

УДК 551.89

## ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ДАТИРОВАНИЯ ЛЁССОВО-ПОЧВЕННЫХ СЕРИЙ ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ (ОПОРНЫЙ РАЗРЕЗ ЛОЖОК)

© 2021 г. Н. Е. Вольвах<sup>a, \*</sup>, Р. Н. Курбанов<sup>b, c, \*\*</sup>, А. О. Вольвах<sup>a, \*\*\*</sup>, В. С. Зыкина<sup>a</sup>,  
Д. Е. Хашцевская<sup>b</sup>, Я.-П. Булард<sup>d</sup>, Э. С. Мюррей<sup>e</sup>

<sup>a</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева, Новосибирск, Россия

<sup>b</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

<sup>c</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

<sup>d</sup>Технический университет Дании, Роскилле, Дания

<sup>e</sup>Орхусский университет, факультет наук о Земле, Орхус, Дания

\*e-mail: volvakh@igm.nsc.ru

\*\*e-mail: roger.kurbanov@igras.ru

\*\*\*e-mail: sizikova@igm.nsc.ru

Поступила в редакцию 07.01.2020 г.

После доработки 13.12.2020 г.

Принята к публикации 22.12.2020 г.

В статье представлены первые результаты датирования верхне- и среднеплейстоценовых лёссово-почвенных серий Западной Сибири методом оптически-стимулированной люминесценции (ОСЛ). В опорном разрезе Ложок выделено восемь горизонтов, отражающих основные этапы развития природной среды региона, среди которых три палеопочвы, ранее соотносившиеся в хроностратиграфической схеме Западной Сибири с этапами потеплений МИС 3 и МИС 5. Получена хронология по 15 новым ОСЛ-датам. Датирование выполнено по современной методике с анализом накопленной дозы и возраста по трем сигналам (ОСЛ, IRSL<sub>50</sub>, pIRIR<sub>290</sub>). Высокая сходимость результатов измерений по протоколам pIRIR<sub>290</sub>/Q и IR<sub>50</sub>/Q указывает на достаточную засветку зерен полевого шпата и кварца. В соответствии с принятыми в люминесцентном датировании стандартами, полученная серия дат является достоверной, а итоговая хронология – надежной. По результатам датирования определен возраст формирования всех стратиграфических горизонтов. Анализ лёссово-почвенной последовательности верхнего плейстоцена, основанный на люминесцентной хронологии разреза Ложок, показал несовпадение с лёссово-почвенной последовательностью, разработанной на основе детального изучения и прослеживания горизонтов ископаемых почв и лёссов в наиболее полных субэаральных разрезах Западной Сибири. В разрезе выделяется наличие эрозионной границы, продолжительность перерыва в осадконакоплении составила около 95 тыс. лет. Верхний педокомплекс охарактеризован возрастом 123 ± 11 тыс. лет и соответствует МИС 5, а нижний имеет возраст 196–216 тыс. лет и соотносится нами с МИС 7. Анализ условий осадконакопления указывает на резкое увеличение скоростей накопления лёссов в МИС 2, а различие в содержании радионуклидов <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th и <sup>40</sup>K отражает смену в источнике материала и возможную перестройку региональной розы ветров. Авторы считают, что полученные результаты на данном этапе имеют дискуссионный характер и требуют дополнительных исследований.

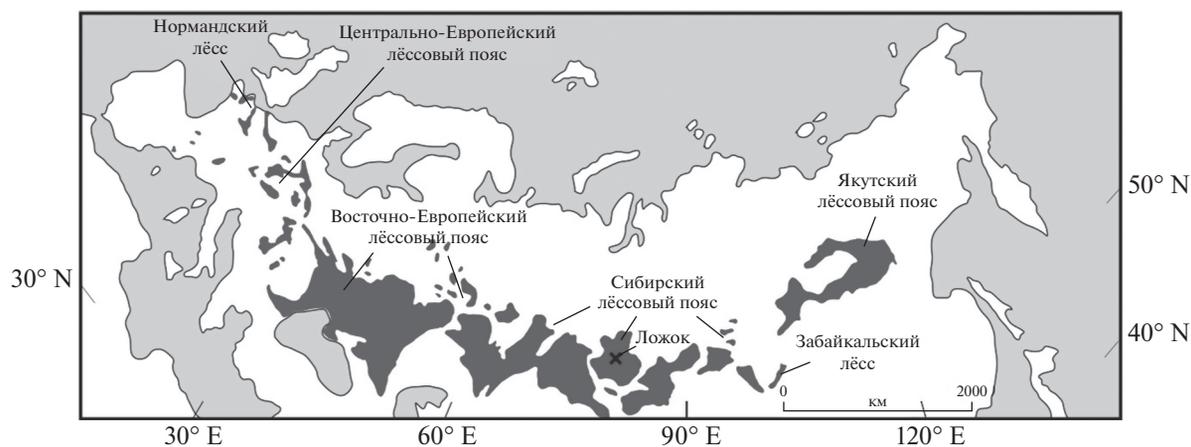
*Ключевые слова:* лёсс, лёссово-почвенная последовательность, поздний плейстоцен, Западная Сибирь, стратиграфия, ОСЛ-датирование, кварц, полевой шпат, палеопочвы, стратиграфия четвертичного периода

**DOI:** 10.31857/S2587556621020151

### ВВЕДЕНИЕ

Лёссово-почвенная последовательность (ЛПП) плейстоцена Западной Сибири является важным палеоклиматическим архивом, в котором наиболее детально отражены глобальные и региональные изменения палеосреды (Зыкина, Зыкин,

2012). Лёссы Западной Сибири имеют широкое распространение и являются частью Сибирского (Российского) лёссового пояса (рис. 1), входящего в состав Евразийского лёссового пояса (Muhs, 2007). Лёссово-почвенные отложения плейстоцена юга Западной Сибири накапливались в условиях внеледниковой зоны: горизонты лёссов



**Рис. 1.** Распространение лёссовых отложений в Северной Евразии ((Muhs, 2007) с изменениями) и расположение изученного разреза Ложок.

формировались в криоаридных условиях (Сизикова, Зыкина, 2014; Sizikova, Zykina, 2015) в течение стадиялов, а палеопочвы педокомплексов — во время интерстадиялов и межледниковий (Зыкина, Зыкин, 2012).

Отложения лёссово-почвенной формации рассматриваемого региона в разные годы всесторонне изучались различными исследователями. Однако большим пробелом в стратиграфии Западной Сибири является отсутствие надежной абсолютной хронологии для лёссово-почвенной последовательности плейстоцена. В последние десятилетия по всему миру проводится массовое датирование ключевых лёссовых разрезов методами люминесцентного датирования, являющимися признанными и наиболее подходящими для данного типа отложений (Buylaert et al., 2012). В настоящее время получены обширные серии люминесцентных датировок для ряда разрезов лёссово-почвенных отложений китайского Лёссового плато (Buylaert et al., 2015; Stevens et al., 2018), Средней Азии (Frechen, Dodonov, 1998; Youn et al., 2014), бассейна Дуная (Novothy et al., 2011), Ирана (Lauer et al., 2017), которые стали основой для детальных региональных хроностратиграфических схем позднего плейстоцена. Получение данных люминесцентного датирования для лёссовых отложений юга Западной Сибири позволит более обоснованно проводить палеогеографические реконструкции и корреляции с сопредельными регионами.

Стратиграфическое расчленение и палеогеографические реконструкции лёссово-почвенных серий юга Западной Сибири основывались на комплексных исследованиях с применением палеопедологического, седиментологического, геоморфологического, радиоуглеродного, микробиологического и палеомагнитного методов (Зыкина и др., 1981; Зыкина, Зыкин, 2012). Учитывая

ограниченность возрастного интервала датирования радиоуглеродным методом (45–50 тыс. лет (Вагнер, 2006)), достоверно может быть получен возраст только для верхней искитимской почвы каргинского времени (МИС 3), а возраст нижележащих лёссов и палеопочв остается не охарактеризованным.

Существенным преимуществом радиометрических методов (в первую очередь метода оптически-стимулированной люминесценции, ОСЛ) является большой возрастной диапазон — до 500 тыс. лет для аллювиальных отложений и около 200 тыс. лет при изучении лёссовидных пород. Кроме того, люминесцентное датирование не ограничено по материалу, не требуется наличие в отложениях органического материала, измерения выполняются по имеющимся почти в любой породе кварцу и полевым шпатам (Панин, 2014). Для оценки абсолютного возраста лёссово-почвенных отложений докаргинского времени ранее использовалась корреляция маркеров — педокомплексов (МИС 5 и МИС 3) по трансекту от ЛПП Западной Сибири с аналогичными горизонтами ЛПП Средней Сибири (Зыкина, Зыкин, 2012), геохронологическая характеристика которой базируется на детально продатированном ТЛ и ОСЛ-методами разрезе Куртак (Frechen et al., 2005; Zander et al., 2003). Несмотря на сходное строение ЛПП Западной и Средней Сибири, достаточно большая удаленность разреза Куртак от Новосибирского Приобья (порядка 600 км) предполагает использование этих датировок применительно к ЛПП Западной Сибири с осторожностью.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для первого детального датирования лёссово-почвенной формации Западной Сибири выбран разрез Ложок, являющийся одним из наиболее стратиграфически полных ключевых разрезов ЛПП Приобского лёссового плато. Он расположен на территории Новосибирского Приобья, на междуречье рр. Шипунихи и Койнихи, являющихся притоками р. Бердь, впадающей в р. Обь. Разрез расположен на склоне одного из северных увалов Приобского лёссового плато, представляющего собой серию возвышенных вытянутых увалов, ориентированных с юго-запада на северо-восток, расчлененных между собой речными долинами. Плато граничит с Предалтайской равниной на юге, а на севере простирается к району Новосибирска.

Разрез вскрыт в бывшем, ныне задернованном, карьере, в 1.5 км на запад от железнодорожной станции Ложок (54°34'02.5" N, 83°18'31.9" E). Разрез выделен в качестве стратотипического для лёссово-почвенной формации верхнего плейстоцена Новосибирского Приобья (Зыкина и др., 1981; Зыкина, Зыкин, 2012). Ранее для разреза Ложок проводились геоморфологические, стратиграфические и палеопедологические исследования (Волков 1973, 1971; Зыкина и др., 1981), изучение его гранулометрических, геохимических, микроморфологических (Сизикова, Зыкина, 2013, 2014; Sizikova, Zykina, 2015) и петромагнитных (Вольвах и др., 2019; Kravchinsky et al., 2008) характеристик и морфологии кварцевых зерен (Sizikova, Zykina, 2015). Были сделаны первые попытки установить наличие в лёссовой записи разреза короткопериодических климатических осцилляций (Вольвах и др., 2019; Sizikova, Zykina, 2015).

В стратиграфической схеме лёссово-почвенной последовательности юга Западной Сибири (рис. 2) в верхнем плейстоцене выделяются (Зыкина, Зыкин, 2012): баганский лёсс (МИС 2), суминская интерстадиальная палеопочва (МИС 2), ельцовский лёсс (МИС 2), представленный двумя палеопочвами каргинского времени искитимский педокомплекс (МИС 3), тулинский лёсс (МИС 4) и бердский педокомплекс, состоящий из верхней (МИС 5-с) и нижней (МИС 5-е, казанцевское межледниковье) палеопочв. Все стратиграфические горизонты схемы скоррелированы со стадиями изотопно-кислородной шкалы океанических осадков (Bassinot et al., 1994) и другими глобальными климатическими записями (Зыкина, Зыкин, 2012).

Оценка возраста отложений изученного разреза ранее проводилась на основе серии радиоуглеродных дат (табл. 1), полученных для расположенных в этом районе разрезов Мраморный и Ложок. Так, для периода формирования нижней иски-

тимской палеопочвы в Искитимском районе характерны возрасты в интервале 33–38 тыс. кал. л. н., а для верхней – 26–30 тыс. кал. л. н. Из слоя 5 расчистки 2018 г., получена новая <sup>14</sup>C дата 24269 ± 1092 кал. л. н. (СОАН-9703), которая является явно омоложенной по сравнению с имеющимися <sup>14</sup>C датами и не соответствует стратиграфическому расчленению разреза. Небольшая глубина залегания горизонта (2.85–3.1 м) предполагает доступность образца для заражения корнями современных растений. По этим причинам указанная дата считается нами невалидной. Кроме того, сильно омоложенными могут быть, на наш взгляд, представленные в табл. 1 даты из нижней искитимской палеопочвы в разрезе Ложок. Особенностью радиоуглеродного датирования почв является высокая вероятность заражения образцов современным радиоуглеродом, так как почвы являются продуктом непрерывного накопления и разложения почвенного органического вещества и, таким образом, не соответствуют основному критерию “замкнутости системы” для точного радиоуглеродного датирования (Панычев, 1979; Чичагова, 1985; Scharpenseel, 1976; Wang et al., 1996). Даже заражение 1% современным органическим веществом приводит к сильному омоложению, что даже по заведомо древним образцам получаются даты в диапазоне метода (Панычев, 1979; Чичагова, 1985). Таким образом, потенциально омоложенными могут быть все радиоуглеродные даты, полученные по почвам, и их интерпретация требует осторожности.

Детальное послойное описание разреза было неоднократно опубликовано ранее (Зыкина и др., 1981; Сизикова, Зыкина, 2014; Sizikova, Zykina, 2015; и др.). Генетические горизонты ископаемых почв индексированы согласно используемой сейчас в России классификации почв (Классификация..., 2004). В разрезе Ложок сверху вниз выделены следующие стратиграфические подразделения (см. рис. 2):

– *S0* (0–0.9 м) – профиль современной почвы – чернозём выщелоченный (0–0.9 м) состоит из темного гумусового *AU* (0–0.25 м), глинисто-иллювиального *B1* (0.25–0.55 м) и аккумулятивно-карбонатного *BCA* (0.55–0.9 м) горизонтов.

– *L1* (0.9–1.9 м) – лёссовидный суглинок светло-коричневато-серый, плотный, пористый, карбонатный. Сопоставляется с баганским лёссом ЛПП Западной Сибири (*bg*; МИС 2).

– *L2* (1.9–2.7 м) – лёссовидный суглинок слабо опесчаненный светло-серовато-коричневый, плотный, пористый, карбонатный, с редким *Mn* крапом. Сопоставляется с ельцовским лёссом ЛПП Западной Сибири (*el*; МИС 2).

– *EG* (2.7–2.85 м) – оглеенный серый суглинок, опесчаненный, рассеченный мелкими мерзлотными клиньями, по верхней границе отмечен

№ слоя	Стратиграфические подразделения разреза Ложок по Зыкина и др. 1981, и др.				Геологическое строение разреза	Стратиграфические подразделения разреза Ложок по результатам ОСЛ датирования данного исследования								
	МИС	Слой лёссово-почвенной формации Западная Сибирь	Русская равнина	Ледниковый/ межледниковый горизонт Западной Сибири		Возраст, т.лн.	МИС	Слой лёссово-почвенной формации Западная Сибирь	Русская равнина	Ледниковый/ межледниковый горизонт Западной Сибири				
1	1	Современная почва	Голоценовая почва			1	Современная почва	Голоценовая почва		7.6 ± 0.8	1	Современная почва	Голоценовая почва	
2	2	Баганский лёсс (L1-2)	Алтыновский лёсс	Сарганский		2	Баганский лёсс (L1-2)	Алтыновский лёсс	Сарганский	16.2 ± 1.0	2	Баганский лёсс (L1-2)	Алтыновский лёсс	Сарганский
3	3	Ельцовский лёсс (L1-1)	Деснинский лёсс				Ельцовский лёсс (L1-1)	Деснинский лёсс		17.6 ± 1.6		Ельцовский лёсс (L1-1)	Деснинский лёсс	
4	4	Искитимская почва (PC1-1)	Брянская почва	Каргинский		3	Искитимская почва (PC1-1)	Брянская почва	Каргинский	29.1 ± 1.6	5	Бердский педокомплекс (PC2-1)	Мезинская почва	Казанцевский
5	5					4				115 ± 11				
6	6	Тулинский лёсс (L2)	Хотылевский лёсс	Ермаковский		5	Тулинский лёсс (L2)	Хотылевский лёсс	Ермаковский	146 ± 11	6	Сузунский лёсс (L3)	Московский лёсс	Тазовский
7	7c 7d					6				164 ± 9.9 166 ± 10	7a 7b	Койнихинский педокомплекс (PC3)	Роменская почва	
8	8	Сузунский лёсс (L3)	Московский лёсс	Тазовский		7	Сузунский лёсс (L3)	Московский лёсс	Тазовский	159 ± 8.5 170 ± 11 183 ± 15	8	Чулымский лёсс (L4)	Днепровский лёсс	
						8	Бердский педокомплекс (PC2)	Мезинский педокомплекс	Казанцевский	182 ± 12	7e	Койнихинский педокомплекс (PC3)	Роменская почва	
						9				203 ± 16				

Рис. 2. Стратиграфические подразделения лёссово-почвенной последовательности разреза Ложок. Составлено с использованием стратиграфической схемы Западной Сибири, лёссово-почвенной последовательности Западной Сибири (Зыкина, Зыкин, 2012) и корреляции ЛПП Западной Сибири с ЛПП Русской равнины (Зыкина, Зыкин, 2012). Условные обозначения: 1 – лёссовидный суглинок, 2 – гумусовый горизонт палеопочвы, 3 – песок, 4 – кротовины, 5 – карбонатность, 6 – железистые новообразования, 7 – оглеение, 8 – марганцовистый крап, 9 – клинья.

**Таблица 1.** Радиоуглеродные даты из лёссово-почвенных разрезов Мраморный и Ложок Новосибирского Приобья

Радиоуглеродных л. н.	Калиброванных л. н.	Лаб. номер	Слой	Разрез	Примечание	Источник
19400 ± 800	23212 ± 959	СОАН-164	el	Ложок	Линза гумусированного алевролита в основании ельцовского лёсса	(Волков, 1973)
21700 ± 900	25982 ± 1061	СОАН-12	el	Ложок	Линза гумусированного алевролита в основании ельцовского лёсса	(Волков, 1973)
26300 ± 700	30837 ± 501	ИГАН-167	is <sub>2</sub>	Мраморный	Погребенная почва, гуминовые кислоты	(Зыкина и др., 1981)
20145 ± 440	24269 ± 1092	СОАН-9703	is <sub>1</sub>	Ложок	Погребенная почва, гуминовые кислоты	Данное исследование
29000 ± 450	33676 ± 1061	ИГАН-168	is <sub>1</sub>	Мраморный	Погребенная почва, гуминовые кислоты	(Зыкина и др., 1981)
30000 ± 1000	34358 ± 1066	ИГАН-169	is <sub>1</sub>	Ложок	Погребенная почва, гуминовые кислоты	(Зыкина и др., 1981)
33100 ± 1600	38026 ± 1740	СОАН-165	is <sub>1</sub>	Мраморный	Уголь из гумусового горизонта погребенной почвы	(Зыкина и др., 1981)
32780 ± 670	37407 ± 714	СОАН-629	над is <sub>1</sub>	Мраморный	По костям носорога шерстистого, лежащим на погребенной почве	(Зыкина и др., 1981)

*Примечание.* Перевод радиоуглеродных дат в календарные даты производился с использованием программы Radiocarbon calibration program rev 6.0.1. Индексы горизонтов: el – ельцовский лёсс, is<sub>1</sub> – нижняя искитимская почва, is<sub>2</sub> – верхняя искитимская почва.

прослой из суглинка опесчаненного с включениями большого количества мелкой гальки, гравия и дресвы.

– *PC1* (2.85–3.4 м) – чернозём слаборазвитый, состоящий из темногумусового горизонта АУ (2.85–3.1 м) и аккумулятивно-карбонатного горизонта ВСА (3.1–3.4 м). Сопоставляется с нижней почвой искитимского педокомплекса (is<sub>1</sub>; МИС 3).

– *L3* (3.4–6.1 м) – лёссовидный суглинок слабо опесчаненный светло-серовато-коричневый, плотный, пористый, карбонатный, ожелезнение, Mn крап, оглеение. Сопоставляется с тулинским лёссом (tl; МИС 4).

– *PC2* (6.35–8.4 м) – представлен в разрезе двумя ископаемыми почвами – чернозёмами. Верхняя почва (6.35–6.75 м) – *PC2-2* – состоит из темногумусового АУ (6.35–6.5 м) и аккумулятивно-карбонатного ВСА (6.5–6.75 м) горизонтов. Сопоставляется с верхней почвой бердского педокомплекса (br<sub>2</sub>; МИС 5-с). Нижняя палеопочва – *PC2-1* (6.9–8.4 м), представленная темногумусовым АУ (6.9–7.5 м) и глинисто-иллювиальным В1 (7.5–8.4 м) горизонтами, сопоставляется с нижней почвой бердского педокомплекса (br<sub>1</sub>), сформировавшейся во время казанцевского межледниковья (МИС 5-е).

– *L4* (8.4–9.0 м) – лёссовидный суглинок светло-коричневый, плотный, пористый, карбонат-

ный, Mn крап, пятна оглеения. Соответствует сузунскому лёссу (sz; МИС 6).

В расчистке разреза 2018 г., описанной А.О. Вольвах (см. рис. 2), в слое L3 (на глубине 6.2–6.4 м) отмечен слабогумусированный прослой, неравномерно окрашенный от светло-коричневого до коричневого, но заметно темнее выше- и нижележащих лёссовидных суглинков. Он представлен отдельными слабо гумусированными линзами и пятнами, представленными суглинком плотным, карбонатным, пористым, с мелкими угольками, сконцентрированными на одном уровне по простиранию разреза. По нижней границе слоя отмечаются редкие пятна ожелезнения по корнеходам и карбонатный псевдомицелий. Прослой хорошо прослеживается как по фронтальной, так и по боковым стенкам. Его мощность варьирует от 5 до 15 см, в южном направлении канавы слой выклинивается через 2.5 м. По мнению В.С. Зыкиной, прослой не является продуктом инситу почвообразования и не выделялся ранее при хорошей сохранности стенок карьера. Незначительная протяженность линзы, ее цвет, отсутствие в ней оструктуренности исключают наличие горизонта В. Микростроение по образцам 2018 г. характерно для горизонта лёсса, разделяющего искитимский и бердский педокомплексы. А.О. Вольвах этот прослой характеризует как лёссовидный суглинок, преобразованный непродолжительными процессами

инициального почвообразования в некотором локальном углублении палеорельефа. При анализе карбонатности, магнитной восприимчивости, элементных соотношений (Ba/Sr, Sr/Ca, Mg/Sr, Ca/Mg), геохимических индексов выветривания и других параметров образцы из этого прослоя имеют сходные значения скорее с нижележащими почвами и резко отличаются от вышележащего лёсса. В этом месте в разрезе отмечается повышение увлажненности в момент осадконакопления (Вольвах и др., 2019). К сожалению, в данной работе не представляется возможным предоставить все аналитические материалы, по этим данным планируется специальная публикация. Признаков размыва или солифлюкционно-мерзлотного перемещения прослоя не отмечается.

Имеющихся данных абсолютной геохронологии недостаточно для достоверного определения возраста отдельных горизонтов в разрезе Ложок. Необходимость разработки детальной геохронологической схемы определяется значением разреза как типового для бердского педокомплекса юга Западной Сибири, значительным объемом имеющихся по разрезу палеопедологических, литологических и палеогеографических данных. Для выполнения этой задачи нами выполнена зачистка разреза, детальное послойное описание, отбор серии образцов для люминесцентного датирования.

#### МЕТОД ОПТИЧЕСКИ СТИМУЛИРОВАННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

ОСЛ-датирование широко применяется в геохронологических исследованиях четвертичных толщ, а лёссово-почвенные отложения являются идеальным источником материала для получения точных хронологических данных для различных палеоклиматических событий. Методология люминесцентного датирования ранее обоснована в множестве работ (Aitken, 1985; Murray, Wintle, 2000, 2003; Scharpenseel, 1976; Wintle, 1993; и др.). Датирование лёссово-почвенных отложений разреза Ложок выполнено в Северной люминесцентной лаборатории Risø Орхусского Университета (Дания). Отбор материала для измерения ОСЛ проводился в светонепроницаемые пакеты, по стандартной методике в темное время суток при исключении засвечивании образца и стенок разреза искусственным или естественным источником света. Образцы для гамма-спектрометрических измерений отбирались отдельно, непосредственно из места отбора пробы на ОСЛ. Пробоподготовка проводилась в лаборатории геологии кайнозоя, палеоклиматологии и минералогических индикаторов климата ИГМ СО РАН по протоколу, разработанному в Орхусском Университете (Дания). Образцы лёссов и почв разреза Ложок имеют механический состав, состоящий преимущественно из алеврита с небольшой примесью пес-

чаной фракции (Sizikova, Zykina, 2015). Материал для измерения ОСЛ был получен методом влажного ситования с отбором фракции тонкого песка (63–90 микрон). Проведена последовательная обработка полученной фракции в 10% растворе перекиси водорода, 10% растворе соляной кислоты и 10% плавиковой кислоте, далее выполнена сепарация кварцевых зерен и зерен полевого шпата в тяжелой жидкости (поливольфрамат калия), а также дополнительная очистка кварца в концентрированной плавиковой кислоте.

Определение эквивалентной дозы ( $D_e$ ) выполнено по современной методике на основе принципа регенерации единичных аликвот (SAR) с получением хронологических данных по трем протоколам (Murray, Wintle, 2000). Для определения абсолютного возраста отложений лёссово-почвенной последовательности разреза Ложок была отобрана серия из 15 образцов. Измерение люминесценции кварцевых зерен (Q) проводилось по 20–25 аликвотам стимуляцией голубым светом при температуре 125°C и предварительным нагреванием образца до 260°C (Murray, Wintle, 2003). Кривая насыщения строилась по пяти точкам в результате облучения бета-источником фиксированной дозой: 75, 150, 200, 0, 75 Грей. Измерение по полевым шпатам проводилось в инфракрасном свете для 6–12 аликвот (в зависимости от объема полученной навески) по протоколу, включающему два измерения в инфракрасном свете при температурах 50°C ( $IR_{50}$ ) и 290°C ( $pIRIR_{290}$ ) (Thiel et al., 2011) с построением кривой насыщения по пяти точкам: 150, 350, 800, 0, 150 Грей. Измерения проводились на оборудовании Risø TL/OSL-reader DA-20 с воздействием бета-излучения от источника  $^{90}Sr$  для построения кривой насыщения и определения эквивалентной дозы. Активность радионуклидов для определения скорости накопления дозы в образце рассчитывалась на высокоточном гамма-спектрометре с полупроводниковым детектором на основе особо чистого германия по методике, описанной в (Murray et al., 1987).

Использование при датировании трех протоколов для двух разных минералов позволяет оценить возможную недостоверность определения возраста, связанную с удревнением датировок в результате неполной засветки зерен в ходе геологического транспорта. Непродолжительная засветка зерен при осадконакоплении приводит к неполному обнулению сохраненного в зерне люминесцентного сигнала, полученного в ходе предыдущего цикла, что в свою очередь ведет к увеличению получаемого возраста (Курбанов и др., 2019). Для выявления таких ошибок был предложен метод параллельного датирования кварца и полевого шпата (Murray et al., 2012). Так как максимальный размер накопленной энергии в этих минералах

сильно различен (до 200 Грей у кварца и до 1500 Грей у полевого шпата), то полевому шпату требуется значительно большее время нахождения под воздействием солнечного света для полного обнуления. При этом люминесцентный сигнал  $pIRIR_{290}$  считается наиболее стабильным люминесцентным сигналом полевого шпата. Он требует большего времени для полного обнуления, но при этом не подвержен явлению аномального угасания, приводящего к омолаживанию образца. Таким образом, не имея возможности омоложения под действием эффекта аномального угасания,  $pIRIR_{290}$  сигнал является наиболее надежным для определения накопленной дозы в полевых шпатах (Vuylaert et al., 2012). С другой стороны, сигнал  $IR_{50}$  регистрируется из электронных ловушек, которые быстро высвобождают накопленную энергию, наименее стабильны и подвержены эффекту аномального угасания (Thomsen et al., 2008).

Датирование по кварцу, имеющему почти ментальное время засветки и не подверженному аномальному угасанию, является самым надежным, но вероятность неполной засветки всегда остается ненулевой (Курбанов и др., 2020). Сравнение результатов датирования по трем протоколам ( $Q$ ,  $pIRIR_{290}$ ,  $IR_{50}$ ) позволяет провести анализ надежности полученных результатов. Э.С. Мюррей с соавторами (Murray et al., 2012) доказали, что итоговые даты по кварцу являются надежными влестствие полной засветки, когда соотношение  $pIRIR_{290}/Q$  находится в пределах 0.9–1.2, а соотношение  $IR_{50}/Q$  – в пределах 0.5–0.7. Удревнение люминесцентного возраста нехарактерно для лёссовых отложений по причине самого механизма их формирования – переноса материала в воздушной среде, в связи с чем лёссово-почвенные серии считаются наиболее подходящими для ОСЛ-датирования. Однако нельзя исключать возможности влияния кратковременного локального привноса песчаных зерен, имеющих неполное обнуление люминесцентного сигнала, а также влияние землероев и возможный перенос материала по трещинам. По этой причине и по причине важности разреза Ложок для стратиграфии региона были выполнены более длительные и трудоемкие работы по люминесцентному датированию, включавшие в себя измерения по трем протоколам.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ДАТИРОВАНИЯ

Скорость накопления дозы рассчитана по результатам гамма-спектрометрических измерений активности образцов на (табл. 2). Для всех образцов отмечается характерное для лёссовых отложений высокое содержание  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ , одно-

родное распределение основных радионуклидов по разрезу. Так, содержание  $^{226}\text{Ra}$  находится в пределах 30–40 Бк/кг,  $^{232}\text{Th}$  – 30–40 Бк/кг,  $^{40}\text{K}$  – 500–550 Бк/кг. Резко выделяется пониженной активностью образец 186190 из слоя L4, что, по-видимому, отражает смену источника материала. Мощность дозы не меняется по разрезу, ее средние значения находятся в диапазоне 2.2–3.0 Грей/тыс. лет для кварца и 3.2–3.9 Грей/тыс. лет для полевых шпатов.

Важным критерием в оценке скорости накопления дозы является расчет уровня водонасыщения. Увеличение водонасыщения на 1% ведет к удревнению возраста в среднем также на 1%. Оценка этого параметра для изученных отложений проводилась на основе среднего размера частиц и близости нахождения грунтовых вод. Полученные ранее данные о гранулометрическом составе основных горизонтов (Sizikova, Zykina, 2015) позволили рассчитать содержание фракции глины размером  $<2$  мкм (табл. 1), в соответствии с принятыми стандартами для лёссовидных отложений. Так, для образцов с содержанием фракции  $<2$  мкм в пределах 12.5–17% принята оценка водонасыщения в 15%, для остальных – 10%.

Результаты проведенных измерений и рассчитанные эквивалентные дозы  $D_e$  представлены в табл. 3. Измерения по кварцу выполнены для 20–25 аликвот, что определяет высокую точность расчета эквивалентной дозы. Измерения для кварца выполнены по всему разрезу, однако начиная с пробы 186167 (глубина 305 см) образцы оказались в состоянии полного насыщения и достигали предела возможности метода. В изученных пяти образцах отмечается закономерное увеличение  $D_e$  с глубиной с 20 до 83 Грей. В образцах 186159 и 186160 наблюдается инверсия в величине эквивалентной дозы, связанная с различиями в мощности дозы, что с учетом доверительного интервала и незначительного расстояния в рамках геологического времени между ними находится в пределах нормы.

Для полевых шпатов основные измерения были выполнены по протоколам  $pIRIR_{290}$  и  $IR_{50}$ . Распределение эквивалентных доз имеет закономерное увеличение вниз по разрезу. Выделяются две зоны, отличные по размеру накопленной дозы. До глубины 283 см она находится в пределах 116 Грей, далее до глубины 623 см отмечается резкое увеличение доз от 441 до 611 Грей. В образце 186188  $D_e$  достигает 800 Грей, причем из восьми измеренных аликвот три показали дозы близкие к 1000 Грей, что близко к пределу по полевым шпатам. В связи с этим полученный для этого образца возраст может быть омоложен в пределах 10–15%. Отмечается наличие нескольких инверсий, которые связаны с разницей в скорости накопления дозы (особенно в образце 186188 из горизонта па-

**Таблица 2.** Результаты гамма-спектрометрического анализа. Содержание радиоактивных элементов в образце и скорость накопления дозы для кварца и полевого шпата

№	Лаб. номер	Глубина, см	Слой в разрезе	Содержание фракции глины, <2 мкм, %	WC, %	<sup>226</sup> Ra, Бк/кг	<sup>232</sup> Th, Бк/кг	<sup>40</sup> K, Бк/кг	Скорость накопления дозы	
									кварц, Грей в тыс. лет	полевые шпаты, Грей в тыс. лет
1	186151	15	S0	16.8	15	39 ± 1.4	43 ± 1.2	589 ± 23	3.0 ± 0.1	3.6 ± 0.1
2	186153	67	L1	16.5	15	27 ± 0.9	32 ± 0.9	434 ± 14	2.2 ± 0.1	2.8 ± 0.1
3	186159	173	L1	9.2	10	30 ± 0.8	38 ± 0.8	527 ± 12	2.7 ± 0.1	3.4 ± 0.1
4	186160	193	L2	9	10	29 ± 7.1	37 ± 0.6	498 ± 9	2.6 ± 0.1	3.2 ± 0.1
5	186165	283	L2	10.8	10	40 ± 1.3	42 ± 1.1	532 ± 21	2.9 ± 0.1	3.5 ± 0.1
6	186167	305	PC1	10.2	10	37 ± 0.6	42 ± 0.5	570 ± 11	2.9 ± 0.1	3.6 ± 0.1
7	186171	403	PC1	9.2	10	32 ± 0.8	40 ± 0.8	510 ± 15	2.6 ± 0.1	3.3 ± 0.1
8	186176	473	L3	10.3	10	34 ± 0.7	40 ± 0.7	534 ± 13	2.7 ± 0.1	3.4 ± 0.1
9	186178	503	L3	9.9	10	38 ± 1.4	42 ± 1.2	563 ± 24	2.9 ± 0.1	3.6 ± 0.1
10	186180	553	L3	9.4	10	35 ± 0.7	39 ± 0.6	532 ± 13	2.7 ± 0.1	3.4 ± 0.1
11	186181	583	L3	7.9	10	35 ± 0.4	41 ± 0.4	544 ± 7	2.8 ± 0.1	3.4 ± 0.1
12	186183	593	L3	13.9	15	40 ± 0.7	44 ± 0.6	557 ± 12	2.8 ± 0.1	3.4 ± 0.1
13	186185	623	PC2	12.5	15	32 ± 0.5	41 ± 0.5	514 ± 10	2.5 ± 0.1	3.2 ± 0.1
14	186188	713	PC2	13.5	15	48 ± 1.3	48 ± 1.1	594 ± 21	3.0 ± 0.1	3.7 ± 0.1
15	186190	853	L4	14.4	15	18 ± 0.7	21 ± 0.7	276 ± 10	1.4 ± 0.1	2.0 ± 0.1

Примечание: WC – водонасыщение.

леопочвы PC2) и, с учетом доверительного интервала, не несут противоречий.

Во всех первых пяти датах, для которых выполнены измерения по трем протоколам, соотношение  $pIRIR_{290}/Q$  близко к  $1.0 \pm 0.1$ , а  $IR_{50}/Q$  в пределах  $0.5-0.6 \pm 0.1$ , что указывает на достаточную длительность засветки зерен перед моментом осадконакопления, характерную для лёссовых отложений. Образцы с глубины 305 см измерены только по полевому шпату, так как кварц в них достигает насыщения. Измеренные дозы по кварцу и полевым шпатам практически идентичны, что позволяет говорить о высокой надежности полученных результатов и высокой достоверности датировок по полевым шпатам для остальных образцов. Для всех аликвот отмечается высокая стабильность сигнала.

Основные характеристики люминесценции на примере образца 186165 представлены на рис. 3. Так, кривая насыщения отвечает принятым стандартам, а  $D_e$  находится в пределах датирования (рис. 3а – для кварца; рис. 3д – для полевых шпатов). В люминесценции кварца преобладает быстрый компонент (см. рис. 3б), в то время как для полевых шпатов отмечается более длительное выделе-

ние сигнала (см. рис. 3е). Все выполненные измерения отвечают нормам SAR протокола (см. рис. 3в, 3ж).

Распределение измерений по аликвотам (см. рис. 3г, 3з), доверительные интервалы, не превышающие 10% для первых пяти образцов, данные стандартных тестов (восстановление дозы 1.02–1.05) и сходимость результатов по кварцу и полевому шпату указывают на высокую надежность результатов полученной хронологии. Ввиду высокой сходимости для анализа возраста отложений могут использоваться как данные по кварцу, так и по полевому шпату, полученные по протоколу  $pIRIR_{290}$ .

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДАТИРОВАНИЯ

В основании вскрытой расчистки из слоя L4 получена единственная дата  $302 \pm 23$  тыс. лет по образцу 186190. Из горизонтов палеопочвы PC2 имеется две даты (186185, 186188). Значения эквивалентной дозы данных образцов значительно разнятся, так, дата 186188 имеет дозу  $800 \pm 55$  Грей. Мощность дозы этого образца составляет  $3.7 \pm 0.1$  Грей/тыс. лет, что связано с прямой законо-

Таблица 3. Результаты ОСЛ-датирования для кварца и полевых шпатов и их соотношения

№	Лаб. номер	Номер образца	Глубина, см	Слой в разрезе	Измерения по кварцу (Q)			Измерения по полевым шпатам (Fs)				Возрастные соотношения			
					доза, Грей	возраст, тыс. лет	количество аликвот	прогокол pIRIR <sub>290</sub>	прогокол IR <sub>50</sub>		pIRIR/Q	IR/Q	кварцевые зерна засвечены		
							доза, Грей	возраст, тыс. лет	возраст, тыс. лет	доза, Грей	возраст, тыс. лет				
1	186151	LZH-20	15	S0	20.9 ± 1.5	6.9 ± 0.5	21	30.7 ± 2.6	8.4 ± 0.7	18 ± 1	4.8 ± 0.4	10	1.1 ± 0.1	0.6 ± 0.1	✓
2	186153	LZH-22	67	L1	34.9 ± 1.8	15.7 ± 0.8	20	51.7 ± 1.4	18.1 ± 0.6	29 ± 0	10.1 ± 0.2	8	1.1 ± 0.1	0.6 ± 0.1	✓
3	186159	LZH-27	173	L1	43.7 ± 2.2	16.0 ± 0.8	20	62.8 ± 1.7	18.6 ± 0.6	46 ± 5	13.6 ± 1.4	6	1.0 ± 0.1	0.7 ± 0.1	✓
4	186160	LZH-28	193	L2	45.5 ± 1.8	17.6 ± 0.8	20	61.4 ± 0.6	19.1 ± 0.5	40 ± 3	12.6 ± 0.8	7	1.0 ± 0.1	0.6 ± 0.1	✓
5	186165	LZH-33	283	L2	83.0 ± 2.0	28.6 ± 0.9	25	116 ± 7	32.8 ± 2.1	49 ± 1	13.9 ± 0.3	6	1.0 ± 0.1	0.5 ± 0.1	✓
6	186167	LZH-35	305	PC1				441 ± 40	123 ± 11	289 ± 16	80.3 ± 4.7	13			
7	186171	LZH-39	403	PC1				518 ± 33	157 ± 10	357 ± 9	108 ± 3	7			
8	186176	LZH-17	473	L3				596 ± 26	176 ± 8	372 ± 23	110 ± 7	7			
9	186178	LZH-16	503	L3				634 ± 26	178 ± 8	405 ± 12	114 ± 4	6			
10	186180	LZH-15	553	L3				576 ± 19	170 ± 6	365 ± 10	108 ± 3	6			
11	186181	LZH-14	583	L3				605 ± 24	176 ± 7	352 ± 29	102 ± 8	8			
12	186183	LZH-11	593	L3				712 ± 55	207 ± 16	360 ± 8	104 ± 3	6			
13	186185	LZH-8	623	PC2				622 ± 33	196 ± 11	375 ± 20	118 ± 6	6			
14	186188	LZH-19	713	PC2				800 ± 55	216 ± 15	610 ± 45	165 ± 13	8			
15	186190	LZH-13	853	L4				611 ± 46	302 ± 23	358 ± 17	177 ± 9	8			

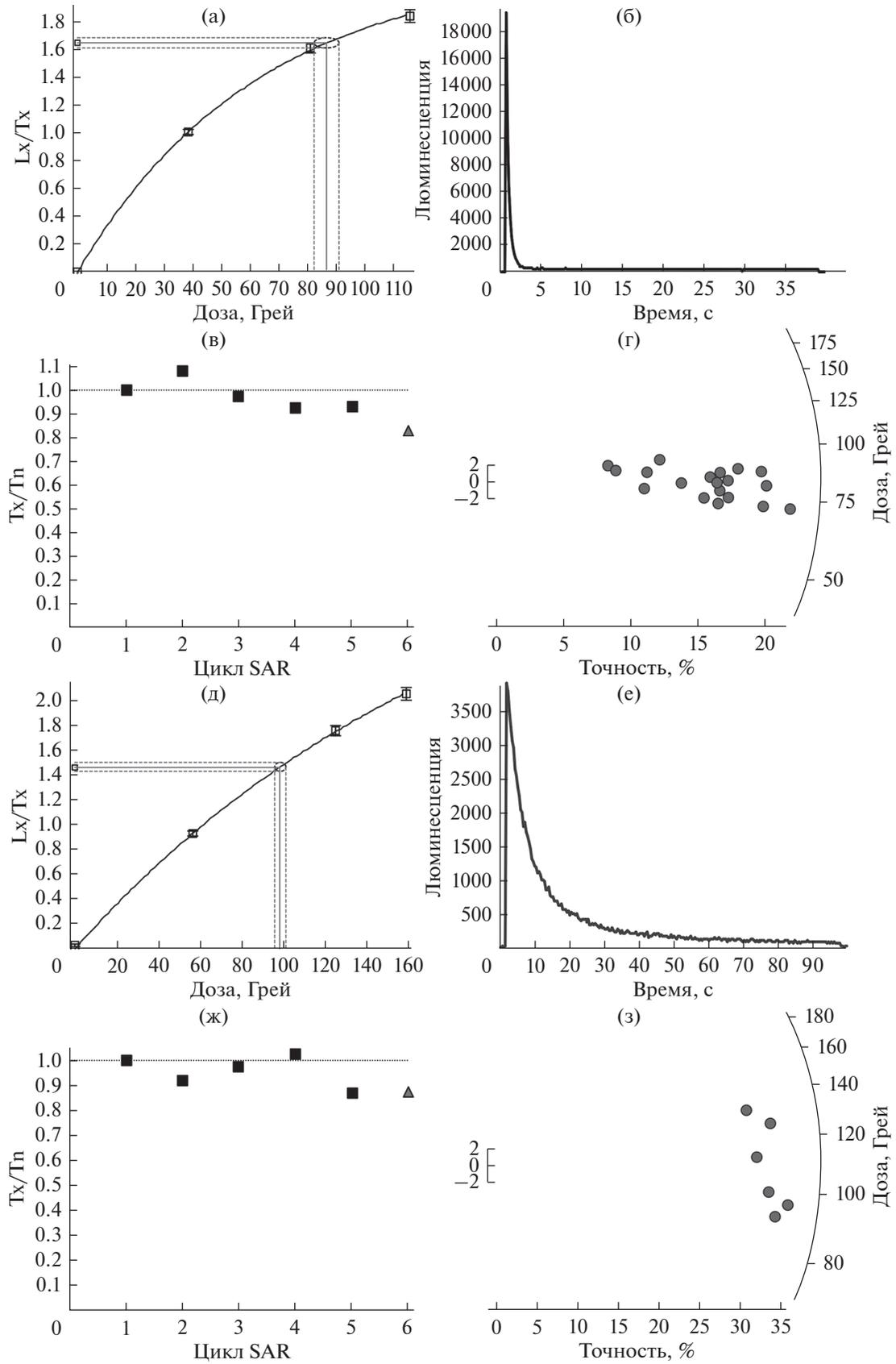


Рис. 3. Люминесцентные характеристики и результаты измерений по кварцу (а–г) и полевым шпатам (д–з) на примере образца 186165.

мерностью увеличения содержания радионуклидов в породах, обогащенных глинистым материалом, и возрастания мощности дозы в палеопочвах. Возраст для этого образца составляет  $216 \pm 15$  тыс. лет и, на наш взгляд, может быть омоложен ввиду наличия одной аликвоты полного насыщения. Вторая дата составила  $196 \pm 11$  тыс. лет.

Таким образом, возраст лёсса L4 по данным люминесцентного датирования соотносится с холодной МИС 8, в то время как возраст палеопочвы PC2 составил 196–216 тыс. лет. В расчистке 2018 г. отмечается наличие двух погребенных почвенных уровней, которые по данным люминесцентного датирования могут быть соотнесены с этапами потепления МИС 7, во время которого на территории юга Западной Сибири формировался койнихинский педокомплекс (Зыкина, Зыкин, 2012). Так, более развитый уровень почвообразования с фазой потепления МИС 7-с, а менее развитый горизонт – с фазой МИС 7-а.

Из лёсса L3 было получено шесть датировок (186171–186181). Эквивалентные дозы образцов находятся в пределах 596–712 Грей, со скоростью накопления дозы в среднем  $3.4 \pm 0.1$  Грей/тыс. лет. Возраст отложений закономерно увеличивается с глубиной, варьируя от  $157 \pm 10$  до  $207 \pm 16$  тыс. лет, и не имеет значимых инверсий. В целом, данный горизонт мощностью 2.5 м сформировался за 50 тыс. лет, а все полученные из данного слоя возрасты укладываются в МИС 6, что в стратиграфической схеме ЛПП Западной Сибири соответствуют сузунскому лёссу (завершению тазовского оледенения).

Образец 186167 из палеопочвы PC1 был отобран из гумусового горизонта погребенной почвы и имеет возраст  $123 \pm 11$  тыс. лет (естественная доза  $441 \pm 10$  Грей, скорость накопления дозы  $3.6 \pm 0.1$  Грей/тыс. лет). Этот результат позволяет отнести палеопочву PC1 с подстадией МИС 5-е, то есть считать ее нижней бердской палеопочвой, сформировавшейся во время казанцевского межледниковья. Необходимо отметить возможное наличие перерыва в осадконакоплении в интервале глубин 305–403 см, где происходит переход возраста от 123 до 157 тыс. лет (рис. 4). Получение дополнительных дат позволит более точно установить продолжительность этого перерыва, либо установить существование этапа с низкими скоростями осадконакопления и стабилизацией рельефа в этот период.

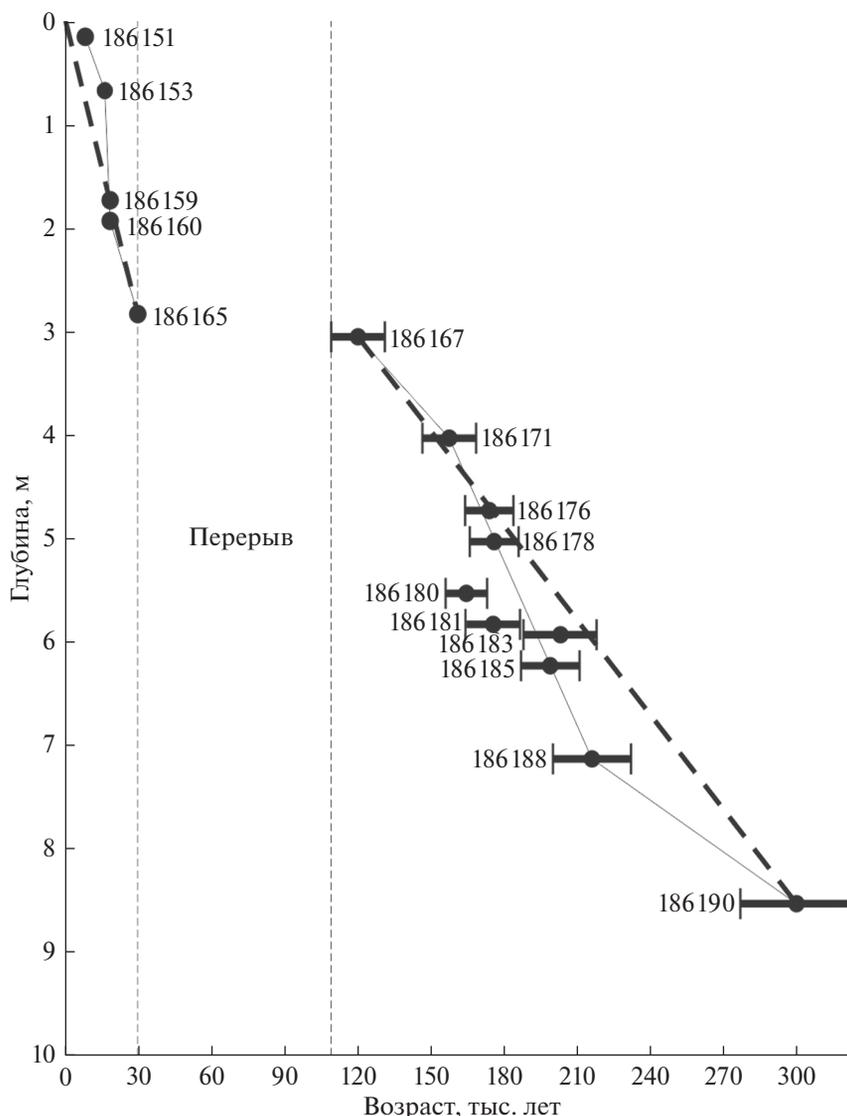
Из лёссов L1 и L2 получены даты по четырем образцам (186153–186165). Для них выполнены измерения эквивалентной дозы по кварцу и полевым шпатам. Так как при датировании по двум протоколам принято отдавать приоритет возрасту, полученному по кварцу, то возраст образцов из L1 и L2 располагается в пределах 15.7–28.6 тыс. лет. Данный диапазон позволяет говорить о сартанском (МИС 2) времени формирования этих сло-

ев, продолжительность осадконакопления горизонтов баганского и ельцовского лёссов составила примерно 13 тыс. лет.

Отмечается наличие значительного по продолжительности перерыва в осадконакоплении (EG) между PC1 (дата в кровле слоя – 123 тыс. лет) и лёссом L2 (дата в подошве слоя – 28.6 тыс. лет), который в разрезе выделяется по наличию прослоя с мелкой галькой и гравием и по результатам датирования составляет около 95 тыс. лет. Дата из S0 получена из гумусового горизонта современной почвы и относится к голоцену –  $6.9 \pm 0.5$  тыс. лет.

Полученные даты показали, что формирование баганского лёсса происходило в период значительного атмосферного осадконакопления пыли в период с  $16.0 \pm 0.8$  по  $15.7 \pm 0.8$  тыс. л. н. Время накопления ельцовского лёсса происходило в более спокойной среде с  $28.6 \pm 0.9$  по  $17.6 \pm 0.8$  тыс. л. н. Даты из кровли ельцовского ( $17.6 \pm 0.8$  тыс. лет) и подошвы баганского лёсса ( $16.0 \pm 0.8$  тыс. лет) показывают относительно непрерывный процесс лёссонакопления. В стратиграфической схеме ЛПП юга Западной Сибири (Зыкина, Зыкин, 2012) между данными слоями лёссов находится горизонт суминской почвы, его возраст оценивается в пределах ~16.3–19.6 тыс. л. н. (Вольвах и др., 2020, 2019). В данном разрезе он отсутствует, а приведенные даты показывают, что он, скорее всего, не был денудирован, а происходило преобладание атмосферных процессов осадконакопления над почвообразованием. ОСЛ-даты подтверждают накопление лёссов L1 и L2 в течение временного интервала МИС 2 и соответствуют баганскому и ельцовскому лёссам. Установленный возраст ельцовского лёсса также согласуется с имеющимися радиоуглеродными датами из гумусированной линзы в ельцовском лёссе (СОАН-164 и СОАН-12, табл. 1).

Полученные даты из отложений PC1, L3, PC2, L4 не согласуются с ранее установленным стратиграфическим расчленением разреза (Зыкина и др., 1981; Зыкина, Зыкин, 2012; Sizikova, Zykina, 2015; Zykina, Zykin 2015; и др.). Погребенная под ельцовским лёссом палеопочва PC1, ранее выделявшаяся в качестве нижней искимитской почвы (МИС 3) (Зыкина и др., 1981), имеет ОСЛ-дату  $123 \pm 11$  тыс. лет, а возраст подстилающего ее лёсса L3 –  $157 \pm 10$  тыс. лет. Согласно новым датам, данная почва сформировалась в казанцевское межледниковье (МИС 5-е) и, следовательно, соответствует нижней почве бердского педокомплекса Западной Сибири. Полученные ранее материалы палеопочвенных исследований этого разреза (Зыкина и др., 1981; Зыкина, Зыкин, 2012) позволяют надежно коррелировать горизонт почвообразования PC1 со сходным по характеру строения профилей и физико-химическим свойствам горизонтом из разреза в карьере Мраморный (нижняя палеопочва), расположенном, как и Ложок, на левом склоне долины р. Бердь вблизи



**Рис 4.** Люминесцентная возрастная модель разреза Ложок. Пунктиром показана усредненная скорость седиментации для интервалов МИС 1–МИС 2 и МИС 5–МИС 8.

г. Искитима. Здесь искимитский педокомплекс представлен двумя ископаемыми слабо развитыми чернозёмами. Для верхней искимитской почвы нехарактерно мерзлотно-солифлюкционное перемещение гумусового материала по склону, однако она также пережила период диагенеза в условиях многолетней мерзлоты. Свидетельством этого являются гумусированные языки-затеки в нижней части аккумулятивного горизонта, рассекающие норы землероев. Почвы искимитского педокомплекса формировались в условиях лесостепной и степной зон суббореального пояса при климате более аридном и прохладном, чем современный. Там же, в разрезе Мраморный, ниже искимитского педокомплекса залегает тулинский лёсс с резкой нижней границей, свидетельствующей о перерыве в осадконакоплении. К основа-

нию увеличивается количество и мощность песчаных прослоев, включающих дресву, появляются глеевые пятна и больше железистых новообразований.

Для искимитского педокомплекса в Мраморном карьере были получены четыре радиоуглеродные даты (Зыкина и др., 1981; Паньчев, 1979). Дата  $33100 \pm 1600$  л. н. (СОАН-165) получена из гумусированного прослоя нижней почвы по кусочкам древесного угля. Радиоуглеродный возраст  $32780 \pm 670$  л. н. (СОАН-629) определен по кости черепа носорога шерстистого, найденного в основании суглинка (Сса), разделяющего почвы. Радиоуглеродный возраст верхней искимитской почвы по гуминовым кислотам из аккумулятивного горизонта был определен в  $26300 \pm 700$  л. н. (ИГАН-167), а нижней – по сумме фракций гуми-

новых кислот –  $29\,000 \pm 450$  л. н. (ИГАН-168). Все четыре даты показывают, что искимитский педокомплекс в карьере Мраморный формировался в каргинское время, соответствующее МИС 3. Люминесцентная дата  $65 \pm 4$  тыс. лет (Chlachula, Little, 2011), полученная из нижней части тулинского лёсса, залегающего с перерывом на шипуновском педокомплексе (МИС 9), соответствует возрасту стадии МИС 4, что также подтверждает возраст педокомплекса. Однако в этой же работе (Chlachula, Little, 2011) приведена дата  $110 \pm 6$  тыс. лет из основания второй палеопочвы шипуновского педокомплекса, что противоречит стратиграфии (Зыкина, Зыкин, 2012; Zykin, Zykina, 2015) и устанавливает возраст данного педокомплекса как МИС 5.

Ископаемые почвы искимитского педокомплекса были прослежены от карьера Ложок до карьера Мраморный через связующие их разрезы (Зыкина, Зыкин, 2012; Zykin, Zykina, 2015) по характерным морфотипическим особенностям почв, что позволило определить с учетом имеющихся радиоуглеродных и опубликованных люминесцентных дат возраст палеопочвы РС1 в разрезе Ложок как МИС 3. Педокомплекс является хорошим репером, прослеживаемым в многочисленных разрезах лесостепной и степной зон каргинского интерстадиала Западной и Средней Сибири (Зыкина, Зыкин, 2012; Frechen et al., 2005; Kravchinsky et al., 2008). Сопоставление палеопочвы РС2 с МИС 5, т.е. с нижней бердской почвой Западной Сибири, имеющей хорошо дифференцированный профиль большей мощности, формировавшейся длительный период в течение казанцевской интергляциальной эпохи (МИС 5-е) дискуссионно.

Нельзя исключать, что дата  $123 \pm 11$  тыс. лет характеризует возраст материнского лёсса, на котором после эрозионного перерыва уже в каргинское время сформировался почвенный профиль РС1. Лёсс, в котором сформирована палеопочва РС1, мог образоваться в период МИС 6, затем в результате эрозионного события была образована новая поверхность, на которой стали развиваться почвенные процессы. В результате перемешивания засвеченного материала из приповерхностных слоев (в результате биотурбации, заполнения трещин усыхания и др.) произошло омоложение люминесцентного возраста отложений. Таким образом, в настоящее время недостаточная плотность датировок не позволяет окончательно решить вопрос о возрасте горизонта РС1. Нами предложено три варианта возможной интерпретации результатов:

1. Как было сказано выше, даты указывают на возможное наличие эрозионного контакта между датами  $123 \pm 11$  и  $157 \pm 10$  тыс. лет. Возможно, ранняя фаза МИС 5-е в разрезе не представлена, а РС1 – слабовыраженный эпизод почвообразования самого финала МИС 5-е – начала МИС 5-d, который успел образоваться на вскрытой эрозией

поверхности. Верхи этой почвы и другие возможные уровни педогенеза МИС 5 были эродированы еще одним событием, о чем свидетельствует явный эрозионный контакт с гравием и мелкой галькой.

2. Почва казанцевского времени, возможно, совсем не представлена в разрезе, будучи уничтоженной эрозией (в период между  $123 \pm 11$  и  $157 \pm 10$  тыс. лет), а РС1 – результат почвообразования каргинского времени.

3. ИКСЛ дата  $123 \pm 11$  тыс. лет отображает истинный возраст образования отложений, так как отобрана из верхней части РС1, а геоморфологическое положение не способствовало стабильным процессам почвообразования на участке расположения разреза.

Следующим почвенным репером в лёссово-почвенной последовательности верхнего плейстоцена Западной Сибири является выделенный И.А. Волковым (Волков, 1971) в разрезе Ложок в качестве стратотипа бердский педокомплекс (РС1), залегающий без перерыва в осадконакоплении под тулинским лёссом. Традиционно этот горизонт с хорошо развитым полигенетическим профилем (AU–B1–BCA), строение которого свидетельствует об этапности развития, сопоставляется с казанцевским межледниковьем (МИС 5-е). Нижняя часть гумусовых горизонтов палеопочв характеризуется сетью языков-затек, особенно мощных и глубоко внедряющихся в нижележащие горизонты. Появление последних соответствует этапу вторичного преобразования почвы в условиях влажного и холодного климата. Данный репер-педокомплекс является прекрасным маркером для лёссово-почвенной последовательности Сибири, особенно за счет почвы казанцевского межледниковья.

Для слоя L3, выделяемого ранее как тулинский лёсс (Зыкина и др., 1981), полученные даты показывают, что его накопление приходилось на интервал МИС 6, а не МИС 4, в таком случае данный горизонт будет соответствовать сузунскому лёссу. Для почвы РС2-2, соотносимой ранее с бердским педокомплексом (МИС 5) получена дата  $196 \pm 11$  тыс. л. н., а для РС2-1 –  $216 \pm 15$  тыс. л. н. Согласно полученным возрастам, рассматриваемые почвы соответствуют горизонтам койнихинского педокомплекса Западной Сибири, а не бердского и образовались во время МИС 7, а не в МИС 5.

Для верхней части L4 установлен возраст  $302 \pm 23$  тыс. л. н., что относит время его формирования в течение МИС 8, а не МИС 6, ко времени образования чулымского лёсса, а не сузунского.

В хронологической записи седиментации установлен длительный перерыв в осадконакоплении (EG): основание ельцовского лёсса характеризуется датой  $28.6 \pm 0.9$  тыс. л. н., а нижележащий педокомплекс –  $123 \pm 11$  тыс. л. н. Верхняя

часть горизонта палеопочвы, по-видимому, была денудирована вместе с вышележащими отложениями лёссов и палеопочв, сформировавшимися в течение МИС 4—МИС 3.

Выполненное нами первое детальное геохронологическое исследование методом ОСЛ разреза Ложок подтвердило, что верхняя часть разреза сформировалась в верхнем плейстоцене: баганский (L1) и ельцовский (L2) горизонты лёссов сформировались в период с  $28.6 \pm 0.9$  по  $15.7 \pm 0.8$  тыс. л. н. Этот интервал входит во временные пределы МИС 2 и сартанского горизонта. Время формирования баганского лёсса L1 —  $16.0 \pm 0.8$ — $15.7 \pm 0.8$  тыс. л. н., ельцовского лёсса L2 —  $28.6 \pm 0.9$ — $17.6 \pm 0.8$  тыс. л. н. Полученные данные согласуются с имеющими  $^{14}\text{C}$  датами и стратиграфией разреза (табл. 1).

Нижележащие отложения характеризуются более древними, чем предполагалось ранее, возрастными. Между горизонтом ельцовского лёсса (L2, МИС 2) и подстилающим его педокомплексом зафиксирован большой перерыв в осадконакоплении (EG): из гумусового горизонта почвы PC1 установлен возраст  $123 \pm 11$  тыс. л. н., что соответствует подстадии МИС 5-е, а не МИС 3, как считалось ранее. Далее вниз по разрезу происходит постепенное и последовательное увеличение возраста отложений со  $157 \pm 10$  до  $302 \pm 23$  тыс. л. н., что соответствует временному интервалу МИС 8—МИС 6. Для ископаемого педокомплекса PC2 в основании разреза, выделяемого ранее как бердский педокомплекс (МИС 5-е, с), определен возраст  $216 \pm 15$ — $196 \pm 11$  тыс. л. н., для подстилающего его L4 —  $302 \pm 23$  тыс. л. н., а перекрывающего лёсса L3 —  $176 \pm 7$  тыс. л. н. Следовательно, лёсс L3 по полученным данным является горизонтом сузунского лёсса (МИС 6), а лёсс L4 — чулымского (МИС 8). Горизонты PC2 относятся к койнихинскому педокомплексу (МИС 7), где верхняя палеопочва PC2-2 соответствует подстадии МИС 7-а, а нижняя PC2-1 — МИС 7-с. Кроме того, в основании L3 обнаруженный в 2018 г. гумусированный прослой имеет возраст  $207 \pm 16$  тыс. л. н. Его расположение внутри лёсса L3, образовавшегося в холодную стадию МИС 6, и полученный возраст с учетом доверительного интервала хорошо соответствуют интерстадиалу МИС 6-d в начале стадии.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученная серия из 15 датировок показала, что люминесцентное датирование является надежным методом определения абсолютного возраста при изучении лёссово-почвенных отложений Западной Сибири. Так, отмечается хорошее соотношение результатов измерений по протоколам  $pIRIR_{290}/Q$  и  $IR_{50}/Q$ , что говорит о достаточной засветке зерен полевого шпата и кварца. В со-

ответствии с принятыми стандартами датирования методом ОСЛ (соотношения  $pIRIR_{290}/Q$ , распределение аливокот для отдельных образцов, закономерное распределение датировок по разрезу, отсутствие инверсий), полученная серия дат является достоверной, а итоговая хронология — надежной.

Анализ полученной хронологии указывает на то, что лёссово-почвенные отложения разреза Ложок, ранее считавшиеся верхнеплейстоценовыми, сформировались в верхнем и среднем плейстоцене, а возраст отдельных горизонтов показал несовпадение с лёссово-почвенной последовательностью, разработанной на основе изучения и горизонтов ископаемых почв, и лёссов в наиболее полных субэкральных разрезах Западной Сибири, а также установленного соответствия структуры ископаемых педокомплексов строению тёплых стадий изотопно-кислородной кривой и других глобальных записей изменения климата с учетом данных радиоуглеродного датирования (Зыкина, Зыкин, 2012).

Результаты датирования позволили определить возраст всех выделенных в разрезе горизонтов:

1. Лёсс L4 —  $302 \pm 23$  тыс. л. н., соотносится с МИС 8;
2. Педокомплекс PC2 — 196—216 тыс. л. н., соотносится с МИС 7, включает два горизонта почвообразования (МИС 7-а и МИС 7-с);
3. Лёсс L3 — 157—207 тыс. л. н., соотносится с МИС 6;
4. Педокомплекс PC1 — 123 тыс. л. н., однако время его формирования остается под вопросом и может быть соотнесено с МИС 5-е, МИС 5e-d, либо с МИС 3;
5. Лёссы L1 и L2 — 15.7—28.6 тыс. л. н., соотносятся с МИС 2;
6. Почва S0 — 6.9 тыс. л. н., соотносится с МИС 1.

Интереснейшим результатом полевых работ и геохронологических исследований стало выявление наличия в разрезе эрозийной границы на глубине 3 м, выраженного в виде тонкого прослоя мелкой дресвы и гравия с резкой нижней границей. Продолжительность этого перерыва в осадконакоплении составила около 95 тыс. лет, т.е. значительная часть верхнеплейстоценовой геологической летописи в разрезе Ложок отсутствует (см. рис. 4). Отмечается возможное наличие перерыва осадконакопления в период  $123 \pm 11$  и  $157 \pm 10$  тыс. л. н.

Стратиграфические подразделения из PC1, L3, PC2, L4 по данным люминесцентного датирования имеют возраст, отличный от ранее принятой стратиграфии данного разреза. Так, нижний педокомплекс, охарактеризованный возрастом накопления отложений, соответствующий МИС 5, имеет возраст, соотносящийся с МИС 7. Подстилающие и перекрывающие педокомплекс гори-

зонты лёссов соответственно относятся к МИС 8 и МИС 6.

Резкое отличие в содержании радионуклидов  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  в горизонте лёсса L4 отражает смену в источнике материала, из которого формировались лёссы и возможную перестройку региональной розы ветров.

Авторы считают, что полученные результаты на данном этапе имеют дискуссионный характер и требуют дополнительных исследований, а массив люминесцентных датировок необходимо дополнить большим количеством измерений и желательно в разрезах, близко расположенных к разрезу Ложок.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке проектов РФФИ №№ 19-35-50058 мол\_нр, 18-45-543007 р\_мол\_а, 19-35-00040 Аспиранты и 19-05-00513 А; по теме ГЗ № АААА-А16-116032810080-2 и государственного задания ИГМ СО РАН при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны В.С. Зыкину, Д.Г. Маликову, М. Фрехену, А.В. Панину, С.Б. Марковичу, Т. Стивенсу, Н.А. Таратуниной, И.Ю. Овчинникову за консультации и обсуждение полученных результатов.

#### FUNDING

Work is done on state assignment of IGM SB RAS. This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. The reported research was funded by Russian Foundation for Basic Research and the government of the region of the Russian Federation, RFBR grants nos. 19-35-50058, 18-45-543007, 19-35-00040, 19-05-00513.

#### ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to V.S. Zykin, D.G. Malikov, M. Frechen, A.V. Panin, S.B. Markovich, T. Stevens, N.A. Taratunina, I.Yu. Ovchinnikov for consultations and discussion of the obtained results.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вагнер Г.А.* Научные методы датирования в геологии, археологии и истории. М.: Техносфера, 2006. 575 с.
- Волков И.А.* Палеогеографическое значение некоторых радиоуглеродных датировок на юге Западной Сибири // Геология и геофизика. 1973. № 2. С. 3–8.
- Волков И.А.* Позднечетвертичная субаэральная формация // М.: Наука, 1971. 254 с.
- Вольвах А.О., Вольвах Н.Е., Овчинников И.Ю., Маликов Д.Г., Щеглова С.Н.* Свидетельства потеплений, записанные в лёссовых отложениях последнего оледенения, и динамика лёссово-накопления в северо-западном Присалаирье (юго-восток Западной Сибири) // Геосферные исследования. 2020. № 3. С. 123–143.
- Вольвах А.О., Вольвах Н.Е., Смолянинова Л.Г.* Палеоклиматические изменения и короткопериодические события позднего плейстоцена в записи лёссовых отложений разреза Ложок, юго-восток Западной Сибири // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2019. № 4. С. 17–27.
- Зыкина В.С., Волков И.А., Дергачева М.И.* Верхнечетвертичные отложения и ископаемые почвы Новосибирского Приобья. М: Наука, 1981. 204 с.
- 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.
- Классификация и диагностика почв России / ред. Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.
- Курбанов Р.Н., Семиколенных Д.В., Таратунина Н.А., Вольвах Н.Е.* Методологические основы оптически стимулированной люминесценции // Актуальные проблемы палеогеографии плейстоцена. Научные достижения Школы академика К.К. Маркова / отв. ред. Т.А. Янина; ред. Н.С. Болиховская, Е.И. Полякова, Т.С. Ключиткина, Р.Н. Курбанов. М.: Географический факультет МГУ, 2020. 689 с.
- Курбанов Р.Н., Янина Т.А., Мюррей Э.С., Семиколенных Д.В., Свистунов М.И., Штыркова Е.И.* Возраст карангатской трансгрессии Чёрного моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: Геогр. 2019. № 6. С. 29–40.
- Панин А.В.* Методы палеогеографических исследований: четвертичная геохронология. Учеб. пособие. М.: Географический факультет МГУ, 2014. 116 с.
- Паньчев В.А.* Радиоуглеродная хронология аллювиальных отложений Предалтайской равнины. Новосибирск: Наука, 1979. 104 с.
- Сизикова А.О., Зыкина В.С.* Лёссы верхнего плейстоцена опорного разреза Ложок (юг Западной Сибири), динамика природной среды и климата // Изв. АлтГУ. Сер. Биологические науки, науки о Земле, химия. 2013. № 3/2. С. 132–137.
- Сизикова А.О., Зыкина В.С.* Морфостроение песчаных кварцевых зерен и микростроение верхнеплейстоценовых лёссов юга Западной Сибири, разрез Ложок // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № 1(170). С. 41–50.
- Чичагова О.А.* Радиоуглеродное датирование гумуса почв. Метод и его применение в почвоведении и палеогеографии. М.: Наука, 1985. 158 с.
- Aitken M.J.* Thermoluminescence dating. London: Academic Press, 1985. 359 p.
- Bassinot F.C., Labeyrie L.D., Vincent E., Quidelleur X., Shackleton N.J., Lancelot Y.* The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matuyama magnetic reversal // Earth Planet. Sci. Lett. 1994. № 126. P. 91–108.
- Buylaert J.-P., Jain M., Murray A.S., Thomsen K.J., Thiel C., Sobhathi R.* A robust feldspar luminescence dating method for Middle and Late Pleistocene sediments // Boreas. 2012. № 41. P. 435–451.
- Buylaert J.-P., Yeo E.Y., Thiel C., Yi S., Stevens T., Thompson W., Frechen M., Murray A., Lu H.* A detailed

- post-IR IRSL chronology for the last interglacial soil at the Jingbian loess site (northern China) // *Quat. Geochronology*. 2015. № 30. P. 194–199.
- Chlachula J., Little E.* A high-resolution Late Quaternary climatostratigraphic record from Iskitim, Priobie Loess Plateau, SW Siberia // *Quat. Int.* 2011. № 240. P. 139–149.
- Frechen M., Dodonov A.E.* Loess chronology of the Middle and Upper Pleistocene in Tadjikistan // *Geol. Rundschau*. 1998. V. 87. № 1. P. 2–20.
- Frechen M., Zander A., Zykina V., Boenigk W.* The loess record from the section at Kurtak in Middle Siberia // *Palaeoogeogr. Paleoclimat. Palaeoecol.* 2005. V. 228. № 3–4. P. 228–244.
- Kravchinsky V.A., Zykina V.S., Zykina V.S.* Magnetic indicator of global paleoclimate cycles in Siberian loess-paleosol sequence // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2008. № 265. P. 498–514.
- Lauer T., Frechen M., Vlamincck S., Kehl M., Lehndorff E., Shahriari A., Khormali F.* Luminescence-chronology of the loess palaeosol sequence Toshan, Northern Iran – A highly resolved climate archive for the last glacial-interglacial cycle // *Quat. Int.* 2017. № 429. P. 3–12.
- Muhs D.R.* Loess deposits, origin and properties // *Encycl. Quat. Sci.* 2007. P. 1405–1418.
- Murray A.S., Marten R., Johnston A., Martin P.* Analysis for naturally occurring radionuclides at environmental concentrations by gamma spectrometry // *J. Radioanalytical Nuclear Chem.* 1987. V. 115. № 2. P. 263–288.
- Murray A.S., Thomsen K.J., Masuda N., Buylaert J.-P., Jain M.* Identifying well-bleached quartz using the different bleaching rates of quartz and feldspar luminescence signals // *Radiation Measurements*. 2012. № 47. P. 688–695.
- Murray A.S., Wintle A.G.* The single aliquot regenerative dose protocol: potential for improvements in reliability // *Radiation measurements*. 2000. V. 37. № 4–5. P. 377–381.
- Murray A.S., Wintle A.G.* The single aliquot regenerative dose protocol: potential for improvements in reliability // *Radiation Measurements*. 2003. № 37. P. 377–381.
- Novothy A., Frechen M., Horvath E., Wacha L., Rolf C.* Investigating the penultimate and last glacial cycles of the Sutto loess section (Hungary) using luminescence dating, high-resolution grain size, and magnetic susceptibility data // *Quat. Int.* 2011. № 234. P. 75–85.
- Roberts R.G.* Luminescence dating in archaeology: From origins to optical // *Radiation Measurement*. 1997. V. 27. № 5–6. P. 819–892.
- Scharpenseel H.W.* Soil fraction dating // *Radiocarbon Dating* / R. Berger, H.E. Suess (Eds.). USA, CA, Berkeley: Univ. of California Press, 1976. P. 277–283.
- Sizikova A.O., Zykina V.S.* The dynamics of the Late Pleistocene loess formation, Lozhok section, Ob loess Plateau, SW Siberia // *Quat. Int.* 2015. № 365. P. 4–14.
- Stevens T., Buylaert J.-P., Thiel C., Ujvari G., Yi S., Murray A.S., Frechen M., Lu H.* Ice-volume-forced erosion of the Chinese Loess Plateau global Quaternary stratotype site // *Nature Communications*. 2018. № 9. P. 1–12.
- Thiel C., Buylaert J.P., Murray A.S., Terhorst B., Hofer I., Tsukamoto S., Frechen M.* Luminescence dating of the Stratzing loess profile (Austria) – testing the potential elevated temperature post-IR IRSL protocol // *Quat. Int.* 2011. № 234. P. 23–31.
- Thomsen K.J., Murray A.S., Jai M., Botter-Jensen L.* Laboratory fading rates of various luminescence signals from feldspar-rich sediment extracts // *Radiation Measurements*. 2008. № 43. P. 1474–1486.
- Wang Y., Amundson R., Trumbore S.* Radiocarbon dating of soil organic matter // *Quat. Res.* 1996. № 45. P. 282–288.
- Wintle A.G.* Recent developments in optical dating of sediments // *Radiation Protection Dosimetry*. 1993. № 47. P. 627–635.
- Youn J.H., Seong Y.B., Choi J.H., Abdrakhmatov K., Ormukov C.* Loess deposits in the northern Kyrgyz Tien Shan: Implications for the paleoclimate reconstruction during the Late Quaternary // *Catena*. 2014. № 117. P. 81–93.
- Zander A., Frechen M., Zykina V.S., Boenigk W.* Luminescence chronology of the Upper Pleistocene loess record at Kurtak in Middle Siberia // *Quat. Sci. Rev.* 2003. № 22. P. 999–1010.
- Zykina V.S., Zykina V.S.* The Middle and Late Pleistocene loess-soil record in the Iskitim area of Novosibirsk Priobie, south-eastern West Siberia // *Quat. Int.* 2015. № 365. P. 15–25.

## The First Results of Luminescent Dating of Loess-Paleosol Series in the South of Western Siberia (Lozhok Reference Section)

N. E. Volvakh<sup>1,\*</sup>, R. N. Kurbanov<sup>2,3,\*\*</sup>, A. O. Volvakh<sup>1,\*\*\*</sup>, V. S. Zykina<sup>1</sup>, D. E. Khashchevskaya<sup>2</sup>, J.-P. Buylaert<sup>4</sup>, and A. S. Murray<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Novosibirsk, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

<sup>4</sup>*Technical University of Denmark, Roskilde, Riso, Denmark*

<sup>5</sup>*Aarhus University, Department of Earth Sciences, Aarhus, Denmark*

\*e-mail: volvakh@igm.nsc.ru

\*\*e-mail: roger.kurbanov@igras.ru

\*\*\*e-mail: sizikova@igm.nsc.ru

The article presents the first results on luminescence dating of the Upper Pleistocene deposits of the loess-soil series in Western Siberia. In the key section Lozhok, eight horizons were identified, reflecting the main stages of the development of the environment of the region, including three paleosols, previously correlated

in the chronostratigraphic scheme of Western Siberia with the stages of warming MIS 3 and MIS 5. The chronology was obtained from 15 new optically stimulated luminescence (OSL) dates. The dating was carried out according to a modern technique with the analysis of the accumulated dose and age using three signals (OSL, IRSL<sub>50</sub>, pIRIR<sub>290</sub>). The high convergence of the results of measurements according to the pIRIR<sub>290</sub>/Q and IR<sub>50</sub>/Q protocols indicates a sufficient bleaching of the feldspar and quartz grains. In accordance with the standards accepted in luminescent dating, the obtained series of dates is reliable, and then the resulting chronology is considered as reliable. Based on the dating results, the age of formation of all stratigraphic horizons was determined. Analysis of the loess-soil sequence of the Upper Pleistocene, based on the luminescence chronology of the Lozhok section, showed a discrepancy with the loess-soil sequence developed based on a detailed study and tracing of horizons of buried soils and loesses in the most complete subaerial sections of Western Siberia. In the section, the presence of an erosion boundary is highlighted; the duration of the hiatus in sedimentation was about 95 thousand years. The upper pedocomplex is characterized by an age of 123 ± 11 thousand years and corresponds to MIS 5, and the lower one is 196–216 thousand years old and correlates with MIS 7. Analysis of sedimentation conditions indicates a sharp increase in the rates of loess accumulation in MIS 2, and the difference in the content radionuclides <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, and <sup>40</sup>K reflect a change in the source of the material and a possible rearrangement of the regional wind rose. The authors believe that the results obtained at this stage are controversial and require additional research.

**Keywords:** loess-paleosol sequence, Pleistocene, Western Siberia, stratigraphy, OSL dating, quartz, feldspar, paleosols, Quaternary stratigraphy

## REFERENCES

- Aitken M.J. *Thermoluminescence Dating*. London: Academic Press, 1985. 359 p.
- Bassinot F.C., Labeyrie L.D., Vincent E., Quidelleur X., Shackleton N.J., Lancelot Y. The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matuyama magnetic reversal. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1994, vol. 126, pp. 91–108.
- Buylaert J.-P., Jain M., Murray A.S., Thomsen K.J., Thiel C., Sohbati R. A robust feldspar luminescence dating method for Middle and Late Pleistocene sediments. *Boreas*, 2012, vol. 41, no. 3, pp. 435–451.
- Buylaert J.-P., Yeo E.Y., Thiel C., Yi S., Stevens T., Thompson W., Frechen M., Murray A., Lu H. A detailed post-IR IRSL chronology for the last interglacial soil at the Jingbian loess site (northern China). *Quat. Geochronol.*, 2015, vol. 30, pp. 194–199.
- Chichagova O.A. *Radiouglerodnoe datirovanie gumusa pochv. Metod i ego primeneniye v pochvovedenii i paleogeografii* [Radiocarbon Dating of Soil Humus. Method and its Application in Soil Science and Paleogeography]. Moscow: Nauka Publ., 1985. 158 p.
- Chlachula J., Little E. A high-resolution Late Quaternary climatostratigraphic record from Iskitim, Priobie Loess Plateau, SW Siberia. *Quat. Int.*, 2011, vol. 240, pp. 139–149.
- Frechen M., Dodonov A.E. Loess chronology of the Middle and Upper Pleistocene in Tadjikistan. *Geologische Rundschau*, 1998, vol. 87, no. 1, pp. 2–20.
- Frechen M., Zander A., Zykina V., Boenigk W. The loess record from the section at Kurtak in Middle Siberia. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 2005, vol. 228, nos. 3–4, pp. 228–244.
- Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* [Classification and Diagnostics of Soils in Russia]. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I., Eds. Smolensk: Oikumena Publ., 2004. 341 p.
- Kravchinsky V.A., Zykina V.S., Zykina V.S. Magnetic indicator of global paleoclimate cycles in Siberian loess-paleosol sequence. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2008, vol. 265, nos. 3–4, pp. 498–514.
- Kurbanov R.N., Semikolennykh D.V., Taratunina N.A., Volvakh N.E. *Metodologicheskie osnovy opticheski stimulirovannoi lyuminesentsii*. [Methodological Bases of Optically Stimulated Luminescence]. Actual problems of the Pleistocene paleogeography. Scientific achievements of the School of Academician K.K. Markov. T.A. Yanina, N.S. Bolihovskaja, E.I. Poljakova, T.S. Kljuvitkina, R.N. Kurbanov, Eds. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 2020. 689 p.
- Kurbanov R.N., Yanina T.A., Murray A.S., Semikolennykh D.V., Svistunov M.I., Shtyrkova E.I. The age of the Karangatian (Late Pleistocene) transgression of the Black Sea. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2019, no. 6, pp. 29–40. (In Russ.).
- Lauer T., Frechen M., Vlamincik S., Kehl M., Lehndorff E., Shahriari A., Khormali F. Luminescence-chronology of the loess palaeosol sequence Toshan, Northern Iran – A highly resolved climate archive for the last glacial-interglacial cycle. *Quat. Int.*, 2017, vol. 429, pp. 3–12.
- Muhs D.R. Loess deposits, origin and properties. In *Encyclopedia of Quaternary Science*. Elias S.A., Ed. Elsevier, 2007, pp. 1405–1418. doi 10.1016/B0-44-452747-8/00158-7
- Murray A.S., Marten R., Johnston A., Martin P. Analysis for naturally occurring radionuclides at environmental concentrations by gamma spectrometry. *J. Radioanal. Nucl. Ch.*, 1987, vol. 115, no. 2, pp. 263–288.
- Murray A.S., Thomsen K.J., Masuda N., Buylaert J.-P., Jain M. Identifying well-bleached quartz using the different bleaching rates of quartz and feldspar luminescence signals. *Radiat. Meas.*, 2012, vol. 47, no. 9, pp. 688–695.
- Murray A.S., Wintle A.G. The single aliquot regenerative dose protocol: potential for improvements in reliability. *Radiat. Meas.*, 2000, vol. 37, nos. 4–5, pp. 377–381.
- Murray A.S., Wintle A.G. The single aliquot regenerative dose protocol: potential for improvements in reliability. *Radiat. Meas.*, 2003, vol. 37, pp. 377–381.
- Novothy A., Frechen M., Horvath E., Wacha L., Rolf C. Investigating the penultimate and last glacial cycles of the Sutto loess section (Hungary) using luminescence

- dating, high-resolution grain size, and magnetic susceptibility data. *Quat. Int.*, 2011, vol. 234, pp. 75–85.
- Panin A.V. *Metody paleogeograficheskikh issledovaniy: chetvertichnaya geokhronologiya. Uchebnoe posobie* [Methods of Paleogeographic Research: Quaternary Geochronology. Textbook]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 2014. 116 p.
- Panychev V.A. *Radiouglerodnaya khronologiya allyuvial'nykh otlozhenii Predaltaiskoi ravniny* [Radiocarbon Chronology of Alluvial Deposits of the Cis-Altai Plain]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1979. 104 p.
- Roberts R.G. Luminescence dating in archaeology: From origins to optical. *Radiat. Meas.*, 1997, vol. 27, nos. 5–6, pp. 819–892.
- Scharpenseel H.W. Soil fraction dating. In *Radiocarbon Dating*. Berger R., Suess H.E., Eds. Berkeley, CA: Univ. of California Press, 1976, pp. 277–283.
- Sizikova A.O., Zykina V.S. Loesses of the Upper Pleistocene of the Lozhok key section (south of Western Siberia), dynamics of the environment and climate. *Izv. Altai. Gos. Univ., Ser. Biol. Nauki, Nauki o Zemle, Khimiya*, 2013, no. 3/2, pp. 132–137. (In Russ.).
- Sizikova A.O., Zykina V.S. Morphoscopy of sand quartz grains and microstructure of the Upper Pleistocene loesses of the south of Western Siberia, Lozhok section. *Geologiya i Mineral'no-syr'evye Resursy Sibiri*, 2014, vol. 170, no. 1, pp. 41–50. (In Russ.).
- Sizikova A.O., Zykina V.S. The dynamics of the Late Pleistocene loess formation, Lozhok section, Ob loess Plateau, SW Siberia. *Quat. Int.*, 2015, vol. 365, pp. 4–14.
- Stevens T., Buylaert J.-P., Thiel C., Ujvari G., Yi S., Murray A.S., Frechen M., Lu H. Ice-volume-forced erosion of the Chinese Loess Plateau global Quaternary stratotype site. *Nat. Commun.*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 1–12.
- Thiel C., Buylaert J.-P., Murray A., Terhorst B., Hofer I., Tsukamoto S., Frechen M. Luminescence dating of the Stratzing loess profile (Austria) – testing the potential elevated temperature post-IR IRSL protocol. *Quat. Int.*, 2011, vol. 234, pp. 23–31.
- Thomsen K.J., Murray A.S., Jai M., Bøtter-Jensen L. Laboratory fading rates of various luminescence signals from feldspar-rich sediment extracts. *Radiat. Meas.*, 2008, vol. 43, pp. 1474–1486.
- Volkov I.A. Paleogeographic significance of some radiocarbon dating in the south of Western Siberia. *Geologiya i Geofizika*, 1973, no. 2, pp. 3–8. (In Russ.).
- Volkov I.A. *Pozdnechetvertichnaya subaeral'naya formatsiya* [Late Quaternary Subaerial Formation]. Moscow: Nauka Publ., 1971. 254 p.
- Volvakh A.O., Volvakh N.E., Ovchinnikov I.Yu., Malikov D.G., Shcheglova S.N. Warming evidences recorded in loess deposits of the Last Glaciation and dynamics of loess accumulation in Northwestern Cis-Salair (Southeast of Western Siberia). *Geosfernye Issled.*, 2020, no. 3, pp. 123–143. (In Russ.). doi 10.17223/25421379/16/10
- Volvakh A.O., Volvakh N.E., Smolyaninova L.G. Paleoclimatic changes and short-period events of the Late Pleistocene in the record of loess deposits of the Lozhok section, Southeast of Western Siberia. *Geologiya i Mineral'no-syr'evye Resursy Sibiri*, 2019, no. 4, pp. 17–27. (In Russ.).
- Wagner G.A. *Age Determination of Young Rocks and Artifacts. Physical and Chemical Clocks in Quaternary Geology and Archaeology*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1998. 466 p.
- Wang Y., Amundson R., Trumbore S. Radiocarbon dating of soil organic matter. *Quat. Res.*, 1996, vol. 45, pp. 282–288.
- Wintle A.G. Recent developments in optical dating of sediments. *Radiat. Prot. Dosim.*, 1993, vol. 47, pp. 627–635.
- Youn J.H., Seong Y.B., Choi J.H., Abdrakhmatov K., Ormukov C. Loess deposits in the northern Kyrgyz Tien Shan: Implications for the paleoclimate reconstruction during the Late Quaternary. *Catena*, 2014, vol. 117, pp. 81–93.
- Zander A., Frechen M., Zykina V.S., Boenigk W. Luminescence chronology of the Upper Pleistocene loess record at Kurtak in Middle Siberia. *Quat. Sci. Rev.*, 2003, vol. 22, pp. 999–1010.
- Zykin V.S., Zykina V.S. The Middle and Late Pleistocene loess-soil record in the Iskitim area of Novosibirsk Priobye, south-eastern West Siberia. *Quat. Int.*, 2015, vol. 365, pp. 15–25.
- Zykina V.S., Volkov I.A., Dergacheva M.I. *Verkhnechetvertichnye otlozheniya i iskopaemye pochvy Novosibirskogo Priob'ya* [Upper Quaternary Sediments And Buried Soils of Novosibirsk Ob Region]. Moscow: Nauka Publ., 1981. 204 p.
- Zykina V.S., Zykin V.S. *Lessovo-pochvennaya posledovatel'nost' i evolyutsiya prirodnoi sredy i klimata Zapadnoi Sibiri v pleistotsene* [Loess-Paleosol Sequence and Evolution of the Natural Environment and Climate of Western Siberia in the Pleistocene]. Novosibirsk: Geo Publ., 2012. 477 p.