴ Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1a Favorsky St, Irkutsk 664033, Russia

ABSTRACT. An interdisciplinary research in the Late Quaternary loess-like cover deposits in the valley of the Kuytunka River (Western Transbaikalia) was aimed at reconstructing the conditions and dynamics of regional sedimentation. Particular attention is paid to assessing the information capacity of the methods involved therein: lithofacies analysis, grain-size analysis, and petromagnetic and lithochemical analyses. It is shown that the results of each method independently provide additional information on the processes of sedimentation, are not duplicated, and make it possible to obtain a full characterization of the factors and features of sedimentogenesis. It was found that the valley sedimentation was of cyclic character: warm (soil formation) periods changed to the periods of cooling-(accumulation of sandy-loamy strata); all processes occurred predominantly in semi-arid climate with slight fluctuations in humidity. The mode of the normal formation of a blanket of sedimentary material manifests itself in the structure and properties of deposits exposed on the southern slope of the valley (Kuytun-1 section). Intensive slope processes, and reworking and remixing of sediments on the gentle valley north-exposure slope by catastrophic flows (slope mudflows) and cryogenesis are reflected in the structure and properties of the deposits exposed in the Kuytun-2 section. There are shown the advantages of an integrated approach for detailing the structure of the sections, explaining the genesis of sediments, determining the most probable source areas for the sediment and modes of sediment transport, and reconstructing sedimentary environments.

KEYWORDS: Transbaikalia; Pleistocene; loess-like cover deposits; granulometric composition; magnetic properties; litho geochemistry; Kuytun valley

FUNDING: The work was supported by RSF (project 19-17-00216 "The Quaternary history of the Baikal region based on the integrated studies along the Predbaikalye–Pribaikalye–Transbaikalia transect" (petromagnetic and granulometric studies)), RFBR (project 20-05-00247) and RF Government (project of 075-15-2021-631) and done as part of the state assignment of the Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS (project 0284-2021-0003). The work was performed using equipment and infrastructure of the Centre for Geodynamics and Geochronology at the Institute of the Earth's Crust of the SB RAS (grant 075-15-2021-682.9).



RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Alexander A. Shchetnikov, shch@crust.irk.ru

Received: November 7, 2022

Revised: January 23, 2023

Accepted: February 15, 2023

FOR CITATION: Matasova G.G., Kazansky A.Yu., Shchetnikov A.A., Filinov I.A., 2023. The Kuytun Valley as an Exogeodynamic Test Site for Practicing the Application of Methodology for Interdisciplinary Research in the Sedimentation Settings of Loess-Like Cover Deposits in the Late Pleistocene Transbaikalia. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (3), 0703. doi:10.5800/GT-2023-14-3-0703

КУЙТУНСКАЯ ДОЛИНА – ЭКЗОГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОЛИГОН ДЛЯ ОТРАБОТКИ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОЙ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ ОБСТАНОВОК ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРОВНОГО ЛЕССОВИДНОГО КОМПЛЕКСА В ПОЗДНЕМ ПЛЕЙСТОЦЕНЕ ЗАБАЙКАЛЬЯ

Г.Г. Матасова^{1,2}, А.Ю. Казанский^{2,3}, А.А. Щетников^{1,2,4}, И.А. Филинов^{1,2}

¹ Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

² Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 1, Россия

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

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

АННОТАЦИЯ. Междисциплинарное изучение позднечетвертичных покровных лессовидных отложений в долине р. Куйтунка (Западное Забайкалье) выполнено с целью реконструкции обстановок и динамики регионального осадконакопления. Особое внимание в работе уделено оценке информативности используемых при исследованиях таких образований методами литолого-фациального, гранулометрического, петромагнитного и литохимического анализа. Показано, что результаты каждого метода дают независимую, дополнительную информацию о процессах осадконакопления, не дублируют друг друга и позволяют получить полноценную характеристику условий и особенностей седиментогенеза. Установлено, что осадконакопление в долине носило циклический характер: периоды потеплений (почвообразования) сменялись периодами похолоданий (накопления супесчано-суглинистых толщ), все процессы происходили в преимущественно семиаридном климате с небольшими колебаниями влажности. Режим «нормального» образования покровного осадочного чехла при участии делювиальных процессов зафиксирован в строении и свойствах отложений, вскрытых на склоне южной экспозиции долины (разрез Куйтун-1). Интенсивные склоновые процессы, переработка, перемешивание отложений пологого склона долины северной экспозиции катастрофическими потоками (склоновые сели) и криогенезом отражены в строении и свойствах облессованных отложений, вскрытых разрезом Куйтун-2. Показаны преимущества комплексного подхода для детализации строения разрезов, уточнения генезиса осадков, определения наиболее вероятных источников сноса и способов транспортировки осадочного материала, реконструкций обстановок осадконакопления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Забайкалье; плейстоцен; покровные лессовидные отложения; гранулометрический состав; магнитные свойства; литогеохимия; Куйтунская долина

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 19-17-00216 «Четвертичная история Байкальского региона по комплексным исследованиям вдоль трансекта Предбайкалье–Прибайкалье–Забайкалье» (петромагнитные и гранулометрические исследования)), РФФИ (проект № 20-05-00247), Правительства РФ (проект № 075-15-2021-631) и в соответствии с государственным заданием Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (проект № 0284-2021-0003). В работах было задействовано оборудование и инфраструктура Центра коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН (грант № 075-15-2021-682.9).

1. ВВЕДЕНИЕ

Эоловые отложения, покрывающие ~10 % суши, рассматриваются в качестве одного из важнейших архивов, особенно в Азии, глобальных изменений климата в четвертичное время. Субаэральные отложения в сочетании с горизонтами погребенных почв обеспечивают полноту наземных записей межледниково-ледниковых циклов. Наиболее длительные записи (до 2.5 млн лет) получены из отложений Китайского лессового плато, здесь же отработаны методики наиболее достоверных и детальных способов получения палеоклиматической информации [An et al., 1991; Evans, Heller, 2003; и др.]. В азиатской части России мощные (до 100 м) покровные комплексы образуют обширные поля на территории Западной, Центральной и Восточной Сибири и составляют Сибирскую субаэральную

формацию (ССФ) [Volkov, 1971]. Дополнение геологических описаний осадочных толщ современными инструментальными методами исследований свойств осадков способствует лучшему пониманию генезиса и эволюции субаэральных отложений, в немалой степени обусловленных климатом. Широкое распространение в данных исследованиях получили магнитные, геохимические и гранулометрические методы [Ivanova et al., 2016, 2020; Matasova et al., 2020; и др.]. В научной литературе можно встретить мнение о том, что порой методы дублируют друг друга и применение их в комплексе для осадочных отложений не оправдано [Yudovich, Ketris, 2011]. В настоящей работе авторы попытались определить область применимости и преимущества каждого метода с точки зрения получения максимально полезной информации. Совокупность

методов, включавшая лазерную дифракцию для определения размеров обломочных частиц, петромагнитные и палеомагнитные измерения и химические анализы состава отложений, применялась к исследованию осадков двух новых разрезов, расположенных в Забайкалье (Тарбагатайский район Республики Бурятия) на противоположных бортах Куйтунской долины – Куйтун-1 (51°31'48.87" с.ш., 107°43'51.21" в.д.), Куйтун-2 (51°31'7.86" с.ш., 107°43'18.90" в.д.). Данные обнажения вскрывают лессовидные образования, имеющие покровный характер развития. При этом в долине р. Куйтунка известны и другие разрезы лессовидных отложений, приуроченные в основном к террасовым комплексам днищ долин и погребенным тальвегам. Сведения о них можно почерпнуть в работах [Golubtsov et al., 2017; Ryzhov et al., 2021].

Цель настоящей работы: реконструкция обстановок и особенностей формирования позднечетвертичного покровного комплекса в Куйтунской долине на основе междисциплинарных исследований с оценкой информативности применяемых методов.

2. ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗРЕЗОВ

В долине р. Куйтунка (рис. 1) покровный комплекс позднекайнозойских отложений имеет широкое развитие, значительные мощности и характеризуется разнообразным литолого-фациальным строением и полихронностью. Согласно результатам мультидисциплинарного исследования одного из важнейших опорных разрезов региона Улан-Жалга [Erbajeva et al., 2019], расположенного в долине р. Куйтунка, накопление облессованных толщ здесь началось на самых ранних этапах плейстоцена и циклично продолжается до настоящего времени. Покровные отложения, облекающие различные формы рельефа, расчленены молодой овражной эрозией, что обеспечивает хорошую обнаженность разрезов. Все это делает долину р. Куйтунка удобным полигоном для изучения таких образований.

В районе расположения разрезов Куйтун-1 и Куйтун-2 долина имеет асимметричный поперечный профиль (рис. 1). На крутом северном склоне толщи покровных отложений сохранились лишь в самом его подножии. Здесь они перекрывают аллювиальные образования краевой части днища долины и вскрываются в стенке придорожного карьера (разрез Куйтун-1). На пологом южном склоне суглинисто-песчаные толщи образуют мощный плащеобразный покров, облекающий обширные пространства от днища долины вплоть до водоразделов. Здесь эти отложения подвергаются активному эрозионному расчленению с формированием разветвленной овражно-балочной сети. В стенке одного из оврагов вскрывается разрез Куйтун-2.

Отложения на обоих склонах долины представлены окарбоначенными супесями и суглинками с характерными для лессов и облессованных отложений структурами вертикальной столбчатой отдельности, гравелистыми и глинистыми песками, а также погребенными

почвами. В разрезе Куйтун-1 расчисткой вскрыто 11.6 м. Здесь наблюдается переслаивание палевых и коричневатопалевых песчанистых алевритов и песков, фиксируется пять горизонтов погребенных почв. В основании разреза залегают косослойчатые аллювиальные пески. В разрезе Куйтун-2 расчисткой вскрыто 5.5 м. Здесь наблюдается переслаивание светлопалевых и коричневатопалевых алевропесков глинистых и алевритов песчано-глинистых, фиксируется четыре горизонта погребенных почв. В средней части вскрытого разреза установлены крупные криогенные структуры в виде псевдоморфоз по ледяным клиньям, заполненные ожелезненными и окарбоначенными плохо сортированными песками.

3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Куйтунские разрезы, несмотря на наличие в них погребенных почв, не удалось датировать ^{14}C методом из-за низкого содержания общего $\text{C}_{\text{орг}}$ и отсутствия палеонтологических включений, подходящих для радиоуглеродного анализа. Однако эти разрезы имеют литолого-стратиграфическое строение, аналогичное датированным разрезам Селенгинского среднегорья, в т.ч. и в долине р. Куйтунка [Golubtsov et al., 2017], что позволяет оценить возраст представленных в них отложений не древнее позднего плейстоцена. В задачи настоящей работы прежде всего входил анализ механизмов формирования местных покровных комплексов, а не реконструкция их летописи, поэтому отсутствие геохронометрической характеристики разрезов в данном случае, на наш взгляд, допустимо.

Для петромагнитных и гранулометрических исследований отложений разрезов Куйтун-1 и Куйтун-2 был проведен отбор образцов с интервалом 10 см. Для геохимических и палеомагнитных определений образцы были отобраны через 20 см. Всего коллекция составила 255 образцов.

