



ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ И КОРОТКОПЕРИОДИЧНЫЕ СОБЫТИЯ ПОЗДНЕГО ПЛЕЙСТОЦЕНА В ЗАПИСИ ЛЕССОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РАЗРЕЗА ЛОЖОК, ЮГО-ВОСТОК ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

А. О. Вольвах, Н. Е. Вольвах, Л. Г. Смолянинова

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

Приведены данные детального распределения в лессово-почвенных отложениях разреза Ложок отношений Ba/Sr, Mg/Ca, Sr/Ca, Mg/Sr, магнитной восприимчивости и U-ratio, являющихся палеоклиматическими индикаторами. Записи геохимических индексов и магнитной восприимчивости показывают хорошую сходимость. Установлено, что климатические условия холодных стадиялов последней ледниковой эпохи (70000–11700 лет назад) постепенно становились суше. Внутри каждого стадияла от его начала к завершению также отмечается уменьшение количества осадков и увеличение силы ветрового потока (U-ratio). Установлено, что климат периодов лессонакопления не был стабильно сухим и холодным: в каждом горизонте лесса выявлены быстрые короткопериодические климатические колебания, выраженные в резком увеличении количества осадков с постепенным его снижением. Выполнено первичное сопоставление выделенных тысячелетних климатических осцилляций с событиями Дансгора – Эшгера, зафиксированных в ледовой записи климата ядра NGRIP (North Greenland Ice Core Project) и отражающихся в различных отложениях Северного полушария.

Ключевые слова: *плейстоцен, лесс, лессово-почвенная последовательность, Западная Сибирь, короткопериодические колебания климата, магнитная восприимчивость, индексы выветривания.*

PALEOCLIMATIC CHANGES AND SHORT-PERIOD EVENTS OF THE LATE PLEISTOCENE IN THE RECORD OF LOESSIAL SEDIMENTS OF THE LOZHOK SECTION, SOUTH-EASTERN WEST SIBERIA

А. О. Volvakh, N. E. Volvakh, L. G. Smolyaninova

V.S.Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

Data on the detailed distribution of the Ba/Sr, Mg/Ca, Sr/Ca, Mg/Sr ratios, magnetic susceptibility, and U-ratio, which are paleoclimatic indicators, are presented. Records of geochemical proxies and magnetic susceptibility show good convergence. It is shown that the climatic conditions of the cold stadials of the last ice age (70,000–11,700 years old) gradually became drier. Within each stadial, there is also a decrease in precipitation from its beginning to completion. In the same direction, the force of the wind flow expressed by the U-ratio coefficient increased. It is established that the climate of loess accumulation periods was not consistently dry and cold: fast short-period climatic fluctuations have been revealed in each loess horizon; they are expressed in a sharp increase in the amount of precipitation with its gradual decrease. An attempt is made to compare the identified millennium-old climatic oscillations with the Dansgaard-Oeschger events recorded in the ice record of the NGRIP core climate and reflected in many deposits of the Northern Hemisphere.

Keywords: *Pleistocene, loess, loess-paleosol sequence, West Siberia, short-period climatic fluctuations, magnetic susceptibility, weathering proxies.*

DOI 10.20403/2078-0575-2019-4-17-27

В связи с повышенным интересом к проблеме изменения климата в последние десятилетия по всему миру проводятся разносторонние исследования лессовых отложений, направленные на восстановление динамики и причин изменений природных процессов прошлого, а также на выявление палеоклиматических осцилляций различного масштаба в течение последней ледниковой эпохи. Лессово-почвенная последовательность (ЛПП) – это своего рода богатый континентальный архив палеосреды, содержащий детальную информацию о динамике эоловой аккумуляции пыли и вторичных изменений отложений, проявлявшихся в различных климатических условиях. При изучении лессовых отложений с целью прослеживания палеоклиматических изменений следует учитывать возможное влияние химического и физического выветривания, склоновых процессов,

процессов почвообразования, а также вероятное наличие перерывов в осадконакоплении.

Общепринято, что лессовые отложения формировались эоловым путем в результате осаждения пылеватых частиц из атмосферного потока. Лессово-почвенные отложения верхнего плейстоцена юга-востока Западной Сибири накапливались в условиях внеледниковой зоны, лессовые слои образовывались в криоаридных условиях [7, 18] в течение стадиялов, а палеопочвы – во время интерстадиялов и казанцевского межледниковья. Наиболее полным разрезом ЛПП верхнего плейстоцена в Новосибирской области является разрез Ложок. Он расположен в Искитимском районе, на междуречье Шипунихи и Койнихи в бывшем, ныне задержанном карьере, в 1,5 км от ж/д станции Ложок (рис. 1). Разрез выделен в качестве стратотипиче-



0 100 км

Рис. 1. Расположение разреза Ложок, Новосибирское Приобье, юго-восток Западной Сибири

ского для лессово-почвенной формации верхнего плейстоцена Новосибирского Приобья [3]. В связи с этим он неоднократно изучался различными исследователями [2, 3, 21 и др.], в том числе авторами [7, 18], и интерес к нему не угасает до сих пор. Для восстановления палеоклиматических изменений во время осадконакопления лессово-почвенной последовательности разреза Ложок применен мультидисциплинарный подход. Исследование лессовых отложений различными методами позволило выделить наиболее перспективные параметры, дающие хорошие результаты при определении палеогеографических условий, сопровождавших лессонакопление на юге Западной Сибири [7, 18]. Перспективные данные содержатся в записях различных гранулометрических параметров и магнитной восприимчивости. Несомненно, важную роль играет изучение изменения химического состава отложений по разрезу. В данной работе использованы отношения Ba/Sr , Sr/Ca , Mg/Ca , Sr/Mg . Регистрация климатических колебаний в лессах выражается в изменении минимум одного из индикаторов.

Стратиграфия и геологическое строение

Согласно используемой стратиграфической схеме лессово-почвенной последовательности юга Западной Сибири [2] в позднем плейстоцене выделяются: баганский лесс (вторая половина 2-й морской изотопной стадии – МИС-2), суминская палеопочва (интерстадиал внутри МИС-2); ельцовский лесс (первая половина МИС-2); искимитский педокомплекс (МИС-3), представленный двумя интерстадиальными палеопочвами; тулинский лесс (МИС-4) и бердский педокомплекс, состоящий из интерстадиальной (МИС-5с) и межледниковой (МИС-5е) палеопочв. Последняя соответствует казанцевскому межледниковью Западной Сибири. Все стратиграфические горизонты схемы соотносятся со стадиями изотопно-кислородной шкалы океанических

осадков и другими глобальными климатическими записями [2].

