

УДК 551.89:551.311.234.3(470.44/.47)

ХРОНОЛОГИЯ И УСЛОВИЯ РАЗВИТИЯ КРИОГЕНЕЗА В ЛЁССОВО-ПОЧВЕННЫХ СЕРИЯХ НИЖНЕГО ПОВОЛЖЬЯ[#]

© 2023 г. Н. А. Таратунина^{1,2}, В. В. Рогов^{2,3}, И. Д. Стрелецкая², Т. А. Янина^{1,2}, Р. Н. Курбанов^{1,2,*}

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

³Институт криосферы Земли СО РАН, Тюмень, Россия

*E-mail: kurbanov@igras.ru

Поступила в редакцию 06.07.2022 г.

После доработки 04.12.2022 г.

Принята к публикации 14.03.2023 г.

В статье представлены результаты изучения четырех разрезов в Нижнем Поволжье, содержащих многочисленные следы криогенеза в позднплейстоценовых субаэральном отложениях, представленные тонкими вертикальными клиньями в лёссах и почвах, инволюциями и клиньями в аллювиальных отложениях. С целью установления этапов развития криогенеза и границ распространения криолитозоны на территории юго-востока Восточно-Европейской равнины авторами охарактеризована морфология криогенных структур, выполнены морфоскопия кварцевых зерен и микроморфологические исследования, расчет коэффициента криогенной контрастности, а также абсолютное датирование отложений. На данной территории установлено четыре этапа развития криогенеза в позднем плейстоцене, которые различались по типу, масштабу распространения и условиям образования криогенных структур. Процессы криогенного преобразования отложений в регионе происходили в условиях как сезонного промерзания, так и развития многолетней криолитозоны. Они определили состав, структуру и особенности строения лёссово-почвенных серий и аллювиальных слоев. Полученные результаты существенно уточняют современные представления об условиях формирования ательских отложений Нижнего Поволжья и масштабы распространения криолитозоны на юге Восточно-Европейской равнины в позднем плейстоцене.

Ключевые слова: лёссы, палеокриолитозона, минералогический анализ, коэффициент криогенной контрастности, ОСЛ-датирование

DOI: 10.31857/S2949178923030118, EDN: WEPPLC

ВВЕДЕНИЕ

Одним из природных явлений, получивших широкое распространение на территории Восточно-Европейской равнины в позднем плейстоцене, является перигляциальная криолитозона. Здесь выявлены многочисленные свидетельства существования мерзлых пород в виде разнообразных криогенных структур, часто формирующих криогенные горизонты. Последние, в свою очередь, являются важными хроностратиграфическими реперами. В настоящее время детальная реконструкция этапов развития криогенеза, условий проявления криогенных процессов и выявления границы максимального распространения области многолетней мерзлоты на территории Восточно-Евро-

пейской равнины в позднем плейстоцене остаются актуальной проблемой современной палеогеографии.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Одним из районов дискуссионного распространения многолетней мерзлоты в позднем плейстоцене на Восточно-Европейской равнине является Прикаспийская низменность. В Нижнем Поволжье, на значительном протяжении Волго-Ахтубинской долины, охарактеризована серия разрезов, содержащих уникальную запись о четвертичной истории колебаний уровня Каспийского моря в виде чередующихся морских, аллювиальных и субаэральном отложений (Федоров, 1957; Васильев, 1961; Свиточ, Янина, 1997; Koltringer et al., 2021; Kurbanov et al., 2021). Однако в значительном по объему опубликованном материале встречаются лишь короткие и отрыв-

[#] Ссылка для цитирования: Таратунина Н.А., Рогов В.В., Стрелецкая И.Д. и др. (2023). Хронология и условия развития криогенеза в лёссово-почвенных сериях Нижнего Поволжья // Геоморфология и палеогеография. Т. 54. № 3. С. 49–66. <https://doi.org/10.31857/S2949178923030118>; <https://elibrary.ru/WEPPLC>

вочные описания палеогеографических условий регрессивных эпох Каспийского моря.

Недостаточность материалов по реконструкции ландшафтов и климата во время продолжительной ательской регрессии (МИС 4 – начало МИС 3) связана, во-первых, с малым количеством изученных на современном уровне разрезов, а во-вторых, с тем, что основное внимание исследователей региона было направлено на детальную характеристику морских отложений различных трансгрессивных этапов Каспийского моря. Реконструкция эволюции мерзлотных процессов в отложениях позднего плейстоцена и их влияния на особенности седиментации могут позволить приблизиться к пониманию палеогеографических условий формирования субаэральных отложений в регрессивные эпохи Каспия.

Грунтовые структуры, объясняемые криогенным происхождением, отмечались в Нижнем Поволжье рядом исследователей (Федоров, 1957; Васильев, 1961; Москвитин, 1962; Шкатова, 1975; Свиточ, Янина, 1997). Однако данные о существовании мерзлоты в позднем плейстоцене на данной территории, а также интерпретация условий формирования и развития структур, практически отсутствуют. Среди зафиксированных структур выделяют преимущественно мерзлотные котлы, шельники и псевдоморфозы по вытаявшим подземным льдам. В своей работе Ю.М. Васильев (1961) описывает наличие структур (псевдоморфозы, складчатые деформации и криотурбации) в разрезах Средняя Ахтуба, Черный Яр, Райгород, Копановка и др., относя их к мерзлотным. А.И. Москвитин (1962) так же ограничивается упоминанием мерзлотных явлений в разрезах четвертичных образований Северного Прикаспия без интерпретации условий их формирования. Обширный обзор литературы по Нижней Волге с характеристикой условий времени накопления ательских регрессивных и хвалыньских трансгрессивных (вторая половина МИС 3 – МИС 2) отложений (по данным фаунистического и флористического анализов) представлен в работе В.К. Шкатовой (1975). Особое внимание уделено описанию и фотофиксации разрезов четвертичных отложений на территории Нижнего Поволжья, а также криогенных образований (шельников/клиновидных структур и инволюций).

Выделенные структуры в Нижнем Поволжье приурочены к ательской свите, представленной преимущественно лёссовыми отложениями. Лёссовые породы, как континентальные архивы плейстоценовой истории, представляют большой интерес, поскольку могут дать ответ на вопрос о палеогеографических условиях времени их накопления и дальнейшего преобразования. Лёссовые отложения широко распространены в пределах перигляциальной зоны Восточно-Европейской

равнины. Вместе с почвенными горизонтами они образуют лёссово-почвенные серии (Величко, 1973). В результате работ международной группы исследователей под руководством Р.Н. Курбанова и Т. Стивенса в Нижнем Поволжье подробно описана и проанализирована серия разрезов, содержащих значительные по мощности лёссово-почвенные серии, получены данные о возрасте и генезисе этих отложений (Koltringer et al., 2020, 2022; Taratunina et al., 2021, 2022; Kurbanov et al., 2022).

Исследователи связывают формирование криогенных форм и образований в рыхлых отложениях и, в том числе, в лёссово-почвенных сериях, с понижением температур в регионе, поэтому изучение криогенных структур помогает ответить на вопрос о палеогеографических условиях во время их формирования. Наиболее детальные работы по изучению истории палеокриолитозоны выполнены для территории Европы – на равнинах Восточной Европы, где встречается все многообразие ископаемых мерзлотных образований (Vandenbergh et al., 2014), в европейской части России (Попов, 1960; Розенбаум, 1985; Динамика ландшафтных..., 2002; Сычева, 2012; Стрелецкая, 2017).

Долина Нижней Волги в отношении представительности разрезов четвертичных отложений, их полноты, условий залегания и обнаженности, насыщенности палеонтологическим материалом является уникальным объектом для познания истории развития Каспия и корреляции его трансгрессий и регрессий с ледниковыми и межледниковыми событиями на Восточно-Европейской равнине. Изученные разрезы расположены в нижнем течении р. Волги, по ее правому берегу и берегам Волго-Ахтубинской долины.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для территорий вне современной криолитозоны комплексные исследования криогенных образований методами минералогии и микроморфологии пока единичны (Величко и др., 1996; Makeev et al., 2021), и вопрос о влиянии криогенных процессов на преобразование состава и строения отложений, как и вопрос о существовании и параметрах мерзлоты в перигляциальной зоне последнего оледенения, остается открытым.

В основу работы положены результаты комплексного изучения четырех опорных разрезов Волго-Ахтубинской долины (рис. 1): на левом берегу исследованы Средняя Ахтуба, Ленинск и Батаевка, на правом – Райгород. Все они вскрывают строение нижнехвалыньской равнины Северного Прикаспия: реперный горизонт шоколадных глин хвалыньской трансгрессии, полифациальную толщу ательских континентальных осадков и