Гранулометрический состав. Гранулометрические измерения выполнялись на лазерном микроанализаторе Bettersizer S (Китай) с диапазоном размеров измеряемых частиц от 1000 до 0.1 мкм. Диспергирование образцов проводилось путем ультразвуковой обработки. Средний гранулометрический состав образца определялся по результатам пяти измерений. Результаты измерений представлены в виде содержания 100 фракций в объемных процентах по каждому образцу. Для статистического анализа результаты измерений были объединены в соответствии с классификацией А.В. Раукаса [Raukas, 1981] в четыре фракции по классу крупности обломков и частиц: песчаную (>100 мк), крупноалевритовую (50–100 мк), мелкоалевритовую (10–50 мк), глинистую (<10 мк). Литологические типы осадков определялись в соответствии с классификацией Н.Н. Верзилина [Verzilin, 1995]. Дополнительно для каждого образца рассчитывался средний размер зерна D_{cp} и динамический фактор F , представляющий собой отношение количества физического песка (сумма фракций >50 мкм) к количеству физической

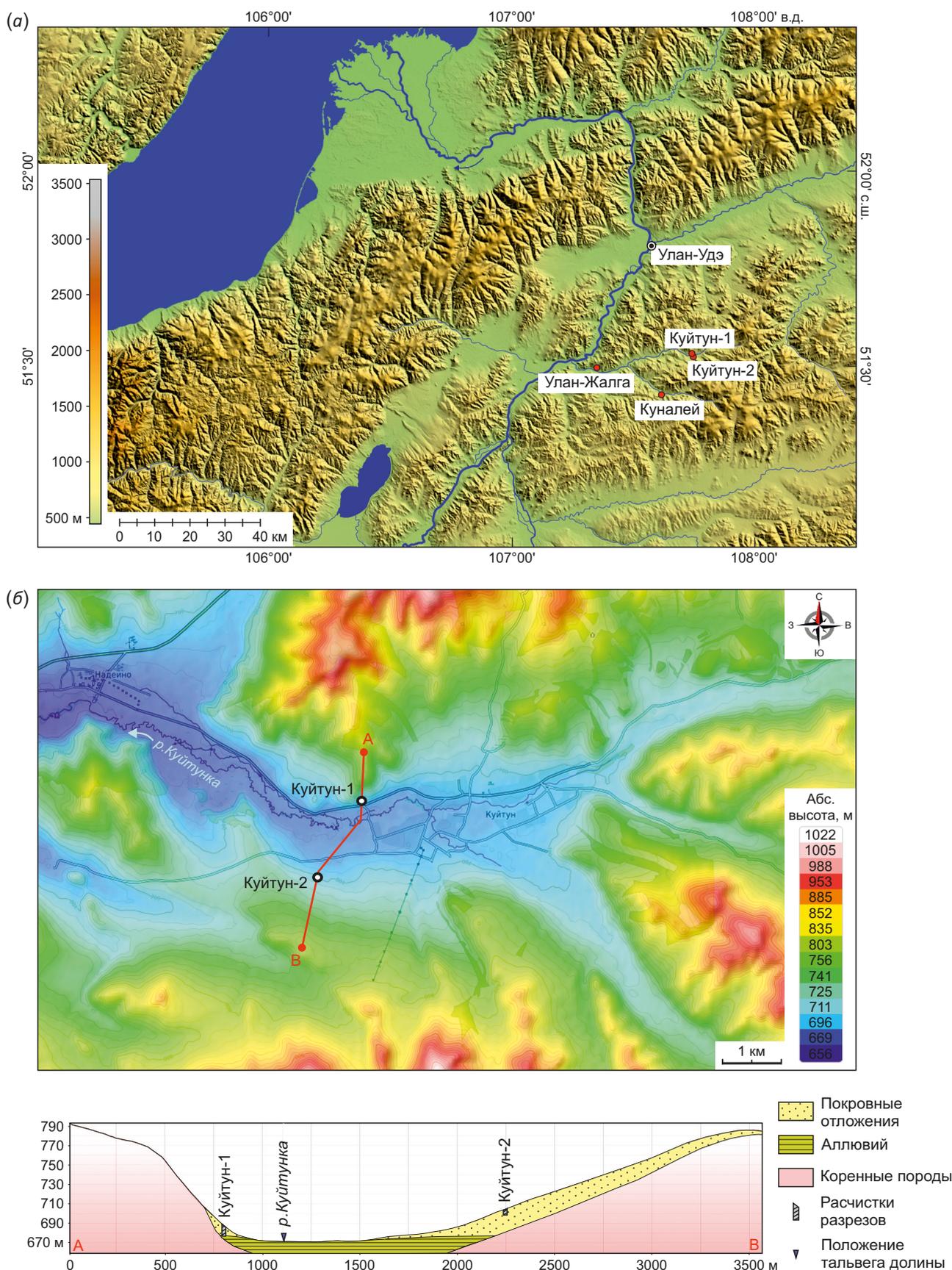


Рис. 1. Цифровая модель рельефа Западного Забайкалья (SRTM с разрешением 90 м) (а) и долины р. Куйтунка и ее обрамления; поперечный профиль долины р. Куйтунка (б) с положением изученных разрезов.

Fig. 1. Digital elevation model of the Western Transbaikalia (SRTM with 90 m resolution) (a) and the Kuytunka River valley and its bordering mountains; transverse profile of the Kuytunka River valley (b) with location of the cross-sections studied.

глины (сумма фракций <50 мкм). Параметр характеризует условия осадконакопления: при $F > 1$ преобладает привнос обломочного материала, при $F < 1$ поступление материала сокращается, преобладают постседиментационные преобразования осадков *in situ*, основными из которых являются почвообразовательные процессы.

Магнитные характеристики. Для измерения величины объемной магнитной восприимчивости (k) и ее анизотропии (АМВ) использовался Каппабридж МФК1-FA (AGICO, Чехия). Кроме того, измерялась удельная магнитная восприимчивость k_{int} с последующим ее разложением на ферримагнитную (k_{fer}) и парамагнитную (k_{par}) части. Различные виды намагниченности (индуктивная намагниченность J_i , остаточная намагниченность насыщения J_{rs} , намагниченность насыщения ферромагнетиков J_{fer} , намагниченность суперпарамагнитных зерен J_{spr} , намагниченность парамагнетиков J_{par}) и коэрцитивные характеристики (коэрцитивная сила B_c и остаточная коэрцитивная сила B_{cr}) изучались на коэрцитивном спектрометре J-meter в поле 700 мТл [Jasonov et al., 1998]. Дополнительно рассчитывались показатели магнитной жесткости $S = J_{rs} / J_{rs(-300)}$, $HIRM = (J_{rs(-300)} + J_{rs}) / 2$, где $J_{rs(-300)}$ – величина намагниченности обратным полем 300 мТл; J_{par} / J_i – вклад парамагнетиков в общий магнетизм осадков; k_{fer} / J_{rs} – оценка эффективного размера магнитного зерна. Интерпретация петромагнитных параметров проведена по общепринятым методикам [Evans, Heller, 2003]. Состав магнитных минералов определялся на каппабридже МФК1-FA с температурной приставкой CS-4 в аргоне.

Геохимический состав. Определение содержаний оксидов породообразующих элементов выполнено рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре с волновой дисперсией S8 TIGER (Bruker, Германия) в ЦКП «Геодинамика и геохронология» (ИЗК СО РАН, г. Иркутск). Результаты анализа содержаний оксидов пересчитаны на прокаленную бескарбонатную навеску, а затем на молярную массу для расчета основных петрохимических параметров. Для общей характеристики отложений проведен анализ распределения по разрезу основных литохимических индикаторов интенсивности процессов выветривания и почвообразования: петрохимических модулей (ТМ – титановый, НМ – натриевый, КМ – калиевый, ЩМ – щелочной,

НКМ – нормированная щелочность, АМ – алюмокремниевый) [Yudovich, Ketris, 2000; Maslov, 2005]), показателя кальцификации почв $(CaO + MgO) / Al_2O_3$ [Retallack, 2001], коэффициента окисления почвенного материала $(Fe_2O_3 + MnO) / Al_2O_3$ [Kalinin et al., 2009], индекса интенсивности химического выветривания CIA [Nesbitt, Young, 1982], химического индекса выветривания CIW [Fedo et al., 1995], индекса зрелости осадков ICV [Cox et al., 1995] и индекса степени преобразования плагиоклазов PIA [Fedo et al., 1995].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Гранулометрический состав. По соотношению основных фракций определено два литологических типа отложений: алевропесок глинистый (пелитистый) и алеврит песчано-глинистый (рис. 2). Диапазоны изменения содержания гранулометрических фракций и их средние значения практически совпадают (табл. 1).

Оба разреза имеют трехчленное строение, но в разрезе Куйтун-1 верхняя и нижняя осадочные толщи представлены алевропеском, средняя часть – алевритом. В разрезе Куйтун-2, наоборот, алевритом сложены верхний и нижний интервалы, а средняя часть – алевропеском (рис. 2).

В разрезе Куйтун-1 колебания содержания всех фракций надежно выделяют три участка наиболее мелкозернистых осадков на глубине: 1) 3.5–4.1 м; 2) 4.8–5.4 м; 3) 7.3–9.0 м; все – в алевритовой толще. В этих интервалах содержание песка падает до 10–20 %, количество глины растет до 12–17 %, средний размер зерна уменьшается до 60–70 мкм. Вероятно, выделенные интервалы могут соответствовать ископаемым почвам. Еще один аналогичный интервал можно проследить на глубине 0.9–1.0 м, здесь обнаружен почвенный прослой малой, не выдержанной по простиранию, мощности (5–10 см), поэтому он выделен только по одной либо по двум точкам, но прослеживается по всем параметрам. Современная почва фиксируется до глубины 0.5 м.

В разрезе Куйтун-2, кроме современной почвы (0–0.5 м), обнаружены два интервала с мелкозернистыми осадками, оба – в алевритовых толщах. Первый – на глубине 0.8–1.0 м – выделяется только по повышенному содержанию глины (до 14.5 %) и уменьшению содержания крупного алеврита (до 29 %), остальные показатели не дают четкой картины. Этот интервал

Таблица 1. Гранулометрический состав отложений

Table 1. Granulometric composition of deposits

Разрез	Песок, %	Крупный алеврит, %	Мелкий алеврит, %	Глина, %	Дср, мкм	F
Куйтун-1	17–46	27–37	15–37	6–16	61–140	0.9–3.5
	31	32	28	10	95	1.7
Куйтун-2	19–50	29–40	16–36	5–15	64–140	1.1–3.8
	32	34	25	9	98	2.1

Примечание. В числителе – минимальное и максимальное значение, в знаменателе – среднее значение по разрезу.
Note. The numerator contains the maximum and minimum values, the denominator – the average value along the section.

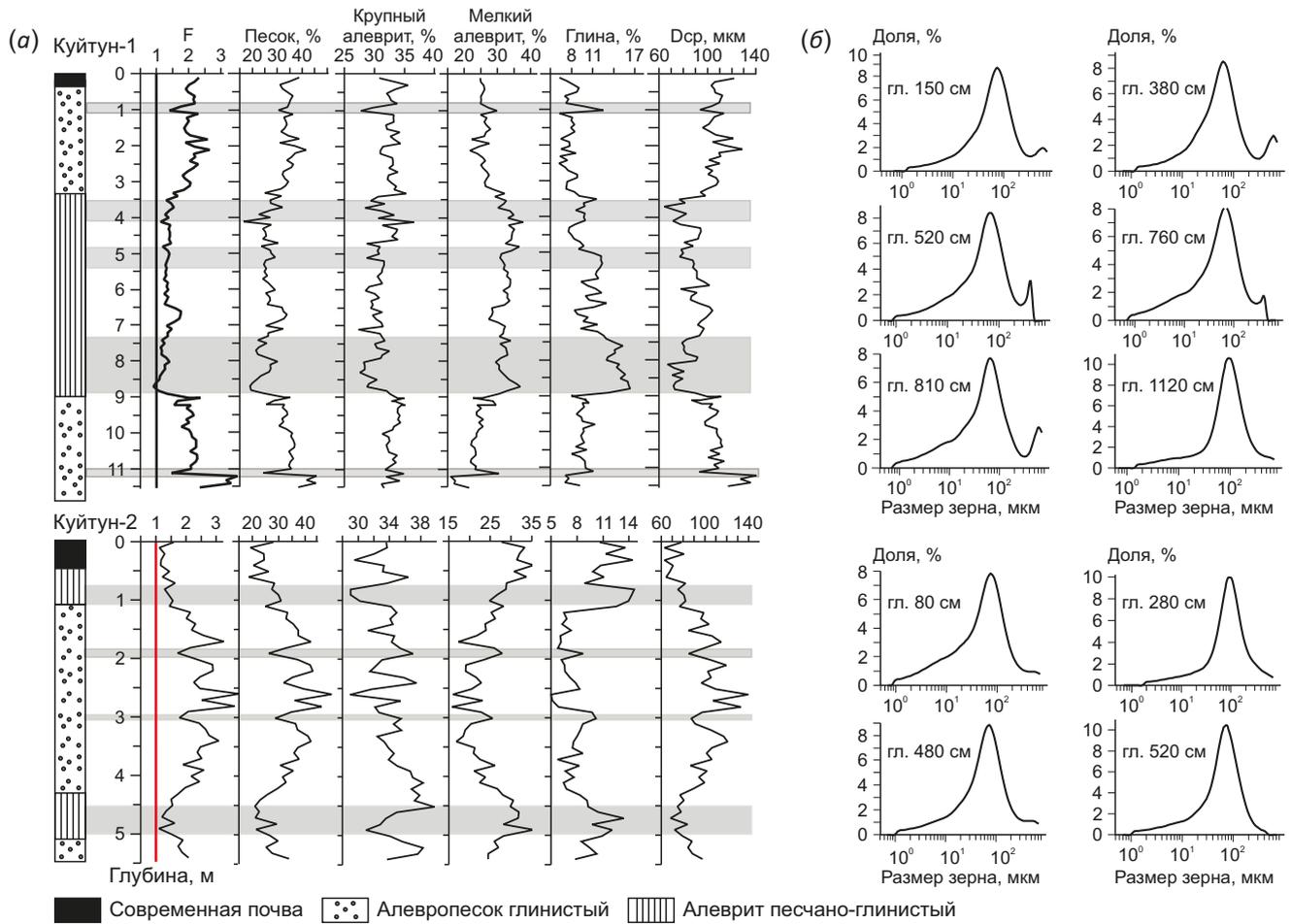


Рис. 2. Гранулометрический состав осадков разрезов Куйтун-1 и Куйтун-2 (а); гранулометрические спектры типичных образцов осадков (б). Серые полупрозрачные полосы выделяют палеопочвы по гранулометрическому составу. Внизу – общие виды разрезов (фото авторов).

Fig. 2. Granulometric composition of sediments in Kuytun-1 and Kuytun-2 sections (а); granulometric spectra of typical sediment samples (б). Gray half-transparent stripes show the paleosoils in accordance with granulometric composition. At the bottom there are general views of the cross-sections (photographs taken by the authors).

соответствует ископаемой почве, выделенной при геологическом описании. Второй интервал, на глубине 4.6–5.0 м, определяется более явно, практически по всем параметрам. Возможно, это также ископаемые почвы. По параметру F, близкому к единице, в качестве ископаемых почв четко выделяются только нижние интервалы обоих разрезов.

Гранулометрические спектры осадков двух разрезов имеют небольшое отличие (рис. 2, б). Спектры образцов из разреза Куйтун-2 преимущественно унимодальные, с пиком в области крупного алеврита (74–88 мкм), в средней толще встречаются образцы с пиком в области мелкого песка (104 мкм), например образец с глубины 280 см. Спектры образцов из разреза Куйтун-1 в большей части разреза бимодальные, с основным пиком в крупноалевритовых фракциях (62–88 мкм) и второстепенным пиком в области песчаных фракций (418–592 мкм). Унимодальные спектры демонстрируют только отложения основания разреза (ниже 11 м).

Магнитные характеристики. Результаты измерений магнитных характеристик отложений приведены на рис. 3, 4 и в табл. 2.

Наибольшие значения концентрационно-зависимых магнитных параметров (k, kfer, Jrs, Js) демонстрируют осадки с высоким содержанием песка (алевропесок) в средней части разреза Куйтун-2. Даже без учета этих значений диапазоны изменения и средние значения концентрационных характеристик в отложениях Куйтуна-2 выше, чем в Куйтуне-1. Вклад парамагнитных минералов в общий магнетизм осадков, наоборот, чуть выше в Куйтуне-1 (табл. 2).

В обоих разрезах параметр S варьируется в довольно узком диапазоне – от 0.93 до 0.97, указывая на присутствие в магнитной фракции магнито жестких минералов (гетит/гематит) в небольшом количестве, которое влияет и на относительно повышенные значения коэрцитивных характеристик, причем в отложениях Куйтуна-1 значения Bcr и Bc выше, чем в Куйтуне-2. Наибольшие отличия демонстрируют значения HIRM, которые выше в отложениях Куйтуна-1.

Структурно-чувствительные показатели, оценивающие размеры магнитных зерен, имеют близкие значения, диапазоны значений Bcr/Bc немного разнятся, но их средние практически совпадают. Значения структурно-чувствительных параметров указывают на многодоменное (МД) состояние магнитных зерен (табл. 2).

Как было установлено ранее [Matasova et al., 2001, 2003, 2020], формирование магнитных свойств в субаэральных отложениях Восточной Сибири происходило в рамках «сибирского механизма» записи климатических изменений в их магнитных свойствах. Это позволяет по изменениям магнитных характеристик выделять участки разрезов, которые предположительно идентифицируются как ископаемые почвы. В средней части разреза Куйтун-1 три интервала отложений характеризуются одновременно уменьшением концентрации магнитных минералов, увеличением вклада парамагнитных минералов, увеличением параметров магнитной жесткости, уменьшением эффективного размера магнитного зерна (см. рис. 3). Для наглядности на графики некоторых параметров нанесены сглаживающие кривые, представляющие собой осреднение по пяти точкам. В соответствии с поведением магнитных характеристик эти интервалы можно считать палеопочвами. Два из них совпадают с интервалами, обнаруженными по изменениям гранулометрических характеристик, причем один (глубина 7.5–8.8 м) совпадает полностью, а второй (глубина 3.8–5.0 м) определяется по магнитным параметрам гораздо шире, чем по гранулометрическому составу, и смещен чуть ниже по глубине разреза. По параметрам магнитной жесткости и структурным характеристикам этот интервал распадается на два горизонта палеопочв (3.5–3.7 м и 4.7–5.0 м). Верхняя палеопочва (глубина 0.9–1.1 м), идентифицированная по гранулометрическим характеристикам отложений, слабо отражена в магнитных свойствах осадков, она прослеживается только по концентрационным параметрам и параметрам магнитной жесткости HIRM, S; по другим характеристикам эта почва не

Таблица 2. Значения магнитных параметров отложений разрезов Куйтун-1 и Куйтун-2
Table 2. Values of magnetic parameters of deposits in Kuytun-1 and Kuytun-2 sections

Разрез	$k \times 10^{-8}$	$Jrs \times 10^{-2}$	$Ji \times 10^{-1}$	$Jpar \times 10^{-2}$	$Jpar/Ji$	$Jsp \times 10^{-4}$
Куйтун-1	13–27 18	1.4–2.7 1.9	2.6–4.2 3.3	6.8–9.2 8.3	0.18–0.34 0.26	2.3–6.0 3.3
Куйтун-2	17–43 23	1.8–3.2 2.2	3–6.4 4.7	5.8–9.0 7.8	0.1–0.28 0.22	3.1–5.8 3.8
Разрез	Bc	Bcr	HIRM $\times 10^{-4}$	Bcr/Bc	kfer/Jrs $\times 10^{-5}$	kfer/Js $\times 10^{-6}$
Куйтун-1	9.5–12.8 11.1	44.5–65.8 60	4.1–6.6 5.1	4.0–6.1 5.4	7.6–11.0 9	6.7–8.0 7.1
Куйтун-2	7.5–11.8 10	47–59 53.8	3.8–6.6 4.5	4.4–6.5 5.6	8.2–14.0 9.9	7.4–8.0 7.6

Примечание. Единицы измерения: k – m^3kg^{-1} , все виды намагниченности – Am^2kg^{-1} , коэрцитивные силы – мТл, отношения kfer/J – $A^{-1}m$.
 Note. Units of measurement: k – m^3kg^{-1} , all types of magnetization – Am^2kg^{-1} , coercive forces – mT, kfer/J – $A^{-1}m$ ratios.

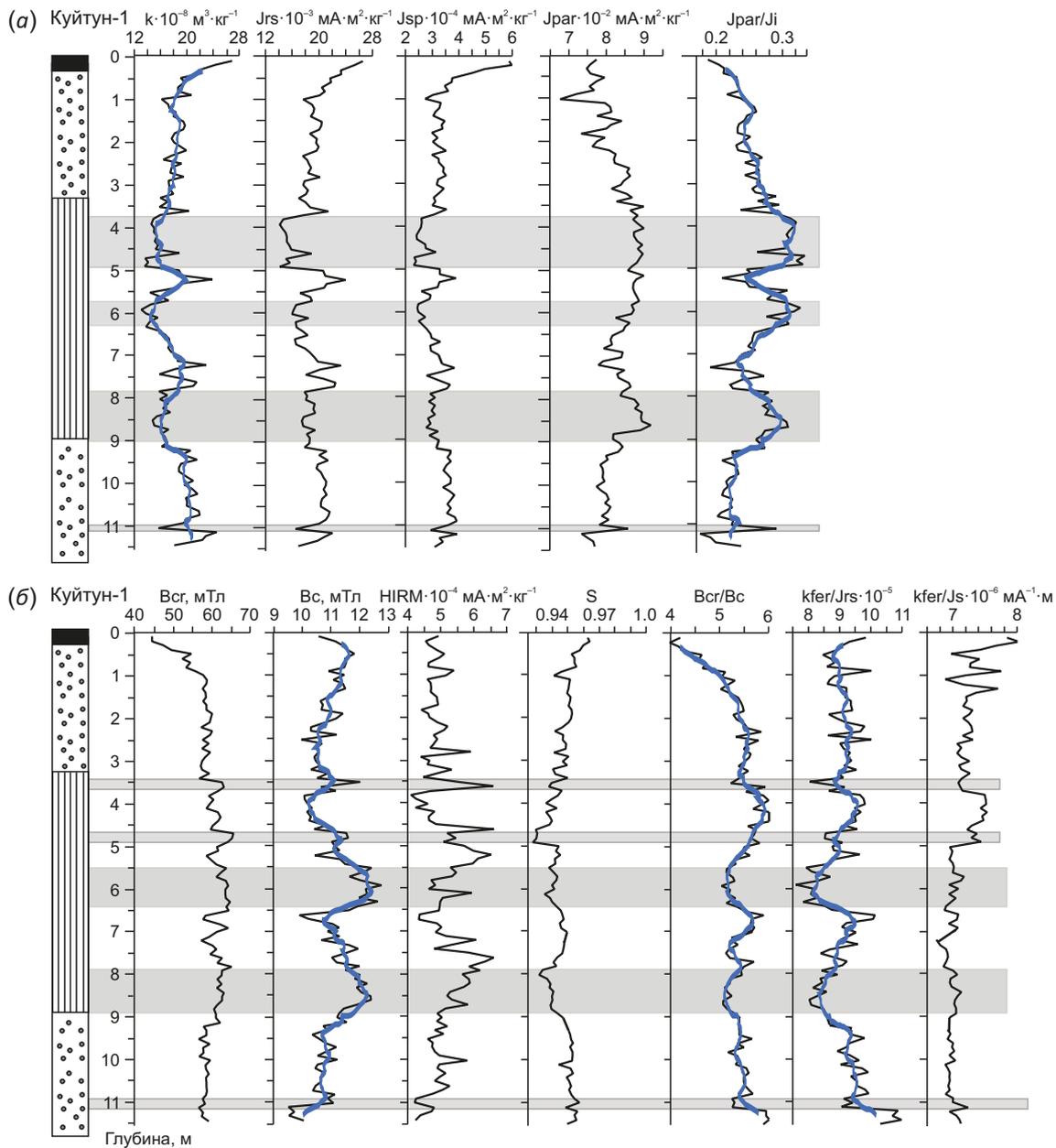


Рис. 3. Петромагнитные характеристики осадков разреза Куйтун-1. (а) – концентрационно-зависимые параметры; (б) – параметры жесткости и структурно-чувствительные параметры. Сглаживающие синие линии – средние параметра по пяти точкам. Серые полупрозрачные полосы отмечают отложения, магнитные параметры которых указывают на ископаемые почвы.

Fig. 3. Petro-magnetic features of sediments in Kuytun-1 section. (а) – concentration-dependent parameters; (б) – rigidity and structural sensitivity parameters. Smooth blue lines show the parameter averaging over five points. Gray half-transparent stripes show the deposits whose magnetic parameters are indicative of fossil soils.

выделяется на фоне вмещающих отложений, а парамагнитный вклад и параметры размера магнитного зерна показывают поведение, скорее характерное для песчаных отложений. Особый интерес вызывает интервал на глубине 5.5–6.5 м, отложения которого четко демонстрируют все магнитные характеристики палеопочв, но в гранулометрическом составе этот интервал слабо выражен небольшими и не очень четкими колебаниями значений некоторых гранулометрических параметров (содержание мелкого алеврита и глины).

И наоборот, интервал предполагаемой по гранулометрическому составу палеопочвы на глубине 4.8–5.4 м по концентрационным магнитным характеристикам никак не может диагностироваться как палеопочва, но по магнитной жесткости и размеру магнитного зерна попадает в более широкий интервал возможной ископаемой почвы.

В разрезе Куйтун-2 прослеживаются два интервала, в которых отложения можно рассматривать как ископаемые почвы (рис. 4). Интервал 4.3–5.1 м уверенно

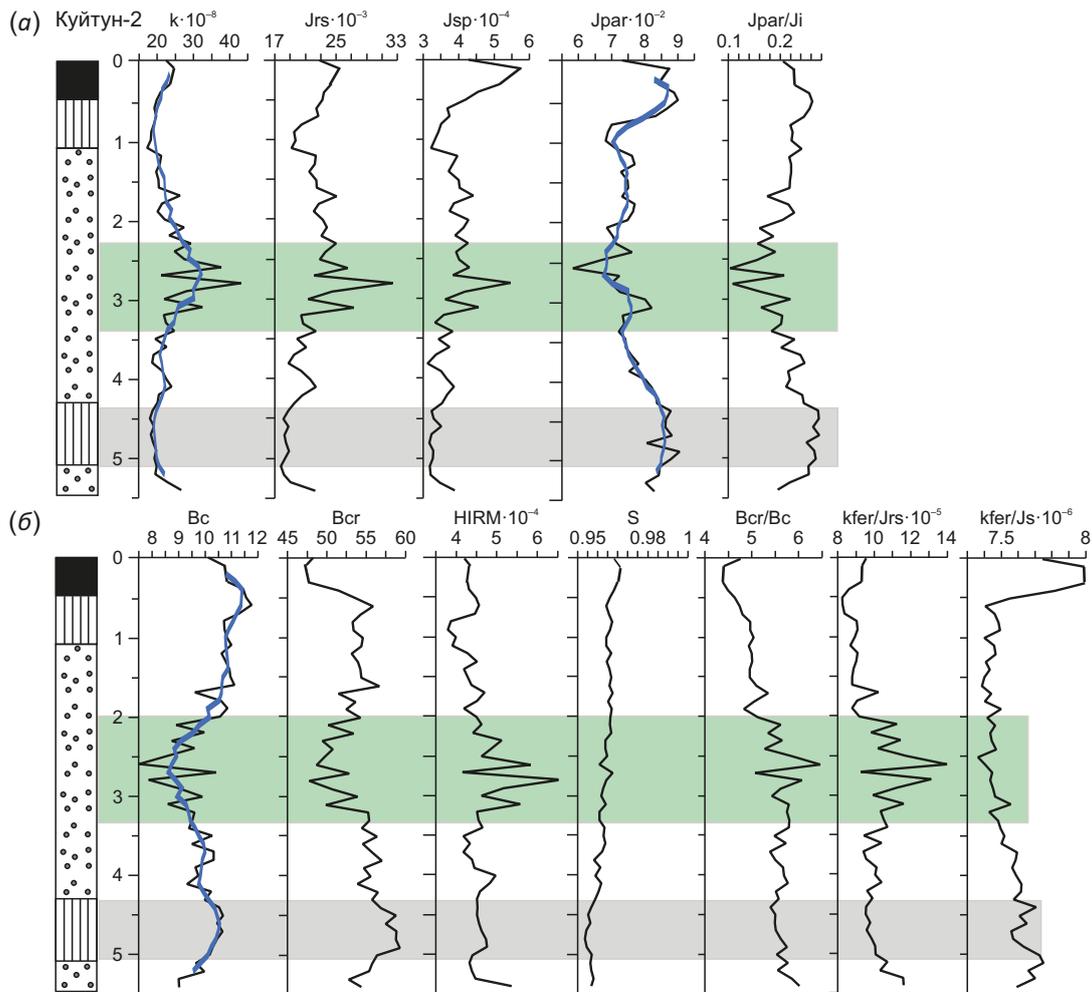


Рис. 4. Петромагнитные характеристики осадков разреза Куйтун-2.

(а) – концентрационно-зависимые параметры; (б) – параметры жесткости и структурно-чувствительные параметры. Условные обозначения как на рис. 2, 3. Зеленый прямоугольник выделяет делювиальные (?) отложения (пояснения в тексте).

Fig. 4. Petromagnetic features of sediments in Kuytun-2 section.

(а) – concentration-dependent parameters; (б) – rigidity and structural sensitivity parameters. The legend is the same as in Fig. 2 and Fig. 3. The green rectangular represents deluvial (?) deposits (see text for explanation).

определяется по всем магнитным характеристикам и полностью совпадает с таковым, определенным по гранулометрическому составу. Верхняя палеопочва на глубине 0.8–1.1 м четко фиксируется значениями концентрационных магнитных характеристик, и ее положение совпадает с положением, определенным по гранулометрическим параметрам и первичному геологическому описанию. По другим магнитным параметрам эта почва не выделяется, поэтому на рис. 4 не выделена серой полосой. В средней части разреза (глубина 2.0–3.5 м) специфическое поведение магнитных параметров одновременно с гранулометрическими параметрами (высокая изменчивость) характерно для делювиальных отложений [Zhdanova et al., 2007] (рис. 4). Прослой в средней части, выделенные как мелкозернистые по гранулометрическому составу, не демонстрируют «почвенных» магнитных характеристик; вероятно, их наличие объясняется дискретным и неравномерным формированием склоновых отложений.

Магнитная минералогия. Термомагнитный анализ (рис. 5) показал, что все графики однотипны: кривая охлаждения идет выше, чем кривая нагрева; небольшой подъем и крутой спад значений магнитной восприимчивости на уровне 550–600 °С на кривой нагрева; небольшой пик в области 250–350 °С при нагреве; резкое увеличение *k* в области 600–500 °С при охлаждении.

Эти признаки свидетельствуют о присутствии магнетизированного магнетита как основного минерала-носителя магнитных свойств отложений. Спад значений *K* в некоторых образцах не до нуля указывает на присутствие небольшого количества гематита, особенно в образцах ископаемых почв. После отжига органического вещества и глинистых минералов появляется значительное количество новообразованного магнетита, цифры в правом углу графиков соответствуют отношению начального и конечного значений *K* после нагрева – охлаждения. Эти отношения в отложениях

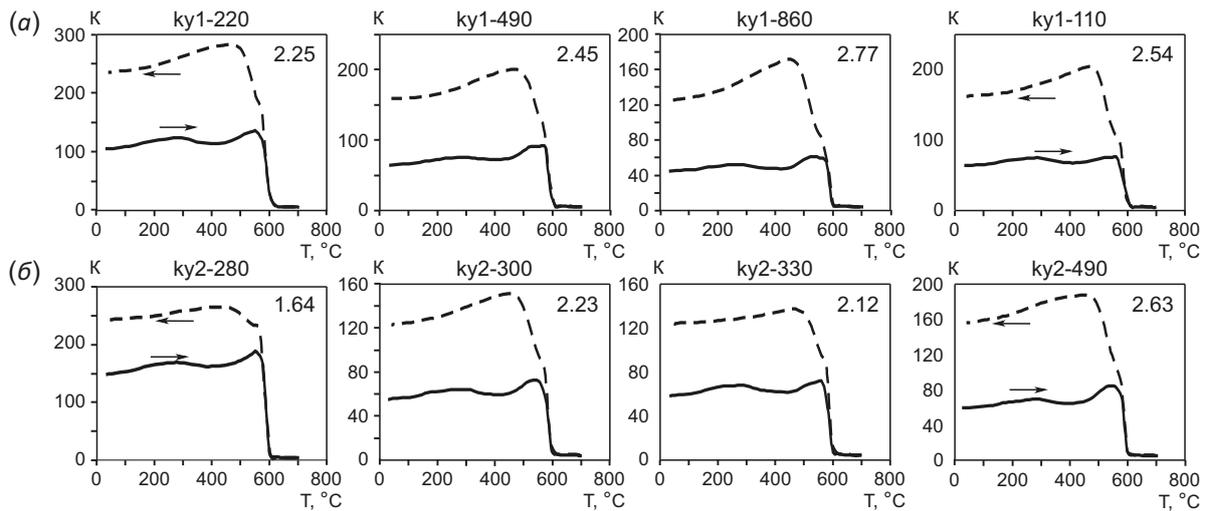


Рис. 5. Поведение магнитной восприимчивости образцов из разрезов Куйтун-1 (а) и Куйтун-2 (б) в зависимости от температуры. Номер образца соответствует глубине залегания в сантиметрах.

Fig. 5. Temperature behavior of magnetic susceptibility of the samples from Kuytun-1 (a) and Kuytun-2 (b) sections. A sample number corresponds to a depth of occurrence, in centimeters.

разреза Куйтун-1 в целом выше, чем в Куйтуне-2, даже в ископаемых почвах, что говорит о разубоживании органики в отложениях Куйтуна-2.

Геохимический состав отложений. Изменение геохимического состава осадков разрезов Куйтун-1 и Куйтун-2 представлено в табл. 3 и на рис. 6.

Элементный состав куйтунских отложений демонстрирует преобладание окислов Si, Al, Fe, Ca, Na, K, их суммарное содержание составляет ~92–93 %. В целом, окислов Si, Ca, Na чуть больше в разрезе Куйтун-2, и диапазоны содержания окислов этих элементов шире. Al, Fe, Ti, P, Mn доминируют в отложениях разреза Куйтун-1 (табл. 3).

На рис. 6 выделены интервалы разрезов с пониженным содержанием SiO₂, Na₂O, K₂O; им соответствуют участки с повышенным содержанием Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, P₂O₅. Эти интервалы возможно сопоставить с палеопочвами, поскольку поведение основных химических элементов в них свидетельствует об образовании отложений в гумидном климате. Но не на всех выделенных участках поведение рассматриваемых элементов однозначно. Верхние интервалы в обоих разрезах хорошо определяются только по уменьшению SiO₂, K₂O, Na₂O и повышению CaO, P₂O₅. Коррелируют между собой содержания Al, Fe, Ti; в разрезе Куйтун-1 коэффициенты корреляции 0.68–0.84, в разрезе Куйтун-2 выше – 0.90–0.96. Также коррелируют Si и K с коэффициентами 0.74 (Куйтун-1) и 0.8 (Куйтун-2). В разрезе Куйтун-1 наблюдается слабая связь между Mn и Ti (коэффициент корреляции 0.53), в Куйтуне-2 Mn связан с Al, Fe, Ti (коэффициенты корреляции 0.62–0.72).

Для характеристики условий седиментации песчано-глинистых осадков, степени их химической дифференциации, «зрелости» пород питающих провинций используются петрохимические модули – различные сочетания и отношения петрогенных окислов. Нами

использованы «общепринятые», такие как ППП, CIA, PIA, ICV и пр. Значения некоторых из них, наиболее ярко демонстрирующих различие изучаемых отложений, приведены в табл. 4 и на рис. 7.

Показатель ППП (%) коррелирует только с CaO, коэффициенты корреляции не очень высоки (0.61, 0.65), по разрезам он изменяется незакономерно, показывая в предполагаемых палеопочвенных горизонтах то высокие, то низкие значения. Диапазон его изменения шире в разрезе Куйтун-2, но средние значения практически одинаковы.

Щелочной модуль (ЩМ) характеризует особенности процессов химического выветривания и созревания поступающих обломочных пород. Его низкие значения обусловлены разрушением полевых шпатов и переходом Na в раствор в условиях теплого и влажного климата. Таким образом, они маркируют ископаемые почвы гумидного климата. За исключением верхних горизонтов палеопочв в обоих разрезах, значения ЩМ в предполагаемых ископаемых почвах уменьшаются.

Общая нормативная щелочность (НKM). Повышенные значения модуля говорят об увеличенном количестве полевых шпатов в породе и низкоглиноземистых силикатов (щелочные амфиболы, железистые гидрослюда), в состав которых обычно входят щелочи. Таким образом, высокие значения модуля будут свидетельствовать о слабой степени выветривания пород питающих провинций в обстановках аридного и нивального климата. Значения НКМ позволяют отнести осадки к повышено-щелочным (Куйтун-2) и алевриты средней части разреза Куйтун-1 – к нормально-щелочным [Maslov, 2005]. Диапазоны изменения ЩМ и НКМ шире, средние значения выше в разрезе Куйтун-2.

Алюмокремниевый модуль (AM) (на рис. 7 не показан, но есть в табл. 4) является индикатором количества глинистых минералов и дает информацию о

присутствии среди источников поступления обломочного материала богатых железом пород, например вулканогенных или железистых кор выветривания. Диапазон значений этого модуля выше 0.22 свидетельствует о преобладании в осадках глинистых минералов

и\или гидролизатов, значения АМ ниже 0.22 характерны для песчаных пород [Yudovich, Ketris, 2000]. Повышенные значения АМ характерны для палеопочв. В куйтунских разрезах АМ слабо варьируется около значения 0.22, в Куйтуне-1 значения АМ чуть выше.

Таблица 3. Содержание основных породообразующих элементов
Table 3. The content of major rockforming elements

Разрез	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
Куйтун-1	60.9–65.1 64	13.4–15.2 14.7	4.6–5.5 5	0.70–0.88 0.79	1.5–2.2 1.8	2.4–6.1 3.3	2.8–3.5 3.2	2.5–2.8 2.63	0.16–0.24 0.19
Куйтун-2	58.5–67.1 64.8	12.6–14.4 13.6	3.8–5.0 4.3	0.61–0.78 0.72	1.5–2.1 1.7	2.4–8.0 4	3.4–4.0 3.7	2.5–2.7 2.64	0.14–0.20 0.16

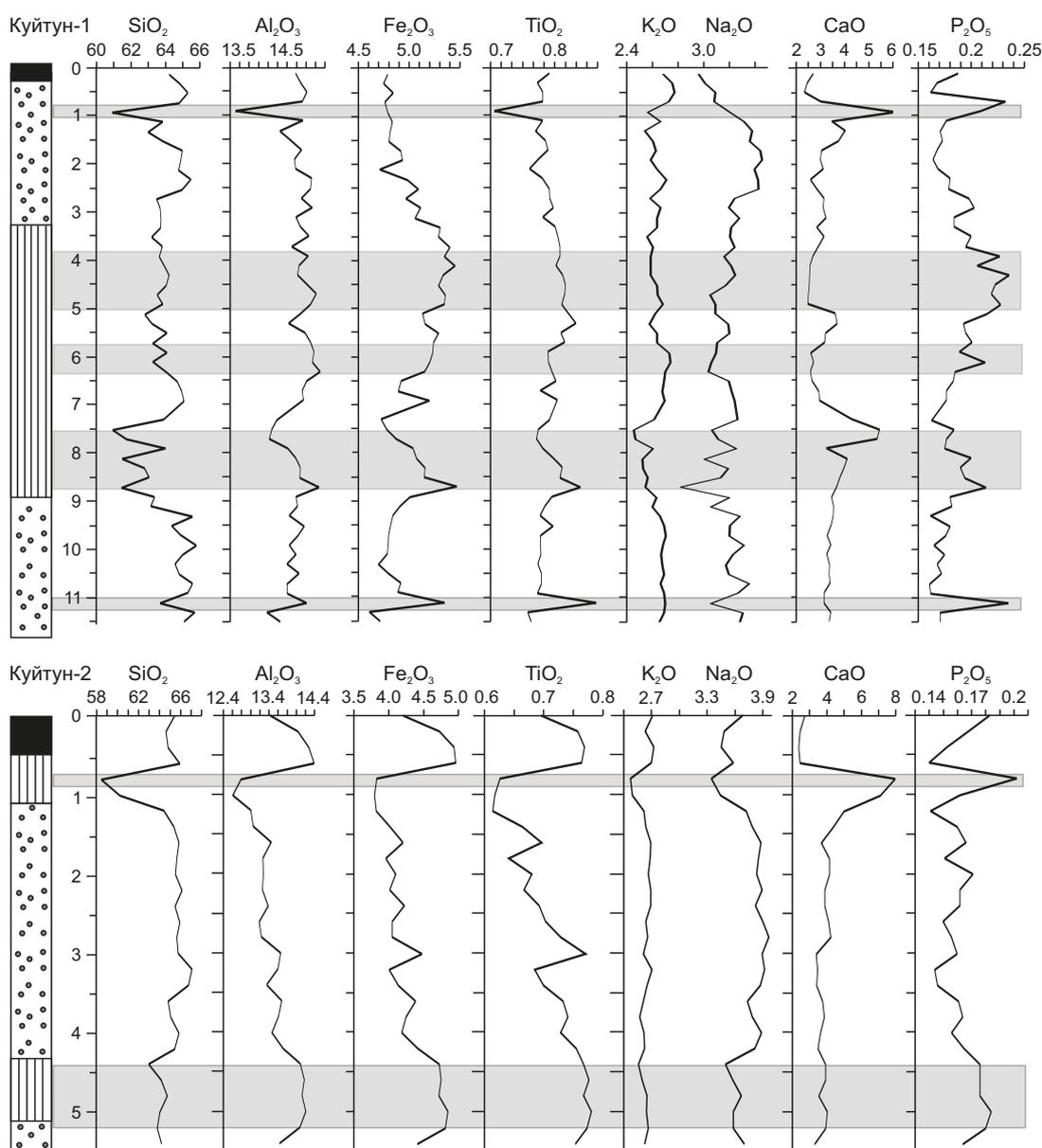


Рис. 6. Основные породообразующие элементы в отложениях разрезов Куйтун-1 и Куйтун-2. Условные обозначения, как на предыдущих рисунках.

Fig. 6. Major rockforming elements in deposits of Kuytun-1 and Kuytun-2 sections. The legend is the same as in the previous figures.

Титановый модуль (ТМ) имеет практически одинаковые средние значения в отложениях обоих разрезов (табл. 4), но в Куйтуне-1 максимальные и минимальные значения ТМ выше, чем в Куйтуне-2. Значения ТМ свидетельствуют о формировании отложений в семиаридных обстановках с небольшими колебаниями климата в сторону гумидного.

Вариации показателя $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O+CaO+MgO)$ – показателя концентрации относительно нерастворимых (глинистых) компонентов по сравнению с компонентами, высвобождаемыми при процессах гидролиза

[Retallack, 2001], – маркируют палеопочвенные горизонты. Горизонты палеопочв отличаются также относительно пониженными значениями величины индикатора кальцификации палеопочв $(CaO+MgO)/Al_2O_3$, что свидетельствует о выносе карбонатных фаз.

Изменения геохимических палеомаркеров (Ba/Sr, Cu/Zr) довольно уверенно фиксируют периоды похолоданий (пониженные значения) и периоды потеплений (повышенные значения).

Индекс химического выветривания (CIA) широко используется как показатель климата в питающей

Таблица 4. Значения петрохимических показателей измененности пород и палеоклимата

Table 4. Variations of the petrochemical indices for rocks and paleoclimate

Разрез	ППП, %	AM×10 ⁻¹	ТМ×10 ⁻²	ЩМ	HKM×10 ⁻¹	CIA	PIA	CIW	ICV
Куйтун-1	3.0–6.2 4.1	2.1–2.5 2.3	5.1–5.9 5.4	1.1–1.3 1.2	3.5–4.3 4	41–55 51	39–56 51	45–61 57	1.7–2.3 1.85
Куйтун-2	2.8–7.4 4.2	2.0–2.2 2.1	4.7–5.6 5.3	1.3–1.5 1.4	4.3–5.0 4.7	36–52 46	34–53 45	39–59 51	1.8–2.7 2.1

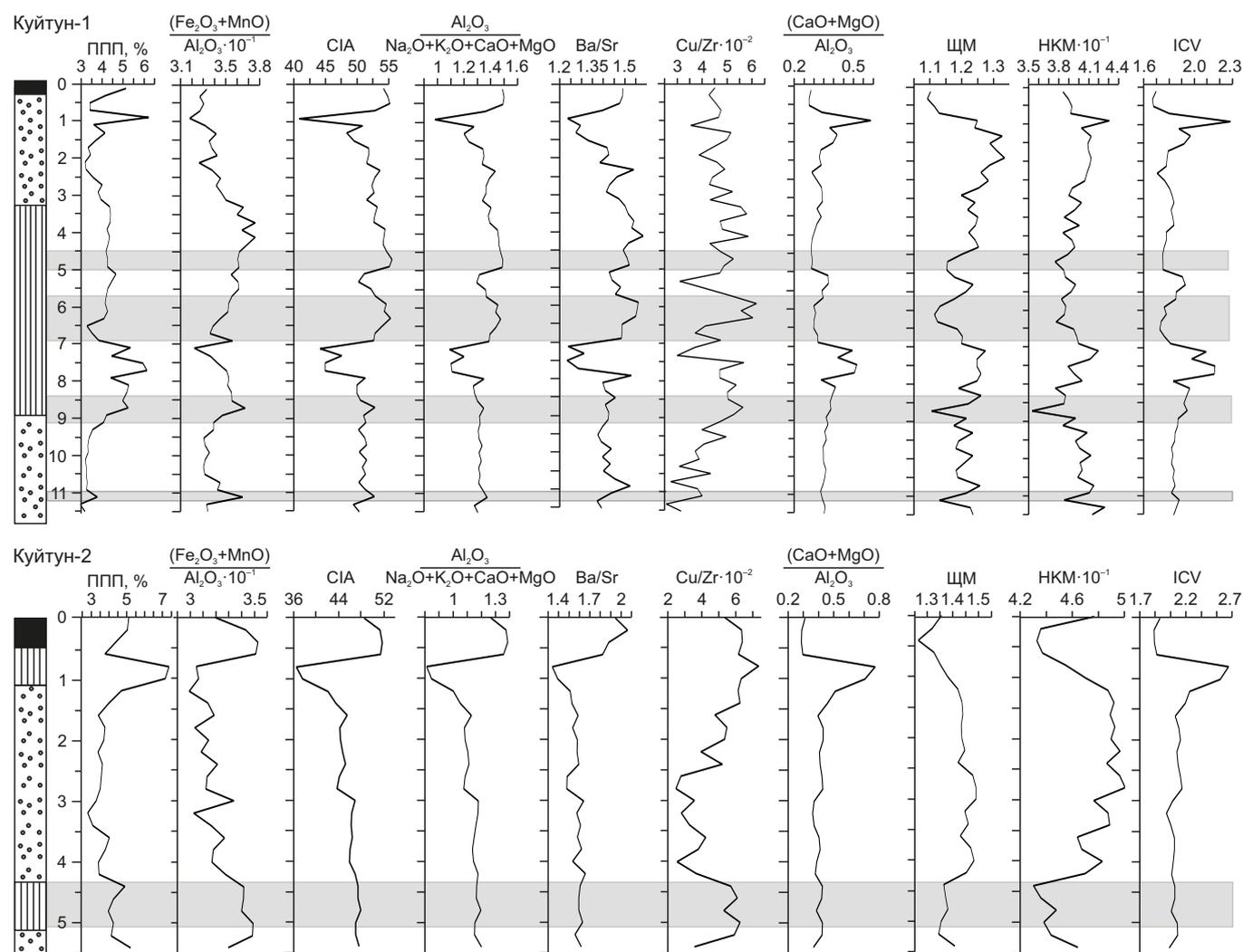


Рис. 7. Петрохимические модули. Обозначения те же, что и на рис. 6.

Fig. 7. Petrochemical modules. The notations are the same as in Fig. 6.

провинции. Невыветрелые (слабовыветрелые) породы, поступающие в область седиментации из питающих провинций в аридном климате, характеризуются значениями индекса порядка 50. Сильновыветрелые разности имеют значения CIA, близкие к 100. Пограничным значением между отложениями, сформировавшимися в обстановках холодного и теплого климата, принято CIA=70. В куйтунских разрезах CIA не превышает 55. Химический индекс выветривания CIW возрастает с ростом степени разложения исходных пород, т.е. возрастает с ростом степени выветрелости пород питающей провинции. Значения CIW, не превышающие 61, свидетельствуют о невыветрелости исходных пород.

Индекс степени преобразования плагиоклазов (PIA). Чем выше значения PIA, тем выше степень разложения плагиоклазов и тем более гумидными были

климатические обстановки в области сноса. Диапазон значений PIA (максимальное значение 56) соответствует субаридным обстановкам осадконакопления.

Индекс зрелости осадков (ICV) изменяется от 1.7 до 2.7, что свидетельствует о низкой степени зрелости пород (малое количество глинистых минералов) в области седиментации. Изменения CIA, CIW и PIA синхронны (коэффициенты корреляции 0.99–1.00), увеличение значений CIA, CIW, PIA при одновременном уменьшении ICV маркирует периоды гумидизации климата.

Анизотропия магнитной восприимчивости (АМВ). Количественными оценками АМВ являются степень анизотропии P', эллипсоид магнитной анизотропии, характеризующийся направлением и величиной главных осей (K1 – максимальная, K3 – минимальная), и параметр T, определяющий форму эллипсоида анизотропии

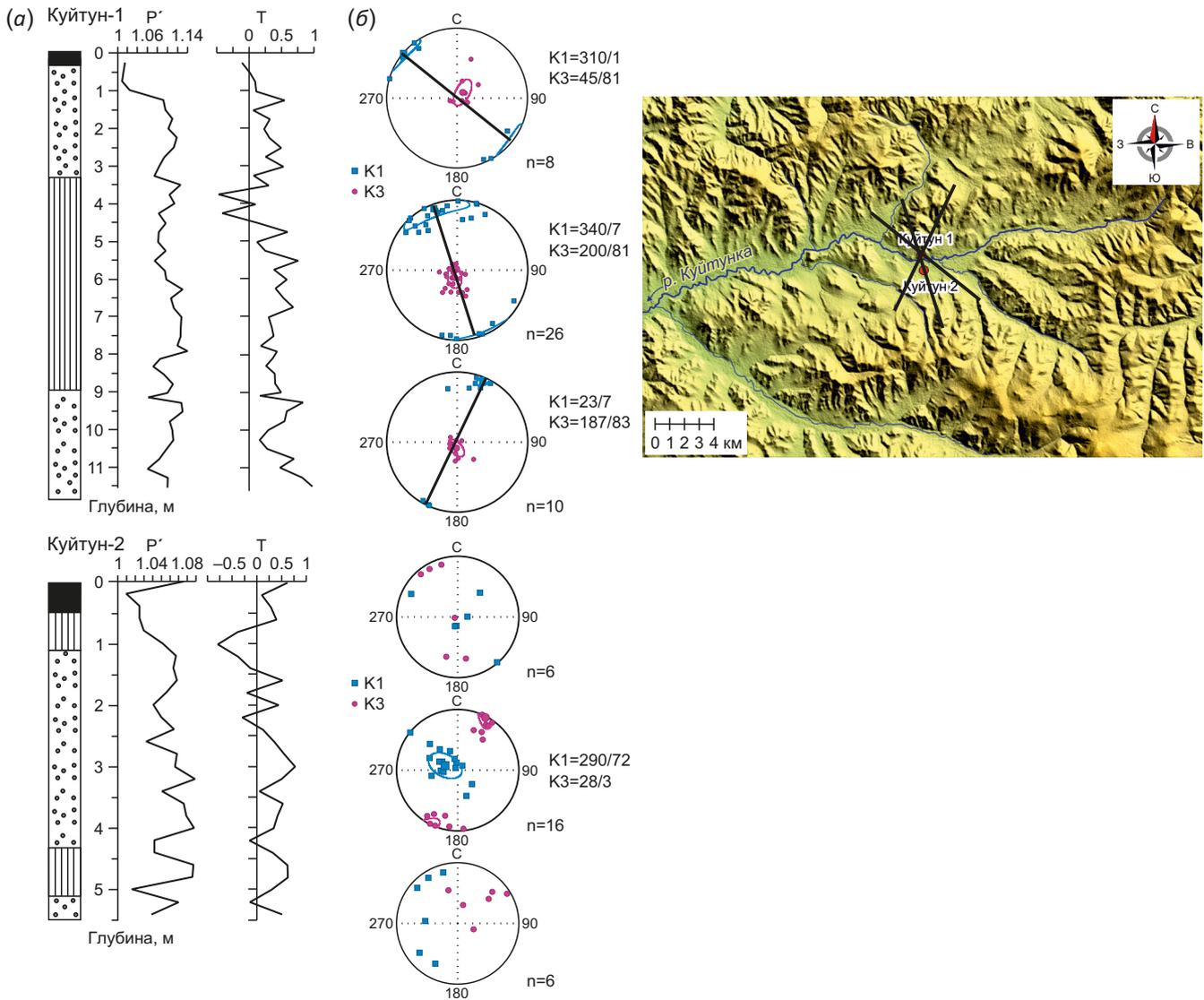


Рис. 8. Параметры анизотропии магнитной восприимчивости осадков разрезов Куйтун-1 и Куйтун-2. (а) – степень анизотропии (P') и фактор формы (T); (б) – стереопроекция эллипсоида анизотропии МВ.

Fig. 8. The anisotropy parameters for magnetic susceptibility of sediments in Kuytun-1 and Kuytun-2 sections. (a) – degree of anisotropy (P') and shape factor (T); (b) – stereoprojection of MB anisotropy ellipsoid.

[Tarling, Hrouda, 1993]. Распределение главных осей АМВ определяет магнитную текстуру отложений.

Степень анизотропии (P') в разрезе Куйтун-1 достигает довольно высоких значений (до 1.14), причем высокие значения ($P' > 1.10$) встречаются как в алевропесках, так и в алевритах (рис. 8, а). За исключением современной почвы, параметр P' мало меняется, колеблется вокруг значения 1.10, не показывая никаких закономерностей. На стереопроекциях, построенных по отдельным частям разреза, отражена линейно-плоскостная магнитная текстура, характерная для осадочных отложений (рис. 8, б). В верхней части разреза исключены точки, соответствующие образцам из современной почвы, которые имеют низкую степень анизотропии; они расположены хаотично, что отражает незавершенность процесса формирования современной почвы и отсутствие нагрузки (давления) перекрывающих осадков. В оставшейся верхней и нижней части разреза Куйтун-1 ярко выражена линейность осадочной текстуры, указывающая на направление действия преобладающего фактора, регулирующего формирование осадков. В нижней части это СВ–ЮЗ, в верхней части – разворот до СЗ–ЮВ, но в обоих случаях эти направления ориентированы почти поперек простирания долины р. Куйтунка и указывают на поступление материала преимущественно с горных хребтов, окаймляющих долину. В средней алевритовой части осадки также имеют типичную линейно-плоскостную текстуру с направлением ССЗ–ЮЮВ, переходным между направлениями верхней и нижней части. Возможно, формирование разреза Куйтун-1 происходило под воздействием медленно меняющегося преимущественного сноса, от СВ–ЮЗ до СЗ–ЮВ. Можно предположить, что транспортировка обломочного материала в долину осуществлялась главным образом плоскостным смывом и сезонными временными потоками, направление которых определялось рельефом.

В отложениях разреза Куйтун-2 совершенно иная картина анизотропии МВ. Во-первых, во всех частях разреза не наблюдается плоскостной текстуры, характерной для осадков, накапливающихся в спокойной

обстановке. Общая степень анизотропии здесь ниже, но изменчивость ее гораздо выше, чем в Куйтуне-1, наблюдается слабая тенденция увеличения P' с глубиной. На стереопроекциях верхней и нижней части разреза главные оси эллипсоида АМВ распределены хаотично, что свидетельствует об отсутствии какой-либо текстуры. Такая картина характерна для перемешанных осадков [Dall'Olio et al., 2013; Fabrizio et al., 2016]. В средней части разреза характер анизотропии МВ резко отличается как от других частей Куйтуна-2, так и от разреза Куйтун-1. Здесь эллипсоид МВ развернут почти на 90° , лежит так, что его максимальная и минимальная оси поменялись местами. При этом минимальная ось ориентирована СВ–ЮЗ, максимальная, соответственно, ориентирована СЗ–ЮВ – вдоль борта оврага правого притока р. Куйтунка. Такой характер магнитной анизотропии характерен для турбидитов [Tarling, Hrouda, 1993; Popov, Zhuravlev, 2012], то есть катастрофических (возможно, вихревых) потоков осадочного материала.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Строение разрезов. В результате применения комплекса методов уточнено и детализировано строение разрезов. Отложения обоих разрезов представлены алевритом глинистым (суглинок), алевритом песчаным (супесь), алевропеском (супесь опесчаненная) и песком. Реперными горизонтами в обоих разрезах являются ископаемые почвы и толща осадков неясного происхождения в средней части разреза Куйтун-2. Эти горизонты должны выделяться всеми тремя методами. По данным комплексного исследования отложений положение палеопочв зафиксировано в табл. 5.

На основании выделенных интервалов, с учетом некоторого несовпадения границ и мощностей, строение разрезов представлено на рис. 9.

Уверенно выделяются палеопочвы на глубине ~7.7–9.0 м и 11.0–11.1 м (Куйтун-1) и на глубине ~4.5–5.0 м (Куйтун-2). Так же по всем параметрам определяется, вероятно, педокомплекс на глубине ~3.5–5.0 м в разрезе Куйтун-1, состоящий из трех горизонтов, верхний

Таблица 5. Стратиграфическое положение ископаемых почв в разрезах (в метрах) по данным разных методов
Table 5. Stratigraphic location of fossil soils in sections (m) from the data obtained by different methods

Разрез	Гранулометрический состав	Концентрационные магнитные параметры	Параметры жесткости, структурные параметры	Окислы	Модули
Куйтун-1	0.9–1.0	–	–	0.9–1.0	–
	3.5–4.0	3.8–5.0	3.5–3.7	3.8–5.0	–
	4.8–5.4	–	4.7–4.9	–	4.5–5.0
	–	5.8–6.3	5.5–6.5	5.8–6.4	5.7–6.9
	7.4–8.9	7.9–9.0	7.9–9.0	7.5–8.8	8.5–9.0
	11–11.1	11.0–11.1	10.9–11.1	11.0–11.1	11.0–11.1
Куйтун-2	0.8–1.1	0.8–1.1	–	0.7–0.9	–
	4.5–5.0	4.4–5.1	4.3–5.0	4.4–5.2	4.3–5.1

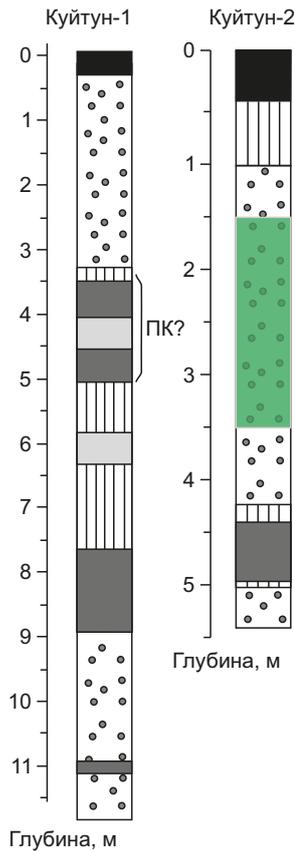


Рис. 9. Строение разрезов по комплексу данных. Цветом выделены интервалы наиболее вероятного положения палеопочв: темно-серым цветом – по результатам трех методов, светло-серым – двух методов. Светло-зеленым прозрачным обозначено положение осадков неясного генезиса (дискуссия в тексте).

Fig. 9. The sectional structure based on the dataset. The colors show the intervals of the most probable location of paleosols: dark-gray – from the results of three methods, light-gray – from the results of two-methods. Light-green transparent shows the location of sediments of the unknown genesis (see text for explanation).

и нижний из которых явно выражены, а горизонт между ними выделяется только петромагнитными и геохимическими параметрами. Аналогично фиксируется как палеопочвенный горизонт на глубине ~5.8–6.3 м. Эти образования не соответствуют почвам по гранулометрическому составу.

Несовпадение границ объяснимо природными факторами и спецификой каждого метода. Свойства поступающего в среду осадконакопления обломочного материала зависят от свойств и состава разрушающихся пород в питающих провинциях, дальности и способа транспортировки, рельефа и климатических условий. При накоплении и последующих преобразованиях осадка в процессе захоронения формирование окончательного гранулометрического состава, магнитных свойств и геохимического состава происходит независимо. Внешние воздействия в виде ветров, сезонных осадков, биотурбаций, прогрева или промерзания

верхних частей рыхлых отложений затрагивают первые метры приповерхностной части отложений и приводят к различным изменениям свойств отложений. На механический (гранулометрический) состав влияет рельеф и интенсивность процессов выветривания, приводящая к дезинтеграции частиц. Формирование магнитных свойств обусловлено, в первую очередь, количеством и составом терригенных магнитных минералов в поступающем материале и далее их трансформацией и образованием *in situ* новых (аутигенных) магнитных минералов; эти процессы происходят, прежде всего, под влиянием климата и биохимических воздействий. Геохимический состав первичного осадка зависит, в первую очередь, от состава пород областей сноса и физико-химических условий в месте осаждения, определяемых климатом. При этом в процессе осадконакопления привнесенный осадок может перемешиваться с элювиальными и склоновыми отложениями и их свойства могут нивелироваться. Не меньшее влияние на свойства осадка могут оказывать процессы инфильтрации и вымывания.

После захоронения происходит установление постоянного режима окислительно-восстановительных условий, фиксируется отсутствие колебаний внешних воздействий на физические, механические и химические свойства погребенных осадков, гравитационное давление, что приводит к выравниванию и стабилизации состава и свойств осадков.

Различие в свойствах отложений двух разрезов.

Несмотря на схожесть гранулометрического, геохимического и магнитного состава отложений, существует и значительное различие между разрезами, которое позволяет делать некоторые предположения о происхождении отложений. Отметим четкие различия в свойствах отложений двух разрезов:

1. Строение разрезов кардинально различается: если верхняя и нижняя части разреза Куйтун-1 сложены крупнозернистыми осадками – алевропесками, то в разрезе Куйтун-2 такие осадки слагают среднюю часть разреза; и наоборот, мелкозернистые алевриты слагают среднюю часть разреза Куйтун-1 и верхнюю и нижнюю часть разреза Куйтун-2. Если в разрезе Куйтун-1 по комплексу данных обнаружены 4–5 горизонтов ископаемых почв, то в разрезе Куйтун-2 уверенно выделяется только одна палеопочва.

2. На основании гранулометрических спектров в составе отложений разреза Куйтун-1 проявляются два источника обломочного материала – относительно дальний (пик спектра 60–80 мкм) и ближний (дополнительный пик 400–500 мкм). Транспортировка из дальнего источника, скорее всего, производилась ветровым комбинированным путем – в виде воздушной взвеси и более крупных частиц – в виде сальтации. В качестве ближнего (подчиненного значения) источника возможно предполагать ветровую переработку аллювиальных отложений р. Куйтунка, а также выносов осадочного материала по долинам и оврагам временных (сезонных) притоков р. Куйтунка местного

значения. С учетом результатов магнитной текстуры отложений направление ветрового переноса менялось в течение позднего плейстоцена с СВ–ЮЗ на СЗ–ЮВ, но во все периоды направление было приблизительно вкострости простирающаяся Куйтунской долины. В гранулометрических спектрах отложений разреза Куйтун-2 наблюдается только один пик (80–100 мкм), предполагающий один источник осадочного материала. Отложения противоположного склона долины (в основном средняя часть разреза Куйтун-2) образовались в результате активных склоновых процессов и представляют собой облессованные делювиальные отложения (по данным гранулометрического и петромагнитного исследования) и осадки склоновых селей (по магнитной текстуре) с довольно однородным геохимическим составом. Судя по гранулометрическому спектру, здесь не принимали участие местные источники осадочного материала, как в отложениях северного склона долины. И этот вывод имеет принципиальное значение для реконструкции истории осадконакопления в Куйтунской долине.

3. Магнитные характеристики отложений разреза Куйтун-2, зависящие от концентрации магнитных минералов, в 1.5 раза выше, а коэрцитивные параметры и параметры магнитной «жесткости» ниже, чем в Куйтун-1. Несмотря на то, что в Куйтун-1 зафиксирован дополнительный местный источник обломочного материала, видимо, он беден магнитными минералами, и если исключить его привнос, то различие между содержанием магнитных минералов будет еще больше.

4. Различия в поведении магнитной восприимчивости от температуры в циклах «нагрев – охлаждение» свидетельствует об обеднении органическим веществом отложений разреза Куйтун-2, вероятно, в процессе его вымывания или выноса катастрофическими потоками (склоновыми селями).

5. Геохимический состав отложений двух разрезов близок, но значения петрохимических модулей разнятся, особенно по диапазонам изменения, а некоторые, например ЩМ, НКМ, вообще не пересекаются. Значения климатических модулей CIA, PIA, CIW в обоих разрезах говорят о том, что породы невыветрелые, слабоизменяемые, поступали в область седиментации из питающих провинций в семиаридном климате, и в разрезе Куйтун-2 степень измененности пород, слагающих толщу разреза, меньше, чем в разрезе Куйтун-1.

Палеорекострукция. Разрез Куйтун-1 находится на склоне долины южной экспозиции, здесь основная роль принадлежала эоловой транспортировке с подчиненным значением склоновых процессов и постседиментационной проработке осадков. Линейно-плоскостная магнитная текстура свидетельствует о «нормальном» осадочном процессе образования супесчано-суглинистых горизонтов, перемежающихся с ископаемыми почвами. При наличии сведений о возрасте отложений этот разрез пригоден для палеоклиматических реконструкций, для построения возрастной модели

осадконакопления в Куйтунской долине. Разрез Куйтун-2 находится на пологом склоне долины северной экспозиции (см. рис. 1), здесь значительное влияние оказывали активные преобразования осадочных толщ, вплоть до катастрофических потоков. Имея возрастные оценки, можно предположить временной период протекания интенсивных склоновых процессов.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные комплексные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- отложения обоих разрезов содержат информацию об истории осадконакопления покровных лессовидных отложений в долине, каждый из разрезов зафиксировал разные аспекты (процессы) формирования осадочного чехла;

- осадконакопление в долине носило циклический характер: периоды потеплений – почвообразования сменялись периодами похолоданий – накопления супесчано-суглинистых толщ, все процессы происходили преимущественно семиаридном климате с небольшими колебаниями влажности;

- режим «нормального» образования покровного осадочного чехла представлен в строении и свойствах отложений, вскрытых на склоне долины северной экспозиции (разрез Куйтун-1); интенсивные склоновые процессы, переработка, перемешивание отложений катастрофическими потоками (склоновыми селями) и криогенезом зафиксированы в строении и свойствах отложений, вскрытых разрезом Куйтун-2 на пологом склоне долины северной экспозиции;

- применение комплекса методов показало, что в силу разной чувствительности, разной направленности и детальности гранулометрической, магнитной и геохимической методы не дублируют, а дополняют друг друга, в связи с чем рекомендуется именно такой набор методов для изучения подобных отложений (субаэриальных толщ со склоновыми образованиями и палеопочвами).

7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

8. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

An Z.S., Kukla G.J., Porter S.C., Xiao J.L., 1991. Magnetic Susceptibility Evidence of Monsoon Variation on the Loess Plateau of Central China during the Last 130000 Years.

Quaternary Research 36, 29–36. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(91\)90015-W](https://doi.org/10.1016/0033-5894(91)90015-W).

Cox R., Lowe D.R., Cullers R.L., 1995. The Influence of Sediment Recycling and Basement Composition on Evolution of Mudrock Chemistry in Southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59 (14), 2919–2940. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00185-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00185-9).

Dall'Olio E., Felletti F., Muttoni G., 2013. Constraints on Mechanisms of Deep-Water Mudstone Deposition in the Marnoso Arenacea Formation (Miocene, Italy) Through Magnetic Fabric Analysis. *Journal of Sedimentary Research* 83, 170–182.

Erbajeva M.A., Shchetnikov A.A., Kazansky A.Yu., Matasova G.G., Khenzykhenova F.I., Filinov I.A., Namzalova O.D.-Ts., Nechaev I.O., 2019. The New Pleistocene Ulan-Zhalga Key Section in Western Transbaikalia. *Doklady Earth Sciences* 488, 1035–1038. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1909023X>.

Evans M.E., Heller F., 2003. *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics*. Academic Press, New York, 299 p.

Fabrizio F., Dall'Olio E., Muttoni G., 2016. Determining Flow Directions in Turbidites: An Integrated Sedimentological and Magnetic Fabric Study of the Miocene Marnoso Arenacea Formation (Northern Apennines, Italy). *Sedimentary Geology* 335, 197–215. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.02.009>.

Fedo C.M., Nesbitt H.W., Young G.M., 1995. Unraveling the Effects of Potassium Metasomatism in Sedimentary Rocks and Paleosols, with Implications for Paleoweathering Conditions and Provenance. *Geology* 23 (10), 921–924. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023%3C0921:UTEOPM%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023%3C0921:UTEOPM%3E2.3.CO;2).

Golubtsov V.A., Ryzhov Yu.V., Kobylkin D.V., 2017. Late Glacial and Holocene Soil Formation and Sedimentation in the Selenga Middle Mountains. Publishing House of Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, 139 p. (in Russian) [Голубцов В.А., Рыжов Ю.В., Кобылкин Д.В. Почвообразование и осадконакопление в Селенгинском среднегорье в позднеледниковье и голоцене. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2017. 139 с.].

Ivanova V.V., Erbaeva M.A., Shchetnikov A.A., Kazansky A.Yu., Matasova G.G., Alekseeva N.V., Filinov I.A., Kuzmin M.I., 2020. The Tologoi Key Section (Upper Cenozoic, Transbaikalia): Reconstruction of the Peculiarities and Depositional Environment. *Russian Geology and Geophysics* 61 (12), 1374–1390. <https://doi.org/10.15372/RGG2020141>.

Ivanova V.V., Shchetnikov A.A., Filinov I.A., Veshcheva S.V., Kazansky A.Y., Matasova G.G., 2016. Lithochemochemistry of Rocks of the Upper Neopleistocene Ust-Oda Reference Section in the Irkutsk Amphitheater of the Siberian Platform. *Lithology and Mineral Resources* 51, 179–194. <https://doi.org/10.1134/S0024490216030020>.

Jasonov P.G., Nourgaliev D.K., Bourov B.V., Heller F., 1998. A Modernized Coercivity Spectrometer. *Geologica Carpathica* 49 (3), 224–226.

Kalinin P.I., Alekseev A.O., Savko A.D., 2009. Quaternary Loesses, Paleosols and Paleogeography of the Southeastern

Russian Plain. Voronezh State University Publishing House, Voronezh, 139 p. (in Russian) [Калинин П.И., Алексеев А.О., Савко А.Д. Лёссы, палеопочвы и палеогеография квартера юго-востока Русской равнины. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2009. 139 с.].

Maslov A.V., 2005. *Sedimentary Rocks: Study Methods and Data Interpretation*. Urals State Mining University, Ekaterinburg, 289 p. (in Russian) [Маслов А.В. Осадочные породы: методы изучения и интерпретация полученных данных. Екатеринбург: УГГУ, 2005. 289 с.].

Matasova G.G., Kazansky A.Yu., Shchetnikov A.A., Filinov I.A., Erbaeva M.A., 2020. New Rock- and Paleomagnetic Data on Quaternary Deposits of the Tologoi Key Section, Western Transbaikalia, and Their Paleoclimatic Implications. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 56, 392–412. <https://doi.org/10.1134/S1069351320030052>.

Matasova G.G., Kazansky A.Yu., Zykina V.S., 2003. Superposition of "Alaskan" and "Chinese" Models of Paleoclimate Records in Magnetic Properties of Upper and Middle Neopleistocene Deposits in Southern West Siberia. *Russian Geology and Geophysics* 44 (7), 607–619.

Matasova G., Petrovsky E., Jordanova N., Zykina V., Kapicka A., 2001. Magnetic Study of Late Pleistocene Loess/Palaeosol Sections from Siberia: Palaeoenvironmental Implications. *Geophysical Journal International* 147 (2), 367–380. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01544.x>.

Nesbitt H.W., Young G.M., 1982. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites. *Nature* 299, 715–717. <https://doi.org/10.1038/299715a0>.

Popov V.V., Zhuravlev A.V., 2012. Anisotropy of Various Magnetic Parameters Use for Determining Directions of Material Transfer in the Study of Turbidite Currents. *Petroleum Geology. Theoretical and Applied Studies* 7 (1) (in Russian) [Попов В.В., Журавлев А.В. Использование анизотропии различных магнитных параметров определения направления сноса материала при изучении турбидитных потоков // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2012. Т. 7. № 1]. Available from: http://www.ngtp.ru/rub/2/11_2012.pdf (Last Accessed September 15, 2022).

Raukas A.V. (Ed.), 1981. *Bottom Sediments of Peipsi Lake*. Collected Papers. Publishing House of the ESSR Academy of Science, Tallinn, 160 p. (in Russian) [Донные отложения Псковско-Чудского озера: Сборник статей / Ред. А.В. Раукас. Таллинн: Изд-во АН ЭССР, 1981. 160с.].

Retallack G.J., 2001. *Soils of the Past: An Introduction to Paleopedology*. Oxford, Blackwell Science, 416 p. <https://doi.org/10.1002/9780470698716>.

Ryzhov Y.V., Golubtsov V.A., Opekunova M.Y., 2021. The Formation of the Tarbagataika River Terraces (Western Transbaikalia) in the Late Glacial and the Holocene. *Geography and Natural Resources* 42, 164–171. <https://doi.org/10.1134/S1875372821020116>.

Tarling D.H., Hrouda F., 1993. *The Magnetic Anisotropy of Rocks*. Chapman & Hall, London, 217 p.

Verzilin N.N., 1995. On Classification of Sedimentary Rocks in the Context of the Lithological-Paleogeographic Studies. *Russian Geology and Geophysics* 36 (11), 131–141 (in Russian)

[Верзилин Н.Н. О классификации осадочных пород при литолого-палеогеографических исследованиях // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 11. С. 131–141].

Volkov I.A., 1971. Late Quaternary Subaerial Formation. Nauka, Moscow, 254 p. (in Russian) [Волков И.А. Позднечетвертичная субаэральная формация. М.: Наука, 1971. 254 с.].

Yudovich Ya.E., Ketrис M.P., 2000. Fundamentals of Lithochemistry. Nauka, Saint Petersburg, 497 p. (in Russian) [Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 497 с.].

Yudovich Ya.E., Ketrис M.P., 2011. Geochemical Indicators of Lithogenesis (Lithological Geochemistry). Geoprint, Syktyvkar, 742 p. (in Russian) [Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 2011. 742 с.].

Zhdanova A.I., Kazansky A.Yu., Zol'nikov I.D., Matasova G.G., Gus'kov S.A., 2007. Application of Geological and Petro-magnetic Methods to Facies-Genetic Division of Subaerial Deposits in the Ob' Region near Novosibirsk (Ogurtsovo Key Section). Russian Geology and Geophysics 48 (4), 349–360. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.03.003>.