В разрезе (рис. 2, 3) под профилем современной почвы залегает баганский лесс, ниже – ельцовский, который с перерывом в осадконакоплении перекрывает нижнюю палеопочву искимитского педокомплекса. Оба лесса соответствуют МИС-2. Ниже лежит тулинский лесс (МИС-4), перекрывающий отложения бердского педокомплекса. Последний представлен двумя погребенными почвами, нижняя из которых сформировалась во время казанцевского межледниковья (МИС-5е). Детальное послойное описание разреза было неоднократно опубликовано ранее [3, 7, 18, 21]. В разрезе 2018 г. (см. рис. 2, 3) ниже тулинского лесса (на глубине 5,8–6,0 м) были отмечены признаки слабо развитого почвообразования: слабо гумусированные полосы и отдельные пятна, сконцентрированные на одном уровне по простиранию разреза. Слой представлен суглинком светло-коричневым, более темным, чем выше- и нижележащие лессовидные суглинки, плотным, карбонатным, пористым, с мелкими угольками; по нижней границе слоя отмечаются редкое ожелезнение по корнеходам и редкий карбонатный псевдомицелий. Слой хорошо прослеживается как по фронтальной стенке, так и по боковым (см. рис. 3). Его мощность варьирует от 5 до 15 см, в южном направлении слой выклинивается через 2,5 м. Вероятно, его образование связано с потеплением в финальной стадии МИС-5.

Оценка возраста изученных отложений проведена на основе имеющихся радиоуглеродных датировок и корреляции горизонтов разреза Ложок с эквивалентными горизонтами ЛПП Средней Сибири [2] в детально продатированном ТЛ и ОСЛ-методами разрезе Куртак [12]. При сопоставлении имеющейся серии радиоуглеродных датировок [3], использованных при построении стратиграфической схемы [2], с данными люминесцентного датирования разреза Куртак и записью событий Гренландской кривой даты ^{14}C были переведены в калиброванные года (кал. л. н.). Перевод проводился с использованием программы Radiocarbon calibration program rev 6.0.1.

За верхнюю границу баганского лесса принимается граница плейстоцена – голоцена (11,7 тыс. лет назад; далее – л. н.); за нижнюю границу – примерно 17 тыс. л. н. согласно ^{14}C датировкам со стоянки древнего человека Волчья Грива. Эти данные получены по костному материалу на поверхности иллювиального горизонта суминской палеопочвы, которая в стратиграфической схеме разделяет баганский и ельцовский лесса (13600±230 л. н./16680±331 кал. л. н. (СОАН-111), 14200±150 л. н./17284±225 кал. л. н. (СОАН-78) [3]). Приведенные датировки характеризуют время завершения теплого интерстадиала и начало накопления баганского лесса. Также имеется ^{14}C датировка в озерной котловине оз. Аксор из палеопочвы, являющейся, по-видимому, аналогом суминской палеопочвы, – 16210±850 л. н. / 19461±907 кал. л. н. (СОАН-3891)

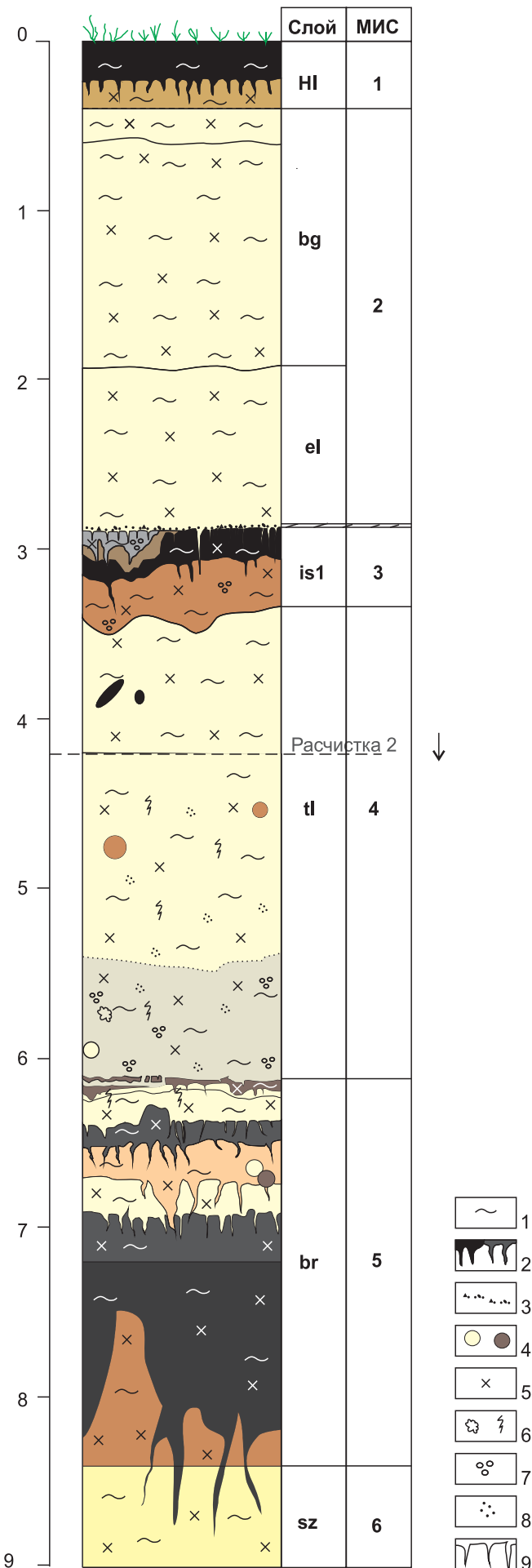


Рис. 2. Геологическое строение разреза Ложок (2018 г.)

1 – суглинок, 2 – гумусовый горизонт, 3 – включения гравия и грубозернистого песка, 4 – норы землероев (цвет соответствует цвету заполнителя), 5 – карбонатность, 6 – ожелезнение, 7 – оглеение, 8 – марганцовистый крап, 9 – трещины усыхания; hl – современная почва, bg – баганский лесс, el – ельцовский лесс, is₁ – нижняя почва искитимского педокомплекса, tl – тулинский лесс, br – бердский педокомплекс, sz – сузунский лесс, МИС – морская изотопная стадия

[4]. Исходя из этого за верхнюю границу ельцовского лесса принят рубеж примерно 19,4 тыс. л. н. В разрезе Ложок имеются ¹⁴C датировки из верхней искитимской почвы – 19400±800 л. н. / 23212±959 кал. л. н. (СОАН-164) и 21700±900 л. н. / 25982±1061 кал. л. н. (СОАН-12), отражающие время ее вторичных изменений [3]. Нижняя почва имеет ¹⁴C датировку по углю 33100±1600 / 38026±1740 кал. л. н. (СОАН-165) [3]. В разрезе Мраморный на междуречье Берди и Шипунихи (около 4 км от разреза Ложок) датировка верхнего горизонта искитимского педокомплекса – 26300±700 л. н. / 30837±501 кал. л. н. (ИГАН-167), над нижней искитимской почвой – 32780±670 л. н. / 37407±714 кал. л. н. (СОАН-629). Последняя получена по черепу шерстистого носорога [3].

Разрез Куртак является стратотипическим разрезом лессово-почвенной формации позднего плейстоцена Средней Сибири, он детально охарактеризован OSL и TL-датами [12].

Согласно этим датировкам в разрезе выделяются следующие горизонты и периоды их формирования:

- нижняя часть трифонового лесса (МИС-2, аналог ельцовского) – 17,9±2–24±4 тыс. л. н.;
- куртакский педокомплекс (МИС-3, аналог искитимского) – 24±4–57,2±6,9 тыс. л. н.;
- чанинский лесс (МИС-4, аналог тулинского) – 57,2±6,9–69,5±11,8 тыс. л. н.;
- сухоложский педокомплекс (МИС-5а, с, аналог верхней почвы бердского) – в пределах 69,5±11,8–101±20 тыс. л. н.;
- каменноложская палеопочва (МИС-5е, аналог нижней бердской) – 118±13–126±29 тыс. л. н. [12].

В соответствии с приведенными данными и в настоящей статье принимаются следующие интервалы (тыс. л. н.) формирования горизонтов разреза Ложок: баганский лесс – 11,7–17, ельцовский лесс – 19,4–24, искитимский педокомплекс – 24–57,2, тулинский лесс – 57,2–69,5, бердский педокомплекс – 69,5–126 (межледниковая нижняя бердская палеопочва – 118–126).

Элементные отношения Ba/Sr, Mg/Ca, Sr/Ca, Mg/Sr

Геохимические индикаторы изменения минерального состава (индексы химического выветривания) основаны на принципе перемещения в процессе выщелачивания более подвижных и растворимых элементов относительно менее



Рис. 3. Верхнеплейстоценовая лессово-почвенная последовательность разреза Ложок (расчистка 2018 г.)
Усл. обозн. см. на рис. 2

подвижных или нерастворимых [9]. При химическом выветривании отложений элементный состав материнской породы изменяется. Количество растворимых и подвижных элементов сокращается. Однако процессы почвообразования не только сопровождаются выветриванием и уменьшением содержания элементов, происходит также минеральная перестройка с образованием вторичных глинистых минералов и/или оксидов железа. При выборе индексов выветривания важно учитывать наличие в исходной материнской породе минералов, являющихся источниками рассматриваемых элементов. Нами использованы отношения Ba/Sr , Sr/Ca , Mg/Ca , Mg/Sr , которые применяются в Европе и Китае в качестве палеоклиматических индикаторов, чувствительных к количеству осадков, выпадающих во время лессонакопления [8, 9 и др.].

Ba/Sr. Это отношение основано на сравнении содержания слабоподвижного бария и более мобильного стронция. Оба элемента высвобождаются преимущественно из калиевого полевого шпата и плагиоклазов [1, 6] при одинаковых условиях, но с разной скоростью выщелачивания. М. Бокхорст с соавторами [8] показали, что наибольшую точность это соотношение показывает при относительно низкой интенсивности атмосферных осадков и может служить индикатором сухих и умеренно влажных климатов. Стронций может накапливаться

в отложениях при образовании вторичных карбонатов в аридных обстановках [11], поэтому при наличии в отложениях большого количества карбонатов соотношение Ba/Sr следует применять с осторожностью. Ba и Sr имеют невысокие биогенные коэффициенты (0,04 и 0,06, [6]), поэтому их небольшая значимость для растительности может не учитываться, следовательно, их содержание контролируется преимущественно изменениями влажности и температуры.

Mg/Ca. Первоначальным источником магния и кальция в лессах являются плагиоклазы; магний содержится в амфиболах и биотите. При химическом выветривании Mg и Ca переходят в карбонаты. Mg менее подвижен относительно Ca [6]. Поскольку Ca в процессе выщелачивания удаляется быстрее магния, указанное соотношение выше в отложениях, образованных в условиях педогенеза или при повышении количества осадков. Высокий биогенный коэффициент Ca (0,17) по сравнению с Mg (0,02) способствует убыванию Ca из разреза посредством биологической активности растений [6]. Как и в случае со Sr, следует учитывать возможность вторичного окarbonачивания отложений, потому что оно может сильно повлиять на соотношение Mg/Ca.

Mg/Sr и Sr/Ca. Ряд растворимости для этих элементов выглядит как $Sr < Mg < Ca$, т. е. кальций имеет наибольшую растворимость, а стронций – наименьшую [6]. Главным фактором их выноса яв-

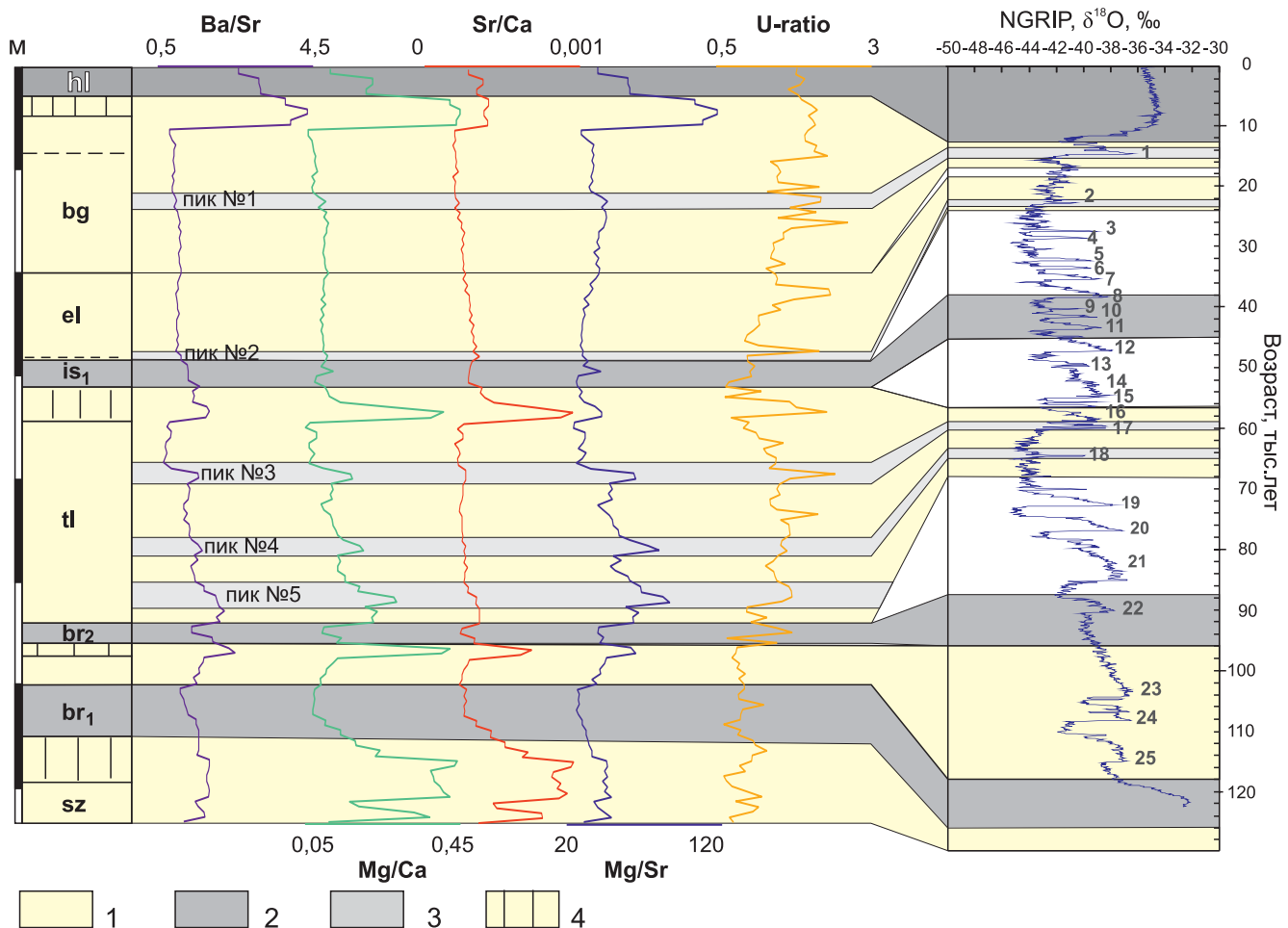


Рис. 4. Распределение элементных отношений по разрезу Ложок (расчистка 2011 г.) и корреляция выделенных климатических событий с записью ледового ядра NGRIP [14]

1 – лесс; 2 – гумусовый горизонт почвы; 3 – климатические осцилляции; 4 – иллювиальный горизонт почвы; остальные усл. обозн. см. на рис. 2; цифрами на кривой NGRIP показаны события Дансгора – Эшгера

ляется инфильтрация дождевой и талой водой, что приводит к повышению значений их соотношений в отложениях, сформированных во влажных условиях. Как указано, все три элемента участвуют в образовании вторичных карбонатов, поэтому их отношения следует использовать с осторожностью.

Во избежание неправильной интерпретации или (в случае с содержанием вторичных карбонатов) получения данных, способных привести к ошибке, перечисленные индикаторы следует использовать в комплексе друг с другом, а также с дополнительными индикаторами палеоклиматических условий среды, основанными на магнитной восприимчивости или размере зерен.

Содержание Ca, Ba, Sr и Mg для ЛПП разреза Ложок было получено методом атомно-эмиссионной спектроскопии (ИСП-АЭС) из карбонатной вытяжки отложений в азотнокислой среде по методике М. Бокхорста с соавторами [8].

Распределение значений отношений Ba/Sr, Sr/Ca, Mg/Ca, Mg/Sr по разрезу представлено на рис. 4. Их графики показывают хорошее соответствие между собой, они сопоставимы с изменениями магнитной восприимчивости (рис. 5). Наибольшие зна-

чения Ba/Sr, Sr/Ca, Mg/Ca отмечаются в отложениях педокомплексов, которые образовались при влажном и теплом климате. При этом как в погребенных почвах искитимского и бердского педокомплексов, так и в современной голоценовой почве максимальные их значения наблюдаются в иллювиальных горизонтах, что связано с активными процессами химического выветривания и вымывания элементов из гумусовых горизонтов. Наиболее показательны для лессовых отложений отношения Ba/Sr, Mg/Sr и Mg/Ca. Отношения, контролируемые содержанием магния, более чувствительны к обнаружению колебаний влажности внутри лессовых горизонтов; Mg/Sr слабо выражено в горизонтах палеопочв, однако в лессовых горизонтах хорошо маркирует периоды увлажнения; Sr/Ca отражает только периоды педогенеза. Значения отношений в разновозрастных лессовых горизонтах практически не изменяются и слабо варьируют внутри горизонта. При этом в каждом горизонте лесса отмечаются пики, свидетельствующие о том, что в холодные и сухие периоды лессонакопления позднего плейстоцена имели место климатические осцилляции, выраженные в некоторых увеличениях увлажненности,

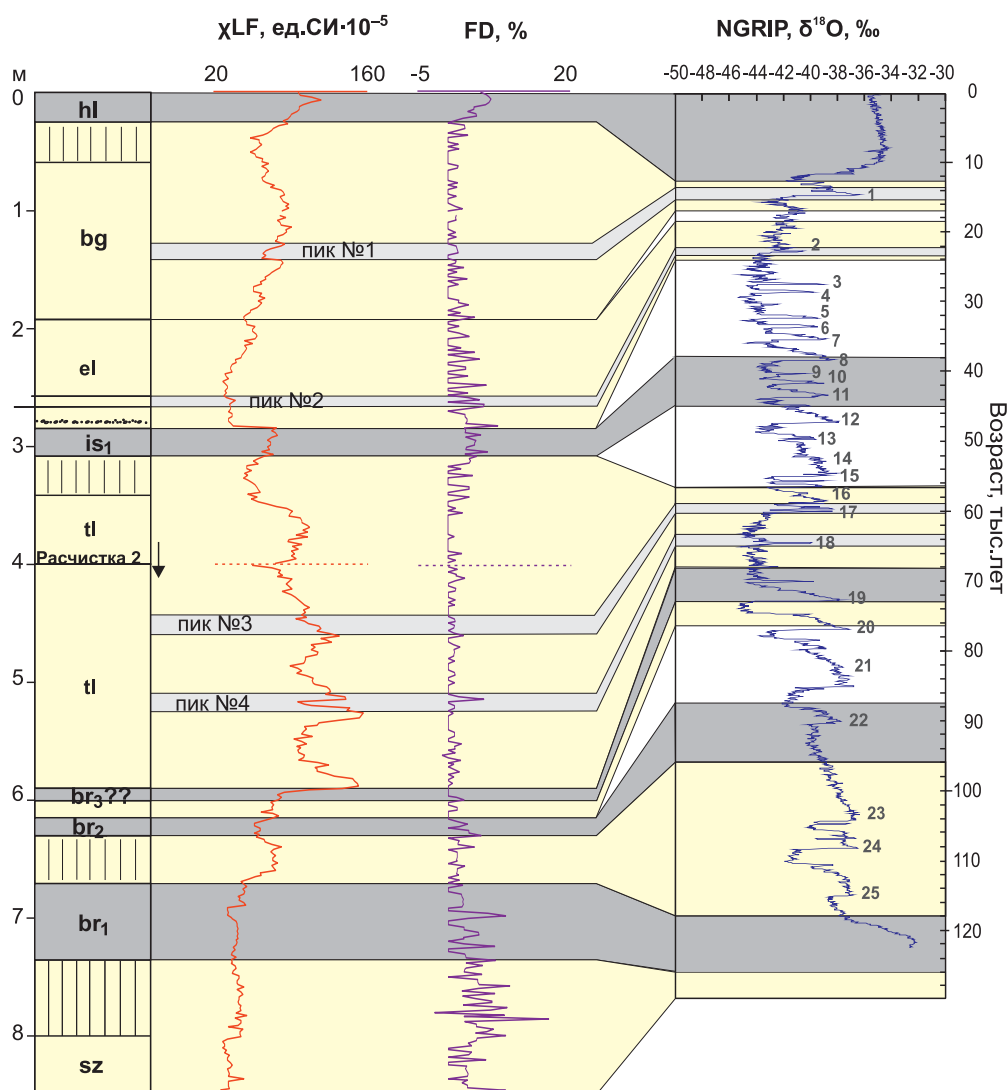


Рис. 5. Магнитная характеристики разреза Ложок (расчистка 2018 г.)

Усл. обозн. см. на рис. 4

наиболее сильно – в тулинском лессе на глубинах 3,85–4,0, 4,5–4,7 и 5,0–5,2 м (см. рис. 4), менее – в ельцовском (2,65–2,75 м) и баганском (1,3–1,5 м) лессах.

Максимальные значения элементных отношений отмечаются в иллювиальных горизонтах почв, которые являются лессовыми отложениями, значительно переработанными химическими процессами во время почвообразования. Отношения Ba/Sr, Sr/Ca, Mg/Ca, Mg/Sr коррелируют с изменениями магнитной восприимчивости в отложениях и могут являться признаком проявления влажных обстановок; их вариации связаны с климатическими колебаниями. В каждом горизонте лесса отмечаются несколько осцилляций, выраженных в увеличении значений этих отношений, что указывает на повышение количества осадков в указанные короткие периоды на фоне более сухого и холодного климата, характерного для стадиялов.

Гранулометрическая характеристика

Гранулометрический анализ не только используется для литологической характеристики отложе-

ний, но и широко применяется при интерпретации данных об условиях природной среды, в которой происходило лессонакопление. Несмотря на то что на юге Западной Сибири большинство лессов в той или иной степени переработаны в результате деятельности вторичных процессов, вариации гранулометрического состава ЛПП связаны с условиями природной среды и изменением климата [7, 18]. При изучении следует учитывать, что распределение гранулометрического состава отражает не только динамику субаэральной среды, но и постседиментационные процессы. С целью исключения их влияния используются различные индексы. На примере отложений Лессового плато в Китае было показано, что укрупнение гранулометрического состава соответствует увеличению скорости осадконакопления, поскольку то и другое зависят от ветровой энергии [16]. Крупнозернистые осадки связаны с динамичной средой, для которой типичны сильные ветра и холодные условия, тогда как наиболее мелкозернистый материал (преимущественно глинистый) связан с низкой энергией осаднения в более теплых условиях. Подробное распределе-



ние гранулометрического состава отложений приводилось в предыдущих работах [7, 18], в данной статье – только отношение U-ratio.

Коэффициент U-ratio (отношение количества среднезернистой пыли к мелкозернистой) – $(5,5-16)/(16-44)$ мкм [19]. При этом исключаются глина, содержание которой контролируется преимущественно вторичными процессами, и крупнозернистые фракции, для которых в основном характерна транспортировка сальтацией. Исключение глинистой фракции позволяет убрать влияние вторичных процессов, отразив непосредственно процесс осадконакопления и позволив оценить ветровую энергию. Гранулометрический состав измерен на лазерном измерителе размера частиц Fritsch Analysette a22 с интервалом отбора образцов через 5 и через 2 см.

В записи изменения U-ratio в разрезе Ложок отмечается серия холодных событий с усилением ветровой энергии в течение времени накопления баганского лесса, которые можно связать с эпизодами дриаса, а также с тысячелетними климатическими осцилляциями (см. рис. 4). В тулинском и ельцовском лессах отмечается усиление ветровой активности от начала до завершения осадконакопления. Наиболее высокая интенсивность ветрового потока отмечается в периоды лессонакопления, более спокойная – во время почвообразования (см. рис. 4).

Изменение гранулометрического состава разреза Ложок не только отражает различия между палеопочвенными горизонтами и слоями, но и позволяет проследить короткие климатические колебания внутри лессов, однако данный параметр слишком чувствителен к изменениям различных факторов и должен использоваться в сочетании с другими палеоклиматическими индикаторами.

Магнитная характеристика разреза

Магнитная восприимчивость (χ) – один из наиболее часто используемых палеоклиматических индикаторов. Она отражает изменения минеральных магнитных параметров, являясь соотношением намагниченности вещества и напряженности магнитного поля, приложенного к нему. Магнитная восприимчивость прямо коррелирует с концентрацией магнитного вещества в осадке, которая, в свою очередь, зависит от состава и размера зерен магнитных минералов [1]. В процессе педогенетического выветривания под действием солнечной радиации, температурного режима и выщелачивании атмосферными осадками изменяются параметры магнитных минералов в осадке. Частотно зависящая магнитная восприимчивость (χ_{fd}) используется для обозначения уменьшения восприимчивости при десятикратном увеличении частоты магнитного поля. Процентное выражение этого параметра рассчитывается по формуле

$$FD = \left(\frac{\chi_{LF} - \chi_{HF}}{\chi_{LF}} 100 \right),$$

где χ_{LF} – низкочастотная магнитная восприимчивость, χ_{HF} – высокочастотная магнитная восприимчивость. Данный параметр чувствителен к наличию мелкодисперсных магнитных минералов, образованных при педогенезе и в периоды увлажнения в целом. Чем он выше, тем больше концентрация мелкозернистых магнитных минералов, что говорит об активном педогенезе в период их накопления [1]. Изменение магнитной восприимчивости зависит от формирования в отложениях ферромагнетиков, которое в том числе контролируется количеством осадков. В сочетании с гранулометрической характеристикой отложений магнитная восприимчивость является достоверным индикатором увлажненности палеогеографической обстановки. Магнитная восприимчивость измерена на приборе MS-2 Bartington (интервал отбора образцов 2 см).

Нижний слой разреза относится к среднеплейстоценовому сузунскому лессу (МИС-6), подстилающему нижнюю бердскую почву, и характеризуется низкими значениями магнитной восприимчивости $30 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ и параметром FD около 2–3 % (см. рис. 5). Во время формирования нижней бердской почвы (МИС-5e) образовалось значительное количество суперпарамагнитных (SP) и однодоменных (SD) магнитных минералов, на что указывает рост FD в среднем до 6–8 %. Магнитная восприимчивость при этом увеличилась до $(40-50) \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Для верхней бердской почвы (МИС-5c) характерно повышение χ_{LF} от $50 \cdot 10^{-5}$ до $80 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ и невысокие значения FD (2–4 %). Это может свидетельствовать о более низких температурах и (или) меньшей влажности климата, чем во время формирования нижней бердской почвы.

Выделенный в ходе полевых работ 2018 г. гумусовый горизонт палеопочвы, отмеченный над лесовым прослоем, перекрывающим верхнебердскую палеопочву (МИС-5c), хорошо выделяется на графике распределения магнитной восприимчивости (χ_{LF} до $83 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ) (см. рис. 5). Эти значения выше, чем в верхней бердской почве (МИС-5c), значит, продолжается тренд снижения температур и относительного количества влаги в течение эпох почвообразования МИС-5. Одновременно вероятно повышение ветровой активности, которая еще более усиливается во время формирования тулинского лесса. Ветер привносит в осадок большое количество крупнозернистого магнитного материала, что приводит к увеличению магнитной восприимчивости. В тулинском лессе χ_{LF} достигает $160 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ при практически нулевых значениях FD. Снижение χ_{LF} до $50 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ перед началом формирования искитимской почвы может свидетельствовать об уменьшении силы ветра в этот период. В дальнейшем процессы почвообразования привели к новому росту значений магнитных характеристик. В гумусовом гори-



зонте искитимской почвы χLF колеблется в пределах $(60-80) \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, а FD составляет в среднем 4 %. В перекрывающих искитимскую почву ельцовском и баганском лессах наблюдается постепенное увеличение χLF (от $30 \cdot 10^{-5}$ до $90 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ) и дальнейшее снижение в иллювиальном горизонте современной почвы до $60 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, что также может быть связано с изменением силы ветров. В основании ельцовского лесса отмечается резкое снижение магнитной восприимчивости, вероятно, из-за перерыва в осадконакоплении. В гумусовом горизонте современной почвы значения магнитной восприимчивости достигают $114 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, $FD - 7\%$.

Значения магнитной восприимчивости, при которых χLF в лессах больше, чем в палеопочвах, характерны для «аляскинской» модели механизма записи палеоклиматического сигнала в магнитных свойствах ЛПП [20]. Связывается это с преобладанием во время формирования осадка сильных ветров, которые могут во взвешенном состоянии переносить крупные тяжелые магнитные минералы. Эта модель отчетливо проявляется в средней части разреза, где значения магнитной восприимчивости искитимской почвы ниже, чем у подстилающего ее тулинского лесса, а также внутри бердского педокомплекса. С другой стороны, «китайская» модель формирования магнитных свойств осадка [17], при которой значения χLF выше в погребенных почвах, частично отражена в отложениях бердского педокомплекса сравнительно с сузунским лессом, а также в современной почве, сформировавшейся на баганском лессе. Принимая во внимание равнинный характер Западной Сибири с сильным ветровым потоком в эпохи похолодания и резко континентальным климатом с активным образованием мелкозернистого магнитного материала в эпохи потеплений, следует ожидать проявления основных качеств обеих моделей, что мы и видим в исследуемом разрезе. Таким образом, «аляскинская» модель, где значения χLF выше в лессах, чем в почвах, характерна для искитимского педокомплекса и тулинского лесса, а «китайская» модель (значения χLF выше в почвах) для ельцовского, баганского лессов и современной голоценовой почвы. В бердском же педокомплексе присутствуют признаки наложения этих моделей: в сравнении с подстилающим сузунским лессом χLF ведет себя как в «китайской» модели, а внутри педокомплекса – как в «аляскинской». Подобная динамика неоднократно наблюдалась в разрезах Западной Сибири [5 и др.].

Учитывая «аляскинскую» модель записи палеоклиматического сигнала внутри бердского педокомплекса, где периодам педогенеза свойственны пониженные значения магнитной восприимчивости, следует отметить, что в течение формирования бердского педокомплекса наблюдается отчетливое увеличение значений магнитной восприимчивости от нижней бердской межледниковой почвы к двум верхним интерстадиальным, что может свидетельствовать о снижении количества влаги, уменьшении

степени проявления процессов почвообразования и усилении ветровой активности в этом направлении.

На графике изменения магнитной восприимчивости в разрезе Ложок в тулинском лессе отчетливо заметны три события, выраженные в пониженных значениях магнитной восприимчивости (см. рис. 5), которые связаны с резким снижением привноса тяжелых магнитных минералов и ветровой энергии и с повышением количества осадков на фоне сухих и холодных обстановок внеледниковой зоны во время лессонакопления.

Палеоклиматическая интерпретация

Детальность проведенных анализов, достигнутая максимально подробным отбором материала, дала возможность выявить короткопериодические колебания климата тысячелетнего масштаба, а также попытаться установить отображение глобальных климатических событий (быстрые изменения климата) в лессово-почвенной записи позднего плейстоцена разреза Ложок. В Западной Сибири климатические события тысячелетней продолжительности в МИС-2 впервые были обнаружены в котловине оз. Аксор [4].

К быстрым короткопериодическим изменениям климата относятся события Дансгора – Эшгера [10]. Их проявления отмечены во многих различных климатических записях Северного полушария, морских и континентальных. Отражение быстрых климатических колебаний последнего ледникового периода в лессовых записях впервые было обнаружено на Лессовом плато в Китае [15].

События (циклы) Дансгора – Эшгера (DO) – это резкие короткопериодические палеоклиматические осцилляции тысячелетнего масштаба в Северном полушарии, изначально выделенные в последнем ледниковом периоде (МИС-2, 3, 4) в высокочастотных записях ледовых кернов Гренландии [10, 13]. Они характеризуются резким непродолжительным потеплением (в масштабе десятилетий) с последующим более длительным похолоданием (столетия).

Возраст выделенных по элементным соотношениям и магнитной восприимчивости климатических осцилляций в лессовой записи разреза Ложок оценивался на основе расчетов средних скоростей осадконакопления для каждого лессового слоя. Мощность иллювиальных горизонтов палеопочв включалась в мощность лессовых слоев, поскольку они первоначально образовались в результате эоловых процессов в эпоху лессонакопления, а уже впоследствии были подвержены влиянию почвенных процессов. Средняя скорость лессонакопления рассчитывалась как отношение мощности горизонта к продолжительности его накопления (см. таблицу).

С использованием средних скоростей осадконакопления для каждого горизонта лесса рассчитано, что 5 см баганского лесса формировалось в среднем за 166 лет, ельцовского – за 287 лет, тулинского – за 273 года. При допущении относительно непрерывного лессообразования при известном

Расчет средних скоростей лессонакопления для разреза Ложок

Лесс	Мощность, мм	Время формирования, лет	Скорость, мм/год
Баганский	1600	5300	0,302
Ельцовский	800	4600	0,174
Тулинский	2250	12300	0,182

времени начала и завершения и скорости лессонакопления конкретного горизонта можно оценить примерный возраст отложений в любой точке внутри этого горизонта. Так, по отношениям Ba/Sr, Sr/Ca, Mg/Sr, Mg/Ca и магнитной восприимчивости внутри всех трех лессов разреза Ложок отмечаются пики, выражающие резкие климатические изменения. На графиках элементных отношений они представлены резким увеличением значений с более спокойным снижением. Такое распределение, по-видимому, свидетельствует о резком потеплении с последующим постепенным похолоданием. Показатели Ba/Sr и Mg/Ca в тулинском лессе выше, чем в ельцовском и баганском; отмечается снижение их значений к позднеледниковью. Следовательно, климат холодных периодов становился суше от МИС-4 до МИС-2 включительно. Внутри каждого лесса значения Ba/Sr и Mg/Ca уменьшаются от основания горизонта к его кровле. Это означает, что в течение каждой холодной эпохи климат со временем становился суше и холоднее. Кроме того, минимальные значения Ba/Sr, Sr/Ca, Mg/Sr, Mg/Ca отмечаются в верхней части баганского лесса. Снижение начинается приблизительно от выделенного нами пика № 1 (см. рис. 4). Этот интервал лесса сформировался, по-видимому, в наиболее сухих условиях.

В баганском лессе на глубине 1,3–1,5 м отмечается первый пик резкого увеличения значений Mg/Sr и Mg/Ca с последующим их постепенным уменьшением (см. рис. 4). По расчетам его возраст составляет приблизительно 14845 лет, а продолжительность всего события примерно 664 года. Он слабо фиксируется в распределении значений магнитной восприимчивости (см. рис. 5). В основании ельцовского лесса выделяется менее заметный пик (№ 2) на глубине 2,65–2,75 м (примерный возраст 23426 лет, продолжительность 574 года). В записи магнитной восприимчивости пик № 2 отражен слабо (см. рис. 5). В тулинском лессе – три отчетливых пика аналогичного строения (см. рис. 4), пик № 3 и № 4 хорошо маркируются и элементными отношениями, и магнитной восприимчивостью: № 3 – на глубине 3,85–4,0 м, возраст 61841 л. н., продолжительность 819 лет, № 4 – 4,5–4,7 м, 65663, 1092 соответственно, № 5 – 5,0–5,2 м, 68666, 1092 соответственно.

Возрасты и продолжительность выделенных пиков относительные. Динамика изменения элементных отношений в них по длительности и предположительно возрасту может совпадать с короткопериодическими климатическими осцилляциями

Дансгора – Эшгера [10, 13]. Так, пик № 1 может отождествляться с событием DO-1 (14692±93 тыс. л. н.), пик № 2 – DO-2 (23340±298 тыс. л. н.), пик № 3 – DO-17 (59440±1287 тыс. л. н.), пик № 4 – DO-18 (64095 тыс. л. н. В пике № 5 неочевидно соответствие выделенным событиям DO [13], однако он может быть соотнесен с пиком небольшого потепления на кислородной кривой ледового ядра NGRIP в начале стадии МИС-4 (см. рис. 4). Кроме того, в записи магнитной восприимчивости (см. рис. 5), измеренной с более высоким разрешением, пик № 5 не фиксируется. Можно предположить, что на кривых распределения элементных отношений он имеет отношение к некоторому более древнему событию увлажнения, при котором была сформирована выделенная в разрезе 2018 г. последняя палеопочва бердского педокомплекса (см. рис. 5). События от DO-3 до DO-15 выделены в интервале 27–56 тыс. л. н. [13], что на юге Западной Сибири совпадает со временем образования отложений искимитского педокомплекса. Событие DO-16 по времени его проявления попадает на верхнюю часть тулинского лесса, затронутую процессами почвообразования. Лессовое накопление на изученной территории не было непрерывным, и некоторые отложения были подвержены эрозии (верхняя искимитская почва в разрезе отсутствует), следовательно, некоторые климатические осцилляции не отразились в разрезе. Наличие мощных палеопочв в разрезе указывает на длительные периоды очень медленного осадконакопления.

В настоящей статье изученные слои ЛПП разреза Ложок впервые соотнесены с записью глобальных климатических изменений Северного полушария – изотопно-кислородной кривой льдов Гренландии NGRIP (см. рис. 4, 5) [14]. Показано, что горизонты палеопочв формировались в периоды потеплений, а лессовые горизонты соответствуют периодам холодных стадиялов и похолоданий. Ранее уже было показано соответствие ЛПП Западной Сибири морским изотопным стадиями океанических осадков [2].

Выделенные внутри лессовых горизонтов короткие эпизоды потепления также отражаются в климатических осцилляциях NGRIP последнего ледникового периода (МИС-4, МИС-3, МИС-2). На рис. 4 и 5 на кривой NGRIP отмечены возрасты формирования изученных горизонтов; оценка возраста палеопочв бердского педокомплекса проводилась в соответствии с установленными возрастными соотношениями суходожского и каменноложского педокомплексов в разрезе Куртак [12].

Выводы

В результате проведенных комплексных детальных исследований лессовых отложений разреза Ложок показано, что и магнитная восприимчивость, и элементные отношения хорошо реагируют на изменения палеогеографических условий среды, сопро-



вождавших процессы осадконакопления в позднем плейстоцене на территории Новосибирского Приобья. Их изменения не только отражают этапы лессового накопления и периоды почвообразования (смену стадияла на интерстадиал), но также позволяют устанавливать короткие климатические осцилляции внутри лессов. Оба индикатора в большей степени реагируют на количество осадков. Можно сказать, что элементные отношения являются более чувствительными индикаторами палеоосадков, чем магнитная восприимчивость. Разрез Ложок дает хорошую основу для палеоклиматических реконструкций в позднем плейстоцене Новосибирского Приобья.

На основе полученных результатов по элементному составу и данных изменения магнитной восприимчивости показано, что климат холодных эпох последних 70 тыс. лет постепенно становился суше и холоднее. Лессонакопление в течение МИС-2 и МИС-4 происходило в условиях повышения активности среды, отмечается усиление криоаридных обстановок от начала каждой эпохи к ее завершению. На это также указывает увеличение гранулометрического отношения U-ratio, свидетельствующего об интенсивности ветрового потока. Внутри каждой эпохи лессообразования отмечаются короткопериодические климатические колебания, выраженные в резком небольшом увлажнении с последующим постепенным иссушением. Наличие обнаруженных климатических колебаний внутри периодов лессонакопления указывает на то, что климат холодных эпох не был стабильным. Эти свидетельства быстрых непродолжительных изменений в записи магнитной восприимчивости и элементных отношений в лессах могут быть интерпретированы как некоторое отражение событий Дансгора – Эшгера. Многоиндикаторный подход приводит к выделению большего количества осцилляций, чем одноиндикаторный. Изменение климата к более ветреному может выражаться в записи гранулометрического состава, а увеличение количества осадков – в элементных отношениях или записи магнитной восприимчивости.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 18-45-543007 р_мол_а, государственного задания Института геологии и минералогии СО РАН и гранта РФФИ № 19-05-00513.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алексеев А. О., Алексеева Т. В.** Оксидогенез железа в почвах степной зоны. – М.: Изд-во ГЕОС, 2012. – 204 с.
2. **Зыкина В. С., Зыкин В. С.** Лессово-почвенная последовательность и эволюция природной среды и климата Западной Сибири в плейстоцене. – Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2012. – 477 с.
3. **Зыкина В. С., Волков И. А., Дергачева М. И.** Верхнечетвертичные отложения и ископаемые почвы Новосибирского Приобья. – М.: Наука. – 1981. – 204 с.
4. **Зыкин В. С., Зыкина В. С., Орлова Л. А.** Реконструкция изменений природной среды и климата позднего плейстоцена на юге Западной Сибири по отложениям котловины озера Аксор // Археология, этнография и антропология Евразии. – 2002. – № 4. – С. 2–16.
5. **Матасова Г. Г., Казанский А. Ю., Зыкина В. С.** Наложение «аляскинской» и «китайской» моделей записи палеоклимата в магнитных свойствах отложений верхнего и среднего плейстоцена на юге Западной Сибири // Геология и геофизика. – 2003. – № 44 (7). – С. 638–651.
6. **Перельман А. И.** Геохимия эпигенетических процессов (зона гипергенеза). – М.: Недра, 1965. – 272 с.
7. **Сизикова А. О., Зыкина В. С.** Морфоскопия песчаных кварцевых зерен и микростроение верхнеплейстоценовых лессов юга Западной Сибири, разрез Ложок // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2014. – № 1 (170). – С. 41–50.
8. **Pedo-chemical climate proxies in Late Pleistocene Serbian – Ukrainian loess sequences / M. P. Bokhorst, C. J. Beets, S. B. Markovic et al. // Quaternary International. – 2009. – Vol. 198. – P. 113–123.**
9. **Chemical weathering of the loess deposits in the low Changjiang Valley, China, and paleoclimatic implications / S. Y. Yang, C. X. Li, D. Y. Yang, X. S. Li // Quaternary International. – 2004. – Vol. 117. – P. 27–34.**
10. **Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record / W. Dansgaard, S. J. Johnsen, H. B. Clausen et al. // Nature. – 1993. – Vol. 364 (6434). – P. 218–220.**
11. **Geochemical characterization and origin of Southern and Eastern European loesses (Serbia, Romania, Ukraine) / B. Buggle, B. Glaser, L. Zoller, et al. // Quaternary Science Reviews. – 2008. – Vol. 27 (9–10). – P. 1058–1075.**
12. **Luminescence chronology of the Upper Pleistocene loess record at Kurtak in Middle Siberia / A. Zander, M. Frechen, V. Zykina, W. Boenigk // Quaternary Science Review. – 2003. – Vol. 22. – P. 999–1010.**
13. **Millennial-scale variability during the last glacial: The ice core record / E. W. Wolf, J. Chappellaz, T. Blunier, et al. // Quaternary Science Reviews. – 2010. – Vol. 29. – P. 2828–2838.**
14. **North Greenland Ice Core Project members.** High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period / K. K. Andersen, N. Azuma, J.-M. Barnola, et al. // Nature. – 2004. – Vol. 431. – P. 147–151.
15. **Porter S. C., Zhisheng A.** Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation // Nature. – 1995. – Vol. 375. – P. 305–308.
16. **Quaternary Climate Record Based on Grain Size Analysis from the Luochuan Loess Section on the Central Loess Plateau, China / G. Nugteren, J. Vanden**



berghe, J. Van Huissteden, A. A. Zhizheng // *Global and Planetary Change*. – 2004. – Vol. 41. – P. 167–183.

17. Rock magnetic properties and palaeoclimate of Chinese Loess / X. M. Liu, J. Shaw, T. S. Liu, et al. // *J. Geomag. Geoelectr.* – 1993 – Vol. 45. – P. 117–124.

18. Sizikova A. O., Zykina V. S. The dynamics of the Late Pleistocene loess formation, Lozhok section, Ob loess Plateau, SW Siberia // *Quaternary International*. – 2015. – Vol. 365. – P. 4–14.

19. Vandenberghe J. Paleoenvironment and Stratigraphy During Last Glacial in the Belgian-Dutch Border Region // *Quaternary Research*. – 1985. – Vol. 24. – P. 23–38.

20. Westgate J. A., Stemper B. A., Pewe T. L. A 3 m. y. record of Pliocene – Pleistocene loess in interior Alaska // *Geology*. – 1990. – Vol. 18 (9). – P. 858–861.

21. Zykin V. S., Zykina V. S. The Middle and Late Pleistocene loess-soil record in the Iskitim area of Novosibirsk Priobie, south-eastern West Siberia // *Quaternary International*. – 2015. – Vol. 365. – P. 15–25.

REFERENCES

1. Alekseev A.O., Alekseeva T.V. *Oksidogenez zheleza v pochvakh stepnoy zony* [Iron oxidogenesis in the soils of the steppe zone]. Moscow, GEOS Publ., 2012. 204 p. (In Russ.).

2. Zykina V.S., Zykin V.S. *Lessovo-pochvennaya posledovatel'nost' i evolyutsiya prirodnoy sredy i klimata Zapadnoy Sibiri v pleystotsene* [Loessial-soil sequence and evolution of the natural environment and climate of West Siberia in Pleistocene]. Novosibirsk, Geo Acad. Publ., 2012. 477 p. (In Russ.).

3. Zykina V.S., Volkov I.A., Dregacheva M.I. *Verkhnechetvertichnye otlozheniya i iskopaemye pochvy Novosibirskogo Priob'ya* [Upper Quaternary sediments and fossil soils of Novosibirsk Ob]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 204 p. (In Russ.).

4. Zykin V.S., Zykina V.S., Orlova L.A. [Reconstruction of changes in the natural environment and climate of the Late Pleistocene in the south of West Siberia based on the deposits of the Axor Lake Basin]. *Arkhheologiya, etnografiya i antropologiya Evrazii – Archeology, Ethnography and Anthropology of Eurasia*, 2002, no. 4, pp. 2–16. (In Russ.).

5. Matasova G.G., Kazanskiy A. Yu., Zykina V.S. 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*, 2003, vol. 44, no. 7, pp. 638–651.

6. Perelman A.I. *Geokhimiya epigeneticheskikh protsessov (zona gipergeneza)* [Geochemistry of epigenetic processes (hypergenesis zone)]. M., Nedra Publ., 1965. 272 p. (In Russ.).

7. Sizikova A.O., Zykina V.S. [Sand quartz grain morphoscopy and microstructure of Late Pleistocene loesses of the South of Western Siberia, Lozhok sec-

tion]. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri – Geology and mineral resources of Siberia*, 2014, no. 1(17), pp. 41–50. (In Russ.).

8. Bokhorst M.P., Beets C.J., Markovic S.B., et al. Pedo-chemical climate proxies in Late Pleistocene Serbian – Ukrainian loess sequences. *Quaternary International*, 2009, vol. 198, pp. 113–123.

9. Yang S.Y., Li C.X., Yang D.Y., Li X.S. Chemical weathering of the loess deposits in the loess Changjiang Valley, China, and paleoclimatic implications. *Quaternary International*, 2004, vol. 117, pp. 27–34.

10. Dansgaard W., Johnsen S.J., Clausen H.B., et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 1993, vol. 364 (6434), pp. 218–220.

11. Buggle B., Glaser B., Zoller L., et al. Geochemical characterization and origin of Southern and Eastern European loesses (Serbia, Romania, Ukraine). *Quaternary Science Reviews*, 2008, vol. 27 (9–10), pp. 1058–1075.

12. Zander A., Frechen M., Zykina V., Boenigk W. Luminescence chronology of the Upper Pleistocene loess record at Kurtak in Middle Siberia. *Quaternary Science Review*, 2003, vol. 22, pp. 999–1010.

13. Millennial-scale variability during the last glacial: The ice core record / E. W. Wolf, J. Chappellaz, T. Blunier et al. // *Quaternary Science Reviews*, 2010, vol. 29., pp. 2828–2838.

14. Andersen K.K., Azuma N., Barnola J.-M., et al. North Greenland Ice Core Project members. High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature*, 2004, vol. 431, pp. 147–151.

15. Porter S.C., Zhisheng A. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation. *Nature*, 1995, vol. 375, pp. 305–308.

16. Nugteren G., Vandenberghe J., Van Huissteden J., Zhizheng A.A. Quaternary Climate Record Based on Grain Size Analysis from the Luochuan Loess Section on the Central Loess Plateau, China. *Global and Planetary Change*, 2004, vol. 41, pp. 167–183.

17. Liu X.M., Shaw J., Liu T.S., et al. Rock magnetic properties and palaeoclimate of Chinese Loess. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1993, vol. 45, pp. 117–124.

18. Sizikova A.O., Zykina V.S. The dynamics of the Late Pleistocene loess formation, Lozhok section, Ob loess Plateau, SW Siberia. *Quaternary International*, 2015, vol. 365, pp. 4–14.

19. Vandenberghe J. Paleoenvironment and Stratigraphy During Last Glacial in the Belgian-Dutch Border Region. *Quaternary Research*, 1985, vol. 24, pp. 23–38.

20. Westgate J.A., Stemper B.A., Pewe T.L. A 3 m. y. record of Pliocene-Pleistocene loess in interior Alaska. *Geology*, 1990, vol. 18 (9), pp. 858–861.

21. Zykin V.S., Zykina V.S. The Middle and Late Pleistocene loess-soil record in the Iskitim area of Novosibirsk Priobie, south-eastern West Siberia. *Quaternary International*, 2015, vol. 365, pp. 15–25.

© A. O. Вольвах, Н. Е. Вольвах, Л. Г. Смолянинова, 2019