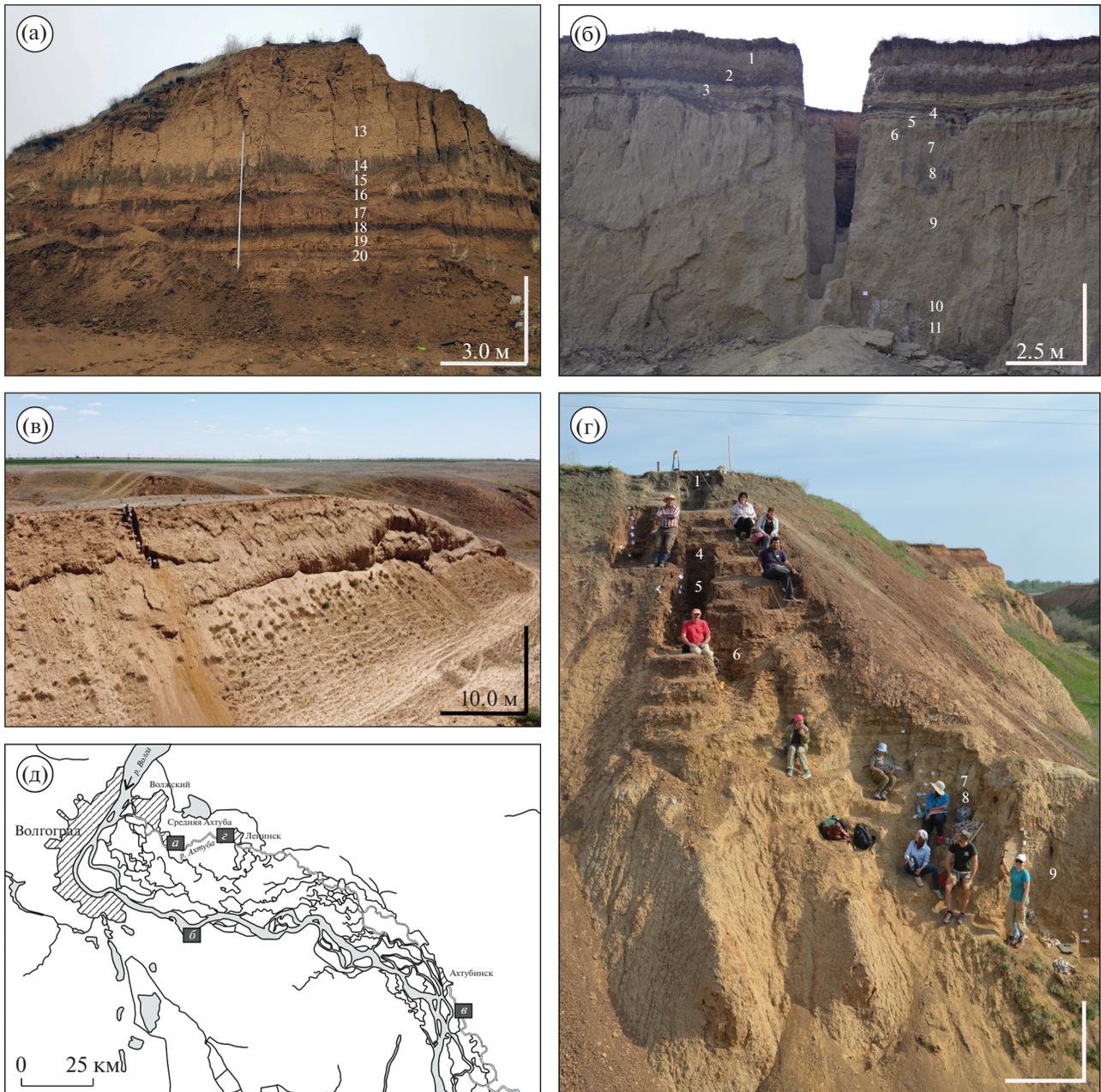


Рис. 1. Общий вид разрезов Средняя Ахтуба (а), Райгород (б), Батаевка (в), Ленинск (г) и их расположение (д) в пределах Нижнего Поволжья.

Fig. 1. General view of the Srednyaya Akhtuba (a), Raygorod (б), Bataevka (в), Leninsk (г) sections and their location in the Lower Volga Region (д).

комплекс отложений, связанных с эпохой хазарского (~МИС 5) трансгрессивного этапа Каспия. В северной части района исследований по мощности резко преобладают субаэральные отложения, в которых на разных уровнях отмечаются структуры по типу псевдоморфоз и криотурбаций.

Под псевдоморфозами в данной статье понимаются вторичные структуры, возникшие в результате замещения одной породы другой с со-

хранением внешних форм исходного материала. Согласно этому определению к таковым относятся и изучаемые нами структуры, которые сформировались в результате протаивания льда и заполнения вышележащим материалом.

Полевые работы включали рекогносцировочные исследования, зачистки криогенных структур, их детальное описание в стенке разреза, отбор образцов для лабораторных исследований,

геодезическую привязку границ горизонтов и точек отбора образцов.

Комплексное лабораторное изучение отложенных выполнено в институте криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН (Тюмень), Институте географии РАН (Москва), в Скандинавской лаборатории люминесцентного датирования (Орхусский университет, Дания). Изучены минералогический состав отложений и осуществлен расчет коэффициента криогенной контрастности (ККК), морфоскопия кварцевых зерен и микроморфологическое строение, выполнено абсолютное люминесцентное датирование.

Изучение микростроения проводилось при помощи растрового электронного микроскопа ТМ 3000 (Hitachi) в комплексе с энерго-дисперсионным спектрометром Swift 3000 в двух аспектах:

1) изучение микростроения образцов ненарушенного сложения по сколам небольших образцов (0.5–1.0 см³). Подготовка образцов для анализа выполнялась путем раскалывания образца на две части, которые приклеивались на предметный столик тыльной стороной; далее, согласно обычной процедуре подготовки образцов для исследования в электронном микроскопе, производилось напыление золотом для создания токопроводящего покрытия (Курчатова, Рогов, 2020);

2) изучение микротекстурных характеристик поверхности кварцевых зерен, которые могут сохраняться в течение длительного времени и несут наибольшее количество информации об условиях седиментации отложений (Krinnsley, Doornkamp, 1973; Vos et al., 2014; Woronko, Pisarska-Jamrozy, 2015; Курчатова, Рогов, 2020). Исследование образцов проводилось в электронном микроскопе с аналогичной пробоподготовкой (распыление на углеродный пластырь и напыление золотом). При изучении особое внимание уделялось форме частиц, рельефу поверхности, наличию сколов, строению агрегатов, органическим и минеральным включениям.

Для реконструкции условий развития многолетней мерзлоты региона в прошлом был привлечен показатель, характеризующий степень участия в формировании отложений процесса криогенного выветривания – коэффициент криогенной контрастности (ККК). Для расчета данного коэффициента (Конищев, Рогов, 1994) необходимо выполнить минералогический анализ двух фракций: тонкого песка (0.05–0.1 мм) и крупной пыли (0.01–0.05 мм). Определение минералогического состава выполнялось с использованием рентгеноструктурного дифрактометра D2 PHASER (Bruker). Интерпретация рентгенограмм дифрактометра проводилась с помощью программ DiffracEva и DiffracTopas. По представлению основоположника этого метода, В.Н. Конищева (Кони-

щев, 1999; Конищев и др., 2005), значения ККК позволяют провести корреляцию со среднегодовой температурой поверхности грунтов.

Для создания надежной основы хроностратиграфических корреляций выполнено абсолютное датирование методом оптически стимулированной люминесценции (ОСЛ). Первые результаты датирования были опубликованы в (Янина и др., 2017), детали датирования и люминесцентные характеристики образцов опубликованы в (Kurbanov et al., 2021). Отбор образцов происходил в темное время суток в светонепроницаемые черные пакеты либо пластиковые трубы после предварительной зачистки места отбора. Химическая подготовка образцов выполнена по стандартной методике (Kurbanov et al., 2021).

Люминесценция выделенных фракций кварца и полевых шпатов изучена с использованием ридера TL/OSL Risø DA20. Для отложений данных разрезов проведены стандартные тесты: для кварцевых зерен проведен “тест чистоты” для оценки чистоты датируемого материала; проведена предварительная оценка эквивалентной дозы; выполнен тест восстановления дозы для оценки достоверности измерения прибором. Измерения эквивалентной дозы кварца проведены по стандартному протоколу SAR (Kurbanov et al., 2021), а оценка дозы К-полевого шпата выполнена по протоколу IRSL SAR (Buylaert et al., 2012), что позволяет провести сравнение итоговых возрастов по кварцу и калиевым полевым шпатам и оценить степень обнуления люминесцентного сигнала до момента захоронения материала. Концентрация радионуклидов была рассчитана с помощью гамма-спектрометров высокого разрешения (Murray et al., 1987).

Для разреза Райгород (рис. 2) использованы результаты байесовского моделирования (Taratunina et al., 2022). Более детальная информация о люминесцентных характеристиках отложений и результатах датирования приведена в специальных работах по разрезам Райгород (Taratunina et al., 2022) и Ленинск (Kurbanov et al., 2022).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты полевых исследований. Обнажение **Средняя Ахтуба** расположено в 500 м восточнее населенного пункта Средняя Ахтуба (рис. 2, N_{абс} 14.9 м, 48°42'01" N; 44°53'37" E) и открывается в стенке одной из эрозионных балок, прорезающих поверхность хвалынской террасы. Разрез мощностью 20 м характеризует строение отложений, накопившихся в эпоху ательской регрессии Каспийского моря, а также мощную толщу шоколадных глин хвалынской трансгрессии. Описана полифациальная толща осадков (сверху вниз): современная почва (каштанозем, слой 1); мощная толща шоколадных глин (слои 2–5); чередование

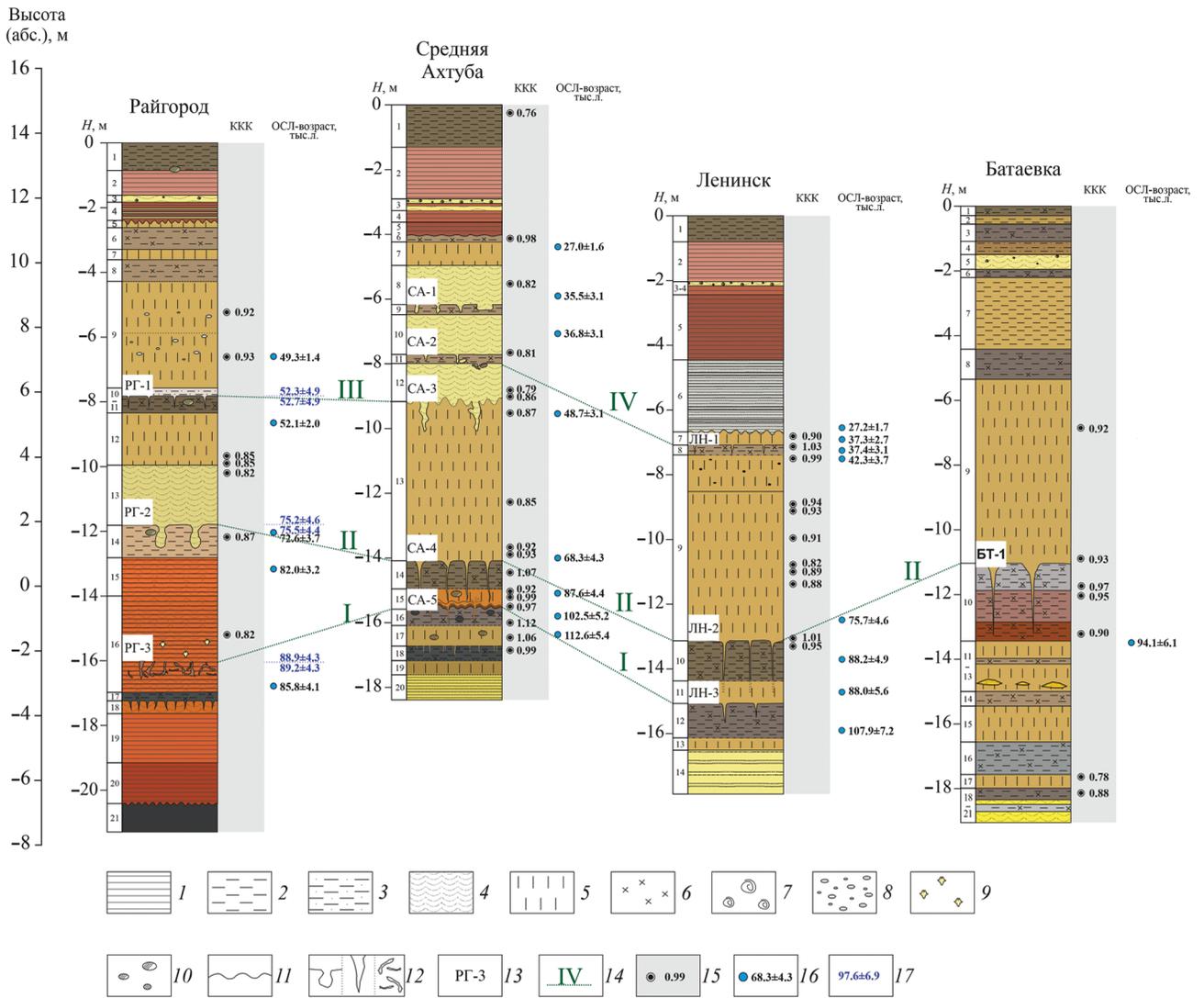


Рис. 2. Корреляция изученных на территории Нижнего Поволжья разрезов и этапов развития криогенеза в позднем плейстоцене.

1 – глина; 2 – суглинок; 3 – супесь; 4 – песок; 5 – лёсс; 6 – палеопочвы; 7 – малакофауна; 8 – карбонатные конкреции; 9 – гипсовые “розы”; 10 – кротовины; 11 – эрозионная граница; 12 – криогенные структуры; 13 – криогенные горизонты; 14 – этапы криогенеза; 15 – коэффициент криогенной контрастности; 16 – ОСЛ-возраст, тыс. л.; 17 – моделированный ОСЛ-возраст, тыс. л. Слева от стратиграфической колонки обозначены номера слоев; цвет отложений отражает естественный цвет осадка.

Fig. 2. Correlation of the studied sections in the Lower Volga Region and stages of cryogenesis in the Late Pleistocene. 1 – clay; 2 – loam; 3 – sandy loam; 4 – sand; 5 – loess; 6 – paleosols; 7 – malacofauna; 8 – carbonate concretions; 9 – gypsum “roses”; 10 – krotovinas; 11 – erosion boundary; 12 – cryogenic structures; 13 – cryogenic horizons; 14 – stages of cryogenesis; 15 – coefficient of cryogenic contrast; 16 – OSL-age, ka; 17 – modeled OSL-age, ka. Layers are marked on the left of the stratigraphic column; the color of the deposits reflects the natural color of the sediment.

палеопочв и аллювия (слои 6–12); горизонт лесовых отложений, верхняя часть которых размыва (слой 13); чередование лёссов, в значительной степени затронутых педогенезом, и развитых палеопочв (слои 14–19), озерно-лиманные отложения (слой 20). Описание разреза, его стратификация и результаты абсолютной геохронометрии приведены согласно работе (Янина и др., 2017).

Уникальной особенностью разреза Средняя Ахтуба является выраженность позднплейстоценового криогенеза: в разрезе установлены следы

пяти горизонтов с криогенными структурами в виде криотурбаций и псевдоморфоз различных типов (рис. 3, 4).

На глубине ~6.2 м (отн.) выявлены следы первого (сверху вниз) горизонта криогенных структур (СА-1) в виде псевдоморфоз, секущих слой 9. Всего в пределах расчистки вскрыто шесть структур, имеющих разнообразные вертикальные размеры (20–30 см) и форму: воронкообразную с расширением на конце, клиновидную с закруг-

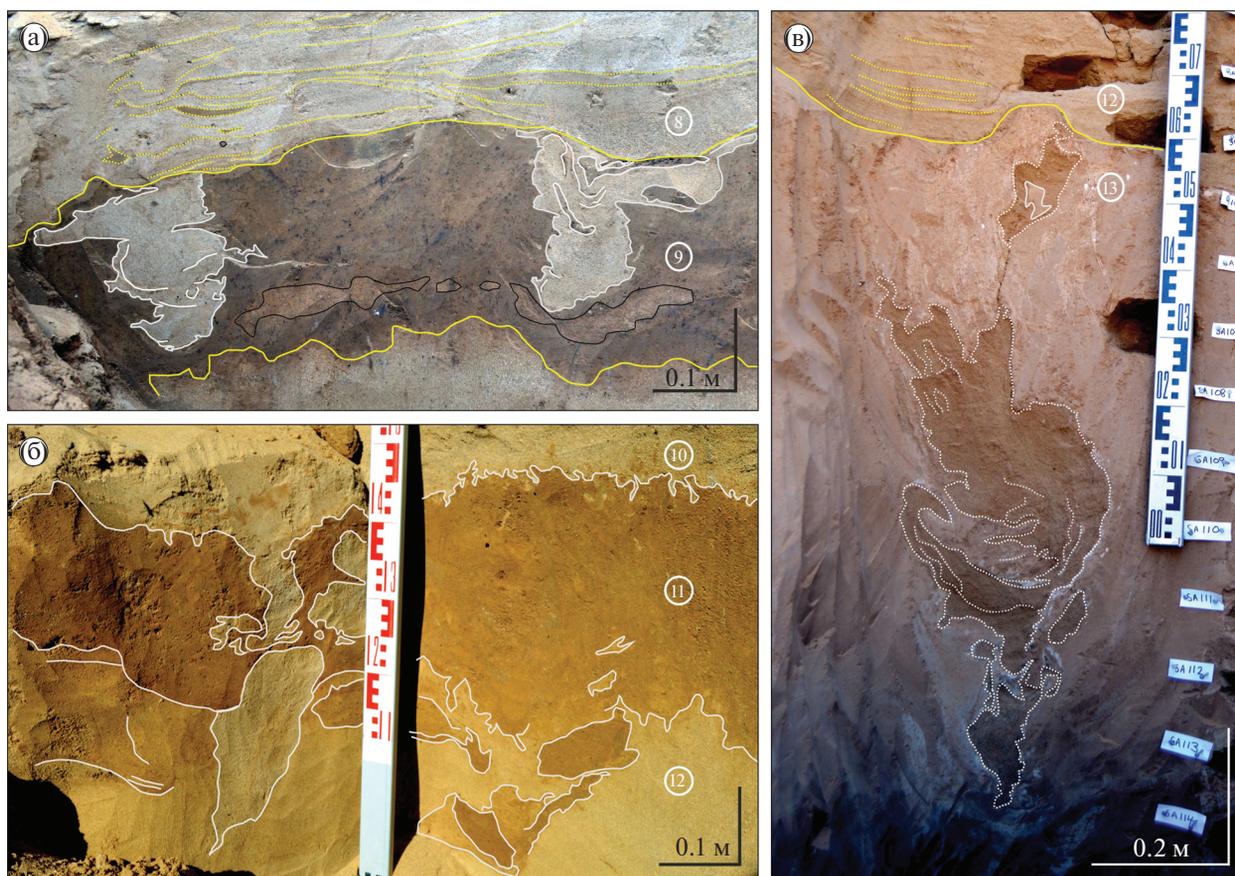


Рис. 3. Криогенные структуры в разрезе Средняя Ахтуба: (а) – клиновидные структуры с горизонтальными отростками первого криогенного горизонта (СА-1); (б) – криотурбации в аллювиальных отложениях, второй криогенный горизонт (СА-2); (в) – двухуровневая криогенная структура третьего криогенного горизонта (СА-3). Номера обозначены слои, выделенные в колонках на рис. 2.

Fig. 3. Cryogenic structures in the Srednyaya Akhtuba section: (a) – wedge-shaped structures with horizontal processes of the first cryogenic horizon (SA-1); (б) – cryoturbations in alluvial deposits, the second cryogenic horizon (SA-2); (в) – two-level cryogenic structure of the third cryogenic horizon (SA-3). Layers are from fig. 2 and are numbered.

ленным концом, некоторые имеют горизонтальные плоскости и зубчатые края (рис. 3, (а)).

На глубине 7.7 м (отн.) наблюдается второй горизонт криогенных структур (СА-2), представляющий собой ряд округлых клубнеобразных образований (рис. 3, (б)), рассекающих палеопочву и внедряющихся в нижележащий аллювиальный горизонт; материал их представлен мелкозернистым песком коричневого и серо-желтого цвета. Центральные части описываемых образований слабо ожелезнены; часть их, заключенная в палеопочву, имеет закругленную границу. Структуры, внедряющиеся в аллювиальный горизонт (слой 10), имеют клинообразный хвост.

Третий криогенный горизонт (СА-3) приурочен к кровле горизонта лёссов. Здесь, на глубине 9.1 м (отн.), слой среднезернистого однородного песка с горизонтальной слоистостью по эрозионной границе сменяется плотным лёссом светло-палевого цвета. Лёссовая толща общей мощно-

стью 5.0 м в верхней части включает ряд крупных псевдоморфоз. В расчистке вскрыта криогенная структура, имеющая двухуровневое строение (рис. 3, (в)): верхняя (более широкая) часть представляет собой мешкообразный карман глубиной 70–75 см, шириной до 40 см, заполненный неоднородным рыхлым песком темно-бежевого цвета, со слоистостью, которая указывает на постепенное заполнение структуры от краев к центру; нижняя часть псевдоморфозы представлена клинообразным хвостом шириной до 20 см, вертикальной протяженностью 35–40 см. Граница псевдоморфозы и вмещающего материала неровная, с многочисленными завихрениями и складками, подчеркивается тонкой линией карбонатов.

Структуры четвертого криогенного горизонта (СА-4, глубина 14.1 м отн.), зафиксированы в слое палеопочвы (слой 14) в виде клиновидных псевдоморфоз (рис. 4, (а)). Ширина структур в

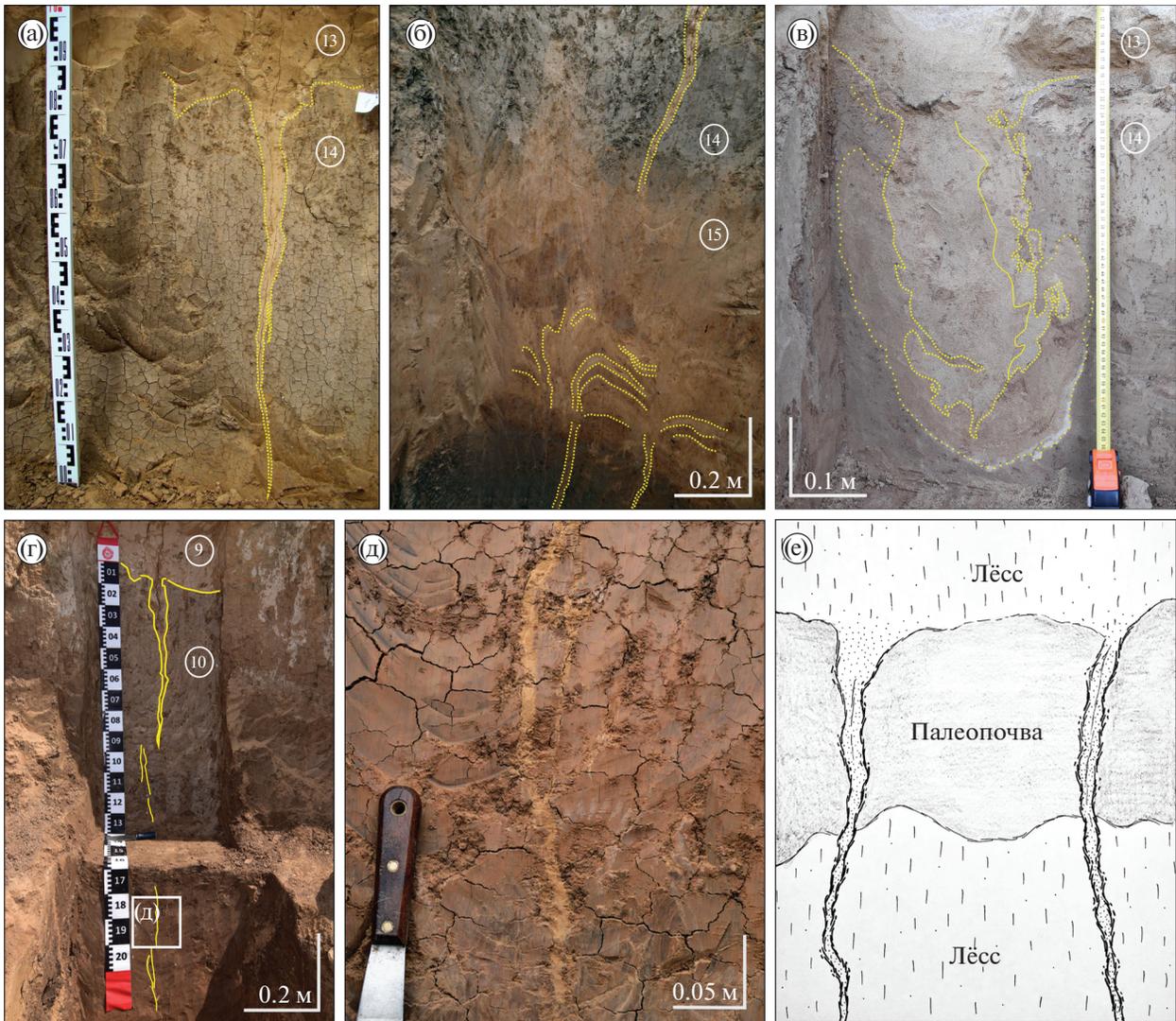


Рис. 4. Криогенные структуры в разрезах Нижнего Поволжья: (а) – клиновидная структура в палеопочве (СА-4), (б) – перемятия в строении лёсса и палеопочвы на границе слоев 15 и 16 (СА-5); (в) – мешкообразная псевдоморфоза в аллювиальных отложениях разреза Райгород; (г) – клиновидная структура в разрезе Батаевка; (д) – сетчатая текстура в отложениях и тонкий хвост криогенной структуры, заполненный лёссовым материалом (увеличенный фрагмент с рис. 4, (г)); (е) – тонкие клиновидные формы, заполненные вышележащим лёссовым материалом и секущие палеопочвенные горизонты, разрез Ленинск (зарисовка). Номерами обозначены слои.

Fig. 4. Cryogenic structures in the Lower Volga sections: (a) – wedge-shaped structure in paleosol (SA-4); (б) – deformation in the structure of loess and paleosol at the boundary between layers 15 and 16 (SA-5); (в) – “bag-like” pseudomorphosis in alluvial deposits of the Raigorod section; (г) – wedge-shaped structure in the Bataevka section; (д) – reticulate texture in sediments and a thin cryogenic tail filled with loess material (enlarged fragment from fig. 4, (г)); (е) – thin wedge-shaped forms filled with overlying loess material and cutting paleosol horizons, Leninsk section (sketch). Numbers in circles indicate the layer numbers.

верхней части – 12–20 см, вертикальная протяженность – от 0.6 до 1.0 м; расстояние между клиньями 40–60 см. Клиновидные структуры заполнены вышележащим лёссовым материалом. Вмещающие отложения характеризуются сетчатой текстурой, предположительно, криогенного происхождения.

Следы пятого горизонта (СА-5, глубина 15.5 м отн.) зафиксированы в палеопочве (слой 16) в нижней части разреза и выражены в виде тонких

клиновидных псевдоморфоз, секущих нижележащий горизонт лёсса (слой 17) и внедряющихся в поверхность палеопочвы (слой 18) мелкими хвостами. Клинья имеют относительно широкий растроб по верху (12–20 см), быстро сужаются и продолжают в виде хвостов, иногда распающихся на 2–3 отдельных. Высота клиновидных структур от 0.8 до 1.5 м; расстояние между клиньями 40–60 см. Заполнены структуры более светлым лёссовым материалом слоя 15. Граница

слоев 15 и 16 нарушена неровными зубчатыми контактами (рис. 4, (б)).

Разрез Райгород (рис. 2, $H_{\text{абс}}$ 13.7 м, $48^{\circ}25'53''$ N; $44^{\circ}58'02''$ E) расположен на правом берегу р. Волга, в 1 км восточнее одноименного села. Разрез является стратотипом ательских отложений Нижнего Поволжья (Свиточ, Янина, 1997), и вскрывает строение раннехвалынской террасы Каспийского моря. Толща представлена разнофациальными отложениями мощностью более 21 м: ниже современной почвы (слой 1) залегает толща шоколадных глин (слои 2–4), под которой с эрозионной границей вскрыта мощная лёссово-почвенная серия (слои 5–12); нижняя часть – русловые и пойменные отложения (слои 13–21) с признаками почвообразования.

В разрезе Райгород вскрыты следы трех криогенных горизонтов. Первый криогенный горизонт (РГ-1, глубина 7.9 м отн.) представляет собой палеопочву и секущие ее клиновидные псевдоморфозы до 25–30 см по вертикали, расположенные на расстоянии 30–50 см друг от друга. Ширина по верху криогенных структур составляет 2–3 см; по вертикали ширина клина сохраняется и составляет 1–2 см; хвосты теряются. Структуры слабо различимы и заполнены вышележащим супесчаным материалом палевого цвета.

Второй криогенный горизонт (РГ-2) представлен в разрезе мешкообразными псевдоморфозами вертикальной протяженностью 50–60 см, расположенными на глубине 11.8 м и заполненными вышележащим русловым аллювием. Опробованная структура этого горизонта представлена на рис. 4, (в), имеет “мешковатый” вид и вложена в неслоистые суглинки серовато-коричневого цвета с равномерно распределенными крупными изометричными порами (1–3 мм). Размер структуры по вертикали 55 см, ширина от 20 см в верхней части до 45 см в нижней. Псевдоморфоза имеет зональное строение: внешний контур представлен супесью светло-коричневого цвета толщиной 5–10 см; внутренняя часть криогенной структуры заполнена песком светло-палевого цвета. Структура неоднородная по вертикали: верхняя ее часть представлена линзой крупнозернистого песка светло-бежевого цвета, ниже фиксируется постепенный переход в центральную часть структуры, состоящую из однородного песчаного материала с редкими включениями органики. Граница между внешней и внутренней частями четкая, неровная, с затеками. От вмещающих отложений структура отделена тонкой (0.1–0.3 см) границей белого цвета, представленной кристаллами карбонатов и гипса.

Третий горизонт (РГ-3) мощностью до 30 см вскрыт в нижней части разреза на глубине 16.0 м и представлен суглинками, которые пронизаны тонкими клиньями (до 1.5–2.0 см в раструбе, до

25–30 см по вертикали), заполненными вышележащим аллювием. В плане клинья представляют собой неправильную решетку с размерами полигонов 5–15 см в поперечнике. Клинья имеют четкие границы, ломаные формы, материал заполнителя – серо-коричневые суглинки с органикой. Горизонт сильно ожелезнен по всей толще; высокое содержание гипсовых стяжений величины от 1 до нескольких миллиметров.

Разрез Батаевка (рис. 2, $H_{\text{абс}}$ 11.7 м; $48^{\circ}09'51''$ N; $46^{\circ}17'14''$ E) расположен в 15 км юго-восточнее г. Ахтубинск, на левом берегу р. Ахтуба, и заложен на границе поймы и хвалынской террасы Прикаспийской низменности. В строении разреза мощностью 19 м вскрыта толща морских и континентальных образований: в верхней части это чередование субаэральных почвенных горизонтов и плотных лёссовидных суглинков и супесей, которые разделяются песками хвалынской трансгрессии с присутствием каспийских моллюсков (слои 1–8); в средней части разрез представлен мощным горизонтом плотной, карбонатной лёссовидной супеси (слой 9), которая подстилается педокомплексом (слой 10) с характерными клиновидными структурами (подобно структурам палеопочв в нижней части разрезов Средняя Ахтуба и Ленинск). Ниже продолжается частое чередование горизонтов лёссов и палеопочв (слои 11–18), в последних появляются остатки углей. Основание разреза представлено переслаиванием алевритов и тонких песков (слои 19–21). Отличительной особенностью является отсутствие горизонта хвалынских шоколадных глин.

В данном разрезе выявлен один криогенный горизонт (см. рис. 4, (г, д)), расположенный на глубине ~11.0–13.0 м и содержащий клиновидные псевдоморфозы, берущие начало в лёссе и секущие нижележащие палеопочвы. Горизонт полностью пронизан тонкими клиньями вертикальной протяженностью 2.0–2.5 м, расположенными на расстоянии 40–50 см друг от друга. Клинья имеют воронкообразный раструб (в сечении 12–17 см), заполнены вышележащим лёссовым материалом. Ширина основного тела выдержана в центральной части и составляет ~2 см. В хвостовой части (на глубине ~2.0 м от раструба) структуры постепенно сужаются, иногда пропадают и снова появляются в виде жилок шириной 1–3 мм, заполненных более светлым лёссовым материалом. Границы клиньев четкие, ломаной формы, выделены по цвету и материалу, с многочисленными ответвлениями в хвостовой части. При горизонтальной зачистке хвостовой части вскрыта полигональная сетка с размером полигонов до 20 см. Вмещающие палеопочвенные отложения имеют сетчатую текстуру, вероятно, криогенного происхождения (рис. 4, (д)).

Разрез Ленинск (рис. 2, $H_{\text{абс}}$ 11.5 м, 48°43'17" N; 45°09'33" E) расположен в 2 км западнее г. Ленинск (Волгоградская область), в одной из балок на левом берегу р. Ахтуба. Строение разреза Ленинск включает: 1) современную почву (слой 1); 2) толщу морских осадков – реперный горизонт шоколадных глин (слой 2–5); 3) подстилающие их серые глины (слой 6); 4) мощную толщу континентальных осадков (слои 7–13), представленную чередованием лёссов и палеопочв; последние вмещают криогенные структуры в виде псевдоморфоз клиновидного облика; 5) в основании разреза вскрыт горизонт озерно-лиманных отложений.

В разрезе Ленинск выделено три горизонта с криогенными структурами. Первый (ЛН-1) представлен сочетанием лёссов (слой 7) и палеопочвы (слой 8): из вышележащего лёсса палевого цвета в нижележащую палеопочву отходят маломощные псевдоморфозы вертикальной протяженностью 35–40 см, шириной 1.5–2.0 см. Структуры имеют ломаную форму, хвосты теряются.

Второй горизонт криогенных структур ЛН-2 берет начало на границе лёссов и палеопочвы (слой 10). Горизонт представлен клиньями вертикальной протяженностью 65–70 см субвертикального направления (рис. 4, (е)). Клинья с ответвлениями, заполнены вышележащим плотным, неоднородным, неслоистым лёссовым материалом, расположены на расстоянии ~60 см друг от друга. Клинья меняют свою ширину по вертикали от нескольких до 20 см и составляют в среднем 5–7 см; их края как ровные, так и с боковыми ответвлениями; встречаются и более мелкие структуры. Один из клиньев был подробно опробован.

Третий криогенный горизонт (ЛН-3) также берет начало на границе лёсс–палеопочва (слой 11–12). Структуры представлены тонкими клиновидными псевдоморфозами до 2–3 см по толщине, секущими палеопочву на глубину до 30–40 см. Отмечаются два типа клиньев – заполненные лёссовыми осадками и более темным почвенным материалом.

Результаты лабораторных исследований. *Микростроение лёссово-почвенной толщи.* Для отложений разрезов Нижнего Поволжья изучены микростроение образцов лёссов ненарушенного состояния и морфология кварцевых частиц (песчаной и пылеватой фракций) (рис. 5). Микростроение представлено в основном крупными агрегатами до 3 мм, сложенными частицами разной крупности и степени слитности: от остроугольных частиц кварца тонкопесчаной размерности до “примазок” различного состава (железо, кремний, кальций). Интересной особенностью являются цилиндрические поры (см. рис. 5, (а)), диаметр которых составляет до 0.6 мм, а на стенках наблюдается уплотнение грунтовой массы с участием пылева-

тых частиц силикатов. В большинстве примеров сечение пор близко к окружности, но в ряде случаев оно имеет шестиугольную форму; помимо этого, вокруг каналов часто заметны радиальные трещины.

Морфология частиц песчаной фракции. Все больше исследователей в своих работах по генезису рыхлых отложений представляют информацию о характере поверхности частиц кварца песчаной размерности, форме зерен и дефектах на их поверхности. Считается, что эти показатели позволяют судить о генезисе отложений, при этом наличие свежих сколов на поверхности частиц предполагает криогенное воздействие (Woronko, Pisarska-Jamrozy, 2015; Курчатова, Рогов, 2020).

Морфология песчаных кварцевых частиц (рис. 5, (б–г)) в исследованных образцах весьма разнообразна и отражает условия формирования отложений в разных обстановках. Вмещающие аллювиальные отложения характеризуются как хорошо окатанными, изометричными зернами с неглубокими ямками на поверхности, так и хорошо окатанными зернами неправильной формы; встречаются также угловатые зерна со сглаженными гранями. Кварцевые зерна лёссовых горизонтов имеют раковистые изломы и пластинчатые сколы (рис. 5, (б)), иногда сглаженные растворением и повторным осаждением кремнезема. Встречены зерна, подвергшиеся, вероятно, золотой обработке: на поверхности хорошо окатанного зерна неравномерно распределены многочисленные ямки (рис. 5, (г)); зерна со скругленными гранями, имеющие унаследованную удлиненную форму, мелкие ямки на поверхности. Встречены хорошо окатанные зерна со следами травления и водной обработки – нерегулярными V-образными углублениями (рис. 5, (в)). Отдельно исследованы кварцевые зерна из материала псевдоморфоз и вмещающих отложений разрезов, которые показали многочисленные сколы, встреченные как во вмещающих отложениях, так и в заполнителе структур, особенно в хвостовой части.

Морфология агрегатов пылеватой фракции (0.05–0.005 мм). Лёссы состоят из структурных отдельностей различного размера – от агрегатов микроскопических размеров до хорошо различимых столбчатых отдельностей. При изучении микростроения особое внимание было уделено агрегатам пылеватой фракции (микроагрегатам), поскольку ряд исследователей предполагает их криогенный генезис (Попов, 1967; Конищев, 1981).

В лёссах рассматриваемых разрезов встречаются различные по размеру и структуре агрегаты. Крупные и рыхлые агрегаты (0.5–0.1 мм) обычно сложены десятком или более частиц пылеватой фракции. В агрегатах меньшего размера преобладают тонкопылеватые и глинистые частицы; внутриагрегатные поры в них меньше и имеют

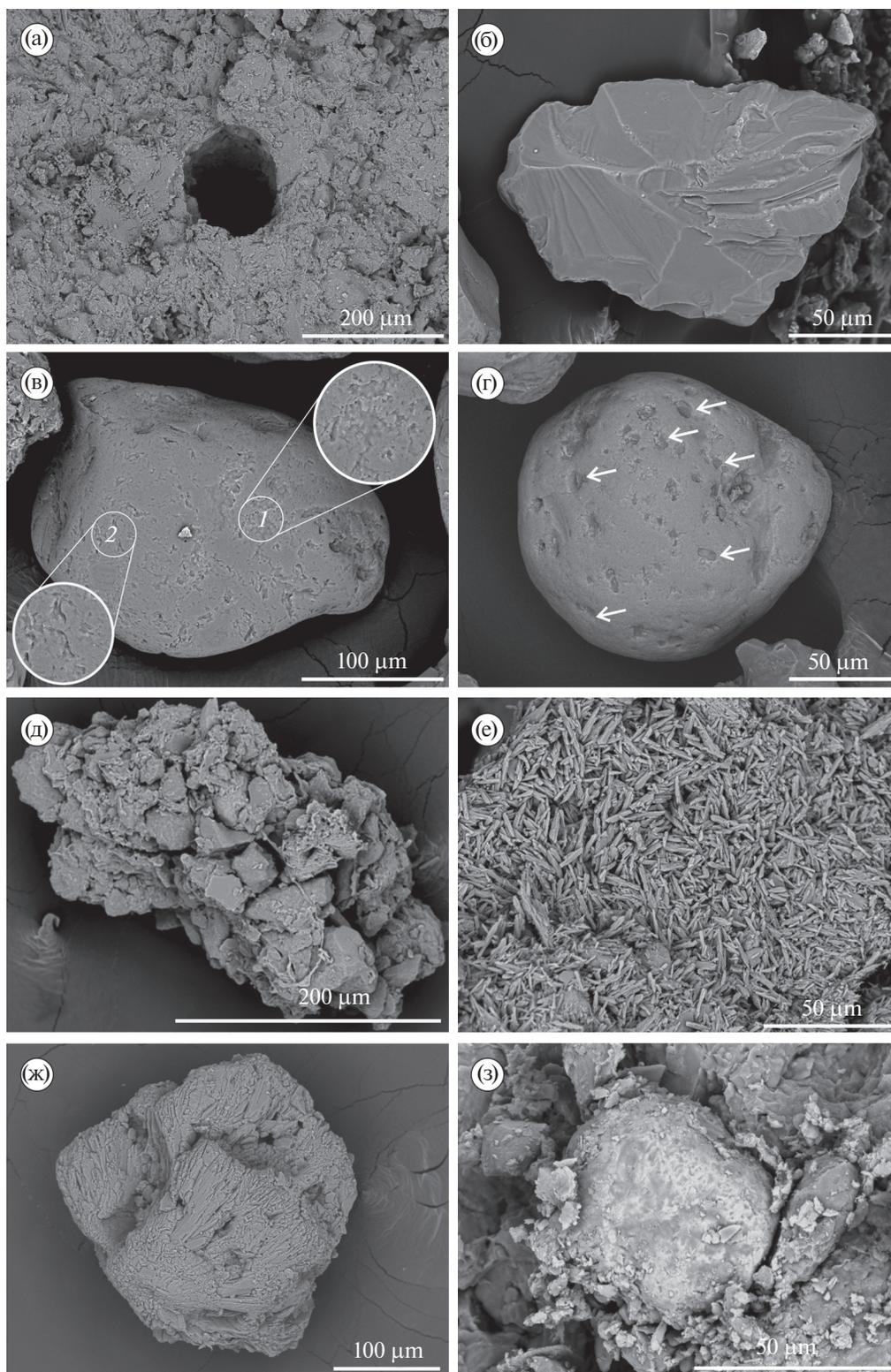


Рис. 5. Особенности микростроения отложений и морфологии частиц разрезов Нижнего Поволжья: (а) – трубчатая пора в микростроении лёссов (разрез Батаевка, слой 9, глубина 10.9 м); (б) – угловатое зерно с многочисленными сколами на поверхности (разрез Ленинск, заполнитель хвостовой части псевдоморфозы, криогенный горизонт ЛН-2); (в) – следы травления (1) и транспортировки в водной среде (2) на поверхности кварцевого зерна (разрез Ленинск, заполнитель псевдоморфозы, раструб, глубина 13.1 м); (г) – изометричное зерно с неравномерно распределенными углублениями на поверхности (белые стрелки) (разрез Ленинск, заполнитель хвостовой части псевдоморфозы, криогенный горизонт ЛН-2); (д) – агрегат, сложенный частицами разной размерности (разрез Средняя Ахтуба, глубина 14.0 м); (е) – игольчатый кальцит (разрез Райгород, криогенный горизонт РГ-3, глубина 16.2 м); (ж) – гипс во вмещающих криогенные структуры отложениях (разрез Ленинск, криогенный горизонт ЛН-2, глубина 13.1 м); (з) – титано-железистые конкреции (разрез Средняя Ахтуба, глубина 15.6 м).

уплощенную форму. Большая часть агрегатов образована пылеватыми и глинистыми частицами, соединенными цементом железо-карбонатного состава (рис. 5, д)). Агрегаты достаточно прочные, не разрушаются при промывке водой и воздействию ультразвуком. Контакт между агрегатами происходит посредством глинистых “мостиков”, которые формируют внутриагрегатные поры 0.01–0.005 мм.

Аутигенные минералы во всех разрезах представлены “шубой” и “иголочками” карбоната кальция на поверхности минеральных частиц (рис. 5, е)), включениями гипса (рис. 5, ж)). Железо представлено аморфными пленками на поверхности частиц, конкрециями сидерита и редкими новообразованиями магнетита и титано-магнетита (рис. 5, з)). Встречены кристаллы витерита. Состав аутигенных минералов свидетельствует о криоаридных условиях формирования горизонтов лёссов в разрезах Нижнего Поволжья.

Расчет коэффициента криогенной контрастности. Для оценки влияния криогенеза на изученные отложения была проанализирована минералогия основных гранулометрических фракций лёссов – тонкого песка и крупной пыли, и рассчитан коэффициент криогенной контрастности (ККК).

Значения ККК (рис. 2) по разрезу Средняя Ахтуба колеблются в достаточно широком диапазоне: они фиксируют как горизонты, сформировавшиеся в холодных климатических условиях, так и не несущие их видимых следов. Величина ККК в отложениях голоценового этапа (МИС 1, слой 2 и 1) составляет 0.76, что соответствует теплым условиям. Этап накопления аллювиальной толщи, отвечающий второй половине стадии МИС 3 и ранней фазе раннехвалынской трансгрессии Каспия (слои 8–12), характеризуется невысокими значениями ККК (0.79–0.82). Этап ательской регрессии характеризуется более высокими значениями ККК: для слоя 13 получено значение 0.87–0.93. В серии осадков, отвечающей позднехазарскому трансгрессивно-регрессивному этапу в Каспии (~МИС 5), в составе и строении отложений четко прослеживается влияние похолодания: согласно расчетам коэффициента криогенной контрастности наиболее преобразованными пачками оказались слои 14 (МИС 5а, ККК 1.07), 16 (МИС 5с, ККК 1.12) и 17 (МИС 5д, ККК 1.06). Эти горизон-

ты, вероятно, были подвержены криогенному преобразованию в достаточно холодных условиях МИС 5b и МИС 4 во время существования на изученной территории многолетней криолитозоны. В разрезе Батаевка для нижней части лёссовой толщи (граница слоев 9 и 10) получено значение 0.93, что говорит о достаточно суровых условиях начала формирования лёссов. Ниже, в педокомплексе, коэффициент составляет 0.97, и снижается по профилю палеопочв до 0.90. Значения ККК разреза Райгород рассчитаны для лёссовой и аллювиальной толщ. В обоих типах отложений значения ККК не превышают 1, хотя в лёссах ККК несколько выше – 0.85–0.93 против 0.82–0.87 в аллювии. Значения ККК в лёссовой толще разреза Ленинск (слой 9) различны, находятся в пределах 0.82–0.99, что, на наш взгляд, отражает меняющиеся условия увлажнения – для монотонной лёссовой толщи более высокие значения ККК говорят о более интенсивном периоде криогенной переработки. Для палеопочвенных горизонтов ККК максимален на границе лёсс–палеопочва: 1.03 на границе слоев 7/8 (ЛН-1) и 1.01 на границе слоев 9/10 (ЛН-2). В разрезе Ленинск также проведена детальная оценка ККК для отложений второго криогенного горизонта: материал для анализа был отобран из тела псевдоморфозы (5 шт.) и из вмещающих отложений (8 шт.). Различия в значении коэффициента для вмещающего и формирующего структуру материала не велики, однако прослеживается некоторая закономерность – во вмещающих палеопочвенных отложениях (слой 10) коэффициент больше (0.88–1.05), по сравнению с вышележащими (слой 9), где ККК ниже (0.76–0.90).

Геохронологические исследования. В рамках люминесцентного датирования получено 22 даты (рис. 2), характеризующие основные этапы формирования отложений в условиях криогенеза, что позволило выделить четыре этапа развития криогенеза в Нижнем Поволжье в позднем плейстоцене (рис. 2). Для выделения этапов в разрезе Райгород привлечены данные байесовского моделирования, представленные в (Taratunina et al., 2022). Информация обобщена в табл. 1, а на рис. 6 выделена корреляция этапов с событиями на Восточно-Европейской равнине и в Каспийском регионе.

←

Fig. 5. Microstructure of sediments and particle morphology: (a) – tubular pore in loess microstructure (Bataevka section, layer 9, depth 10.9 m); (б) – angular grain with numerous chips on the surface (Leningk section, filler of the “tail part” of ice wedge cast, cryogenic horizon LN-2); (в) – traces of etching (1) and water treatment (2) the on the quartz grain surface (Leningk section, filler of the ice wedge cast mouth, depth 13.1 m); (г) – isometric grain with irregularly distributed pits on the surface (white arrows) (Leningk section, filler of the “tail part” of ice wedge cast, cryogenic horizon LN-2); (д) – an aggregate composed of particles of different size (Srednyaya Akhtuba section, depth 14.0 m); (е) – needle-shaped calcite (Raygorod section, cryogenic horizon RG-3, depth 16.2 m); (ж) – gypsum in sediments containing cryogenic structures (Leningk section, cryogenic horizon LN-2, depth 13.1 m); (з) – titanium-ferruginous nodules (Srednyaya Akhtuba section, depth 15.6 m).

Таблица 1. Криогенные этапы и типы криогенных структур в изученных разрезах Нижнего Поволжья
Table 1. Stages of cryogenesis and types of cryogenic forms in the studied sections of Lower Volga valley

Этап	Разрез (обозначение горизонта)	Тип криогенных структур	Абс. высота, м	Возраст, тыс. л. н.	Условия формирования структур в различных отложениях
I МИС 5b	Средняя Ахтуба (СА-5)	Тонкие клиновидные структуры до 1.5 м	-0.64	~95–90	Субаэральные отложения; сухие, холодные
	Ленинск (ЛН-3)		-1.73	~95	
	Райгород (РГ-3)	Маломощные (до 30 см) тонкие структуры	-2.35	~90	Пойменные отложения: влажные, холодные условия; сезонное промерзание
II МИС 5a/ МИС 4	Ленинск (ЛН-2)	Тонкие клиновидные структуры до 1.0 м	-2.10	~75	Субаэральные отложения; сухие, холодные условия; сливающаяся мерзлота
	Райгород (РГ-2)	Мешкообразные псевдоморфозы с послойным заполнением	1.87	~75	Аллювиальные отложения; влажные; глубокое протаивание
	Средняя Ахтуба (СА-4)	Тонкие клиновидные структуры до 1.0 м	0.74	~70	Субаэральные отложения; сухие, холодные условия; сливающаяся мерзлота
	Батаевка (БТ-1)	Тонкие клиновидные структуры до 2.5 м	0.72	~70	Субаэральные отложения; сухие, холодные условия; сливающаяся мерзлота
III МИС 3b/c	Райгород (РГ-1)	Тонкие клиновидные структуры до 30 см	6.12	~52–50	Субаэральные отложения; сухие, холодные условия
	Средняя Ахтуба (СА-3)	Двухуровневые псевдоморфозы до 1.5 м с послойным заполнением	5.74	~45	Аллювиальные отложения; влажные; подъем уровня Волги, глубокое протаивание
IV МИС 3a	Ленинск (ЛН-1)	Тонкие клиновидные структуры до 30 см	4.32	~37–35	Субаэральные условия; сухие, холодные; многолетняя мерзлота
	Средняя Ахтуба (СА-2)	Криотурбации	7.16	~37	Развитие пойменных почв по аллювию; влажные условия; возможно существование многолетней мерзлоты
	Средняя Ахтуба (СА-1)	Клиновидные псевдоморфозы до 25 см	8.36	~35	Развитие пойменных почв по аллювию; влажные; сезонное промерзание

Понятия “криогенный горизонт” и “криогенный этап” в данной работе понимаются по-разному: криогенный горизонт – геологическое тело, которое несет в себе следы криогенеза, т.е. это слой с криогенными структурами; криогенный этап – время формирования криогенных структур.

Начало **I этапа** соответствует концу МИС 5с – первой половине МИС 5b (95–90 тыс. л. н.). Для данного периода выделены разнообразные структуры, формирование которых связано с суб-

аэральными условиями (разрезы Средняя Ахтуба, Ленинск). Здесь, в условиях междуречья, сформировались крупные псевдоморфозы клиновидной формы протяженностью до 1.5 м. Помимо этого, в пойменных отложениях (разрез Райгород), где промерзание происходило на небольшую глубину, сформировались маломощные псевдоморфозы в виде тонких вертикальных клиньев (криогенный горизонт РГ-3) до 30 см. В целом криогенный этап I характеризуется наличием

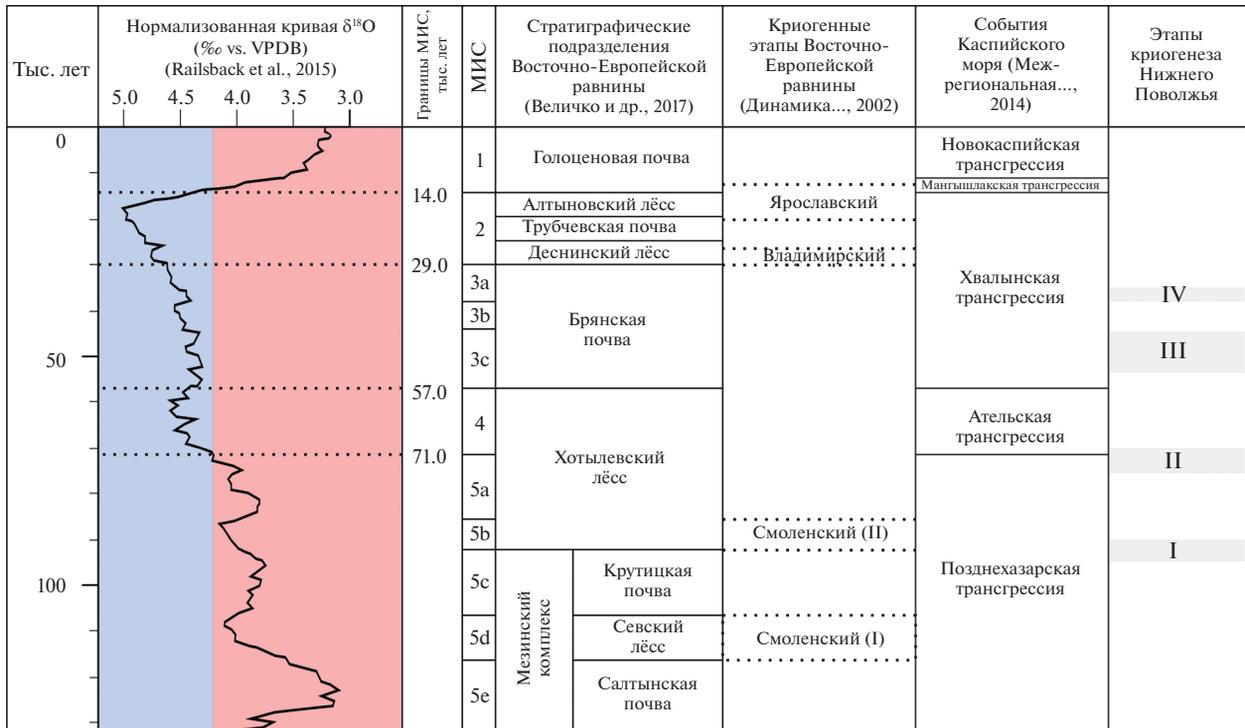


Рис. 6. Корреляция криогенных событий Восточно-Европейской равнины и Нижнего Поволжья.
 Fig. 6. Correlation of cryogenic events in the East European Plain and the Lower Volga Region.

многолетней мерзлоты (максимальные значения ККК 1.12).

II этап криогенеза на территории Нижнего Поволжья установлен ~75–70 тыс. л. н. и соответствует переходному времени от МИС 5a к МИС 4. Для этого времени здесь зафиксированы различные по облику структуры в разных типах отложений: 1) в разрезах Ленинск (ЛН-2), Средняя Ахтуба (СА-4) и Батаевка (БТ-1) в субаэральных лёссово-почвенных отложениях зафиксированы псевдоморфозы клиновидной формы вертикальной протяженностью ~0.6–2.0 м; 2) разрез Райгород (РГ-2) фиксирует структуры другого строения, заключенные в тонкодисперсных фациях аллювия – мешкообразные псевдоморфозы 55–60 см по вертикали, 20–50 см в ширину, с послойным заполнением вышележащим аллювиальным материалом.

Криогенные структуры этапа, вскрытые в разрезах Средняя Ахтуба, Ленинск и Батаевка, заключены в субаэральных лёссово-почвенных отложениях, и, хотя расположены на разных широтах, имеют схожее строение и параметры. Структуры в разрезе Райгород, расположенном на одной широте со Средней Ахтубой, заключены в аллювиальных отложениях и имеют другое строение. Это свидетельствует о том, что характер структур зависит в большей степени от генезиса

отложений, чем от территориального положения (в пределах одного региона).

Начало этапа III соответствует МИС 3c – началу МИС 3b (~52–45 тыс. л. н.). Этап отмечен в разрезе Райгород (РГ-1) на глубине ~7.7 м в виде маломощных клиновидных псевдоморфоз, представленных тонкими структурами до 30 см по вертикали; ширина структур выдержана по вертикали. Они секут слабо развитую почву, и заполнены вышележащим лёссовым материалом; хвост структур теряется. Структуры развиты в лёссово-почвенных субаэральных отложениях, сформированных в водораздельных условиях с невысоким увлажнением. В разрезе Средняя Ахтуба выделены псевдоморфозы до 1.5 м с двухуровневым строением (СА-3): широкая верхняя часть представляет собой мешкообразный карман глубиной 70–75 см, шириной до 40 см, заполненный неоднородным рыхлым песком; нижняя часть представлена клинообразным хвостом шириной до 20 см, вертикальной протяженностью 35–40 см. Границы псевдоморфоз и вмещающего материала неровные, с многочисленными завихрениями и складками.

Этап IV соответствует МИС 3a (37–35 тыс. л. н.). В Нижнем Поволжье этот этап выражен в разрезе Ленинск, а также в виде двух уровней в разрезе Средняя Ахтуба: 1) нижний уровень в разрезе Средняя Ахтуба (СА-2) представлен клубнеобраз-

ными криотурбациями, которые нарушают однородность отложений пойменных почв и аллювиальной толщи; 2) верхний горизонт (СА-1) представлен псевдоморфозами различного строения – клиновидными структурами, формами с горизонтальными отростками, которые образуются в условиях как постоянно существующего, так и периодически формирующегося бассейна, а также при наличии многолетней мерзлоты; для всех структур этого горизонта характерна небольшая мощность (до 25 см) в пределах почвенного горизонта и четкие границы с вмещающими отложениями; 3) в разрезе Ленинск (ЛН-1) для этого этапа зафиксированы клиновидные псевдоморфозы малого размера (до 30 см по вертикали), выраженные на всю мощность слабо развитой палеопочвы и заполненные вышележащим лёссовым материалом. Эти структуры сформировались в субаэральных водораздельных условиях.

Обсуждение результатов. При изучении разрезов рыхлых верхнеплейстоценовых отложений Нижнего Поволжья исследователи неоднократно наблюдали различные структуры, для которых предполагалось их криогенное происхождение (Васильев, 1961; Москвитин, 1962; Шкатова, 1975). На изученной территории описанные структуры встречаются в трех генетических типах отложений: аллювиальных, в горизонтах палеопочв лесово-почвенных серий, лёссах. В каждом из этих типов проявление криогенеза различается как масштабами, так и формами структур. Проявление криогенеза в Нижнем Поволжье имеет ряд особенностей (аридные условия, южное расположение территории, влияние трансгрессивно-регрессивной истории Каспийского моря, эволюция р. Волги).

Криогенное происхождение вскрытых в разрезах структур подтверждается как полевыми, так и лабораторными исследованиями. Морфология структур, особенности соотношения вмещающих отложений и заполнителя (четкие границы, заполнение вышележащим материалом, нарушения по верхней границе структур, более широкая верхняя часть структур, изгибы вмещающих отложений на границе структур и вмещающих отложений и сегрегационные отростки) указывают на криогенный характер их формирования. Вмещающими криогенные структуры отложениями являются преимущественно палеопочвы, которые характеризуются более глинистым составом, а следовательно, более влагоемки. В “сухих” лёссах проявление криогенеза отражается в вертикальной отдельности лёссов и их блочной структуре (Feng et al., 2021).

Проведенные лабораторные исследования также подтверждают криогенное происхождение выделенных структур. Для отложений криогенных горизонтов и отдельных структур в них проведен де-

тальный расчет коэффициента криогенной контрастности, который показал, что вмещающие палеопочвы характеризуются более высокими значениями ККК (1.07, 1.13), которые убывают по профилю с глубиной. Это закономерно, поскольку вмещающие отложения проходят через большее количество циклов промерзания-протаивания, а значит испытывают более интенсивное криогенное преобразование. Несмотря на то что лёссовые горизонты сформировались в холодные отложения, характеризуются многочисленными кварцевыми зёрнами со сколами, раковистыми изломами криогенного характера; встречены зёрна, совмещающие в себе первоначальные признаки эоловой обработки, впоследствии подвергнутые криогенному дроблению. Дополнительным аргументом в пользу криогенного генезиса структур в палеопочвах МИС 5 является их микростроение в шлифах, изученное в обнажении Средняя Ахтуба (Makeev et al., 2021). Микротрещины в палеопочвах трех педогенетических уровней (PL 5 – МИС 5a, PL6 – МИС 5c и PL7 – МИС 5e), заполненные пылеватым вскипающим материалом из вышележащих лёссов, особенно хорошо видны на фоне гумусового горизонта в изученных педокомплексах.

Палеогеографические условия развития криогенных этапов Нижнего Поволжья

I этап: в Каспийском регионе в этот период реконструируется завершающая стадия позднехазарской трансгрессии (гирканская стадия). По современным представлениям (Янина, 2012), трансгрессия развивалась во влажную эпоху с обильным стоком рек. Уровень моря несколько превышал современный, воды гирканского бассейна проникали по долине Волги, формируя широкий эстуарий. На территории Восточно-Европейской равнины для второй половины МИС 5 отмечают начало валдайского оледенения: в МИС 5b здесь выделяют II фазу смоленского криогенного этапа (Динамика ландшафтных..., 2002).

II этап: палеогеографические условия развития этого этапа характеризовались развитием валдайского оледенения на Восточно-Европейской равнине. В Нижнем Поволжье этот период также знаменуется существенными изменениями – началом глубокой ательской регрессии Каспийского бассейна, сменой климатических параметров с влажных и относительно теплых (завершение формирования почвы МИС 5a) на холодные, сухие и ветренные (начало формирования лёссовых отложений МИС 4) (Величко, 1973). В это время значительные площади долины реки оказались под воздействием криогенеза и эоловой дефляции.

III этап: на Восточно-Европейской равнине в это время начинается брянский мега-интерстади-

ал – теплый период внутри валдайского оледенения (Динамика ландшафтных..., 2002). В Каспийском море в криогенный этап III, по-видимому, отмечается некоторое повышение уровня, что способствовало проникновению вод в долину Волги и протаиванию мерзлых отложений.

IV этап: для периода МИС 3 с короткими фазами потепления и увлажнения вследствие поднятия уровня Каспия (Янина и др., 2017) характерно увеличение влагосодержания в толще отложений. Русло Волги неоднократно меняло свое положение, что отразилось на появлении палеопочвенных горизонтов в толще аллювия. На Восточно-Европейской равнине в это время фиксируется завершающий этап формирования брянской палеопочвы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1) Строение и морфология структур, распределение коэффициента криогенной контрастности, морфоскопия кварцевых зерен, микростроение отложений подтверждают криогенное происхождение структур в выделенных криогенных горизонтах.

2) Результаты ОСЛ-датирования и корреляция криогенных горизонтов по времени позволили выделить четыре этапа развития криогенеза на территории Нижнего Поволжья в позднем плейстоцене: МИС 5b, при переходе от МИС 5a к МИС 4, МИС 3b/c и МИС 3a.

3) В период формирования лёссов условия были суровыми и холодными, следовательно, криогенез отразился в более глинистых, более влагоемких отложениях, т.е. в палеопочвах. Наиболее суровые условия в Нижнем Поволжье (многолетняя криолитозона) существовали на границе МИС 5a и МИС 4 (II криогенный этап), и нашли отражение во всех изученных разрезах в виде регионально распространенных тонких вертикально протяженных псевдоморфоз (Средняя Ахтуба, Ленинск, Батаевка), а также в виде мешкообразных структур в аллювии (Райгород).

4) Поскольку климатические параметры исследуемого региона достаточно однородны, при реконструкции учитывались местные климатические особенности, состав отложений, влажность и историческое прошлое. Формирование клиновидных криогенных образований в изученных разрезах можно объяснить не морозобойным расстрескиванием, а промерзанием отложений, насыщенным влагой, что подтверждается определениями значений коэффициента криогенной контрастности в затронутых криогенезом горизонтах, указывающих на развитие маломощной мерзлоты.

Проведенные исследования показали перспективность применения методики криолитологического анализа минерального вещества для оценки палеогеографических условий времени их образования. На примере изучения разрезов показано, что, как в пределах многолетней перигляциальной криолитозоны, так и в условиях сезонного промерзания в позднем плейстоцене происходили процессы криогенного преобразования отложений, во многом предопределившие состав и строение отложений ательских свиты Нижнего Поволжья.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 20-55-56046 (абсолютное датирование), в рамках госзаданий географического факультета МГУ № 121051100135-0 (полевые исследования), № 121051100164-0 (криолитологические анализы) и Института географии РАН № АААА-А19-119021990091-4 (палеогеографические исследования). Авторы выражают благодарность с.н.с. МГУ им. М.В. Ломоносова В.Р. Беляеву, зав. кафедрой географии и картографии ВолГУ Д.А. Солодовникову, а также С.А. Федорчуку за помощь в проведении полевых работ. Авторы благодарны анонимным рецензентам, критические комментарии которых позволили существенно улучшить статью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Васильев Ю.М.* (1961). Антропоген Южного Заволжья. М.: Изд-во АН СССР. С. 128.
- Величко А.А.* (1973). Природный процесс в плейстоцене. М.: Наука. С. 256.
- Величко А.А., Морозова Т.Д., Нечаев В.П., Порожнякова О.М.* (1996). Палеокриогенез, почвенный покров и земледелие. М.: Наука. С. 150.
- Величко А.А., Борисова О.К., Кононов Ю.М. и др.* (2017). Реконструкция событий позднего плейстоцена в перигляциальной зоне юга Восточно-Европейской равнины // ДАН. Т. 475. № 4. С. 448–452.
- Динамика ландшафтных компонентов и внутренних морских бассейнов Северной Евразии за последние 130 000 лет. (2002) / А.А. Величко. М.: ГЕОС. С. 296.
- Конищев В.Н.* (1981). Формирование состава дисперсных пород в криолитосфере. Новосибирск: Наука. С. 197.
- Конищев В.Н.* (1999). Эволюция температуры пород арктической зоны России в верхнем кайнозое // Криосфера Земли. Т. III. № 4. С. 39–47.
- Конищев В.Н., Rogov В.В.* (1994). Методы криолитологических исследований. М.: Изд-во МГУ. С. 135.
- Конищев В.Н., Лебедева-Верба М.П., Rogov В.В., Сталина Е.Е.* (2005). Криогенез современных и позднплейстоценовых отложений Алтая и перигляциальных областей Европы. М.: ГЕОС. С. 132.
- Курчатова А.Н., Rogov В.В.* (2020). Методы электронной микроскопии в геокриологии. Тюмень: Изд-во ТИУ. С. 134.

- Межрегиональная стратиграфическая схема квартера территории Российской Федерации (2014) // Дополнение к “Карте четвертичных образований территории Российской Федерации. Масштаб 1:2500000”. СПб: ВСЕГЕИ.
- Москвитин А.И. (1962). Плейстоцен Нижнего Поволжья // Труды ГИН АН СССР. Вып. 64. М.: Изд-во АН СССР. С. 263.
- Попов А.И. (1960). Перигляциальные образования Северной Евразии и их генетические типы // Перигляциальные явления на территории СССР. М.: Изд-во МГУ. С. 10–36.
- Попов А.И. (1967). Лёссовые и лёссовидные породы как продукт криолитогенеза // Вестник МГУ. Серия географическая. № 6. С. 43–48.
- Розенбаум Г.Э. (1985). Покровный палеокриогенный комплекс на севере валдайской перигляциальной зоны // Развитие криолитозоны Евразии в верхнем кайнозое. М.: Наука. С. 4–15.
- Свиточ А.А., Янина Т.А. (1997). Четвертичные отложения побережий Каспийского моря. М.: РАСХН. С. 267.
- Стрелецкая И.Д. (2017). Клиновидные структуры на южном берегу Финского залива // Криосфера Земли. Т. 21. № 1. С. 3–12.
- Сычева С.А. (2012). Палеомерзлотные события в перигляциальной области Русской равнины в конце среднего и в позднем плейстоцене // Криосфера Земли. Т. 16. № 4. С. 45–56.
- Федоров П.В. (1957). Стратиграфия четвертичных отложений и история развития Каспийского моря // Труды ГИН АН СССР. Вып. 10. С. 308.
- Шкатова В.К. (1975). Стратиграфия плейстоценовых отложений низовьев рек Волги и Урала и их корреляция. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Л.: ВСЕГЕИ. С. 25.
- Янина Т.А. (2012). Неоплейстоцен Понто-Каспия: био-стратиграфия, палеогеография, корреляция. М.: Географический факультет МГУ. С. 264.
- Янина Т.А., Свиточ А.А., Курбанов Р.Н. и др. (2017). Опыт датирования плейстоценовых отложений Нижнего Поволжья методом оптически стимулированной // Вестник Московского университета. Серия 5. География. № 1. С. 21–29.
- Buylaert J.P., Jain M., Murray A.S. et al. (2012). A robust feldspar luminescence dating method for Middle and Late Pleistocene sediments // *Boreas*. Vol. 41. P. 435–451.
<https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2012.00248.x>
- Feng L., Zhang M., Jin Zh. et al. (2021). The genesis, development, and evolution of original vertical joints in loess // *Earth Science Reviews*. Vol. 214. 103526.
- Koltringer C., Stevens T., Bradák B. et al. (2020). Environmental study of Late Quaternary environmental evolution in Lower Volga loess sequences, Russia // *Quaternary Research*. P. 1–25.
<https://doi.org/10.1017/qua.2020.73>
- Koltringer C., Bradák B., Stevens T. et al. (2021). Palaeoenvironmental implications from Lower Volga loess – Joint magnetic fabric and multi-proxy analyses // *Quaternary Science Reviews*. Vol. 267. P. 107057.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107057>
- Koltringer C., Stevens T., Linder M. et al. (2022). Quaternary sediment sources and loess transport pathways in the Black Sea – Caspian Sea region identified by detrital zircon U-Pb geochronology // *Global and Planetary Change*. Vol. 209. No. 2. P. 103736.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103736>
- Krinsley D.H., Doornkamp J.C. (1973). Atlas of quartz sand surface textures. Cambridge University Press, Cambridge. P. 91.
- Kurbanov R., Murray A., Thompson W. et al. (2021). First reliable chronology for the early Khvalynian Caspian Sea transgression in the Lower Volga River valley // *Boreas*. Vol. 50. No 1. P. 134–146.
<https://doi.org/10.1111/bor.12478>
- Kurbanov R.N., Buylaert J.-P., Stevens T. et al. (2022). A detailed luminescence chronology of the Lower Volga loess-palaeosol sequence at Leninsk // *Quaternary Geochronology*. Vol. 73. P. 101376.
<https://doi.org/10.1016/j.quageo.2022.101376>
- Makeev A., Lebedeva M., Kaganova A. et al. (2021). Pe-dosedimentary environments in the Caspian Lowland during MIS 5 (Srednaya Akhtuba reference section, Russia) // *Quaternary International*. Vol. 590. P. 164–180.
- Murray A.S., Marten R., Johnston A., Martin P. (1987). Analysis for naturally occurring radionuclides at environmental concentrations by gamma spectrometry // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. Vol. 115. No 2. P. 263–288.
- Railsback L.B., Gibbard P.L., Head M.J. et al. (2015). An optimized scheme of lettered marine isotope substages for the last 1.0 million years, and the climatostratigraphic nature of isotope stages and substages // *Quaternary Science Reviews*. Vol. 111. P. 94–106.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.01.012>
- Taratunina N., Rogov V., Streletskaia I. et al. (2021). Late Pleistocene cryogenesis features of a loess-paleosol sequence in the Srednyaya Akhtuba reference section, Lower Volga River valley, Russia // *Quaternary International*. Vol. 590. P. 56–72.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.12.015>
- Taratunina N.A., Buylaert J.-P., Kurbanov R.N. et al. (2022). Late Quaternary evolution of lower reaches of the Volga River (Raygorod section) based on luminescence dating // *Quaternary Geochronology*. Vol. 72. P. 101369.
<https://doi.org/10.1016/j.quageo.2022.101369>
- Vandenbergh J., French H.M., Gorbunov A. et al. (2014). The Last Permafrost Maximum (LPM) map of the Northern Hemisphere: permafrost extent and mean annual air temperatures, 25–17 ka BP // *Boreas*. Vol. 43. No. 3. P. 652–666.
<https://doi.org/10.1111/bor.12070>
- Vos K., Vandenbergh N., Elsen J. et al. (2014). Surface textural analysis of quartz grains by scanning electron microscopy (SEM): From sample preparation to environmental interpretation // *Earth-Science Reviews*. No. 128. P. 93–104.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.10.013>
- Woronko B., Pisarska-Jamrozy M. (2015). Micro-scale frost weathering of sand-sized quartz grains // *Permafrost and Periglacial Processes*. No. 27. P. 109–122.
<https://doi.org/10.1002/ppp.1855>

CHRONOLOGY AND DEVELOPMENT OF CRYOGENESIS IN LOESS-PALEOSOL SEQUENCE IN THE LOWER VOLGA REGION¹

N. A. Taratunina^{a,b}, V. V. Rogov^{b,c}, I. D. Streletskaya^b, T. A. Yanina^{a,b}, and R. N. Kurbanov^{a,b,#}

^a*Institute of Geography RAS, Moscow, Russia*

^b*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

^c*Tyumen Scientific Centre SB RAS, Tyumen, Russia*

[#]*E-mail: kurbanov@igras.ru*

The article presents the results of studying four sediment sections in the Lower Volga region that containing numerous traces of cryogenesis in Late Pleistocene subaerial deposits, represented by thin vertical wedges in loess and soils, involutions and wedges in alluvial deposits. In order to establish the stages of development and the boundaries of permafrost in the southeast of the East European Plain, morphology of cryogenic structures, morphoscopy and micromorphology of quartz grains were established, the coefficient of cryogenic contrast were calculated, and also absolute dating of deposits was performed. Five stages of cryogenesis development in the Late Pleistocene, which differed in type, scale of distribution, and conditions for the formation of cryogenic structures were established on the studied territory. The processes of cryogenic transformation of sediments occurred due to both seasonal freezing and the long-term development of a perennial permafrost zone. This determined the composition, structure and properties of loess-paleosol sequences and alluvial layers. The results obtained significantly refine the current understanding of the conditions for the formation of the Atelian deposits in the Lower Volga Region and the distribution of permafrost zone in the south of the East European Plain in the Late Pleistocene.

Keywords: loess, paleo-permafrost, mineralogical analysis, coefficient of cryogenic contrast, OSL dating

ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by Russian Foundation for Basic Research grant No. 20-55-56046 (absolute dating), state programs of the Lomonosov MSU 121051100135-0 (field studies), 121051100164-0 (cryolithological analyses) and Institute of Geography RAS No. AAAA-A19-119021990091-4 (palaeogeography studies). The authors are grateful to V.R. Belyaev (Senior Researcher of Lomonosov Moscow State University), to D.A. Solodovnikov (the Head of the Department of Geography of VolSU), as well as S.A. Fedorchuk for the help during the field work. The authors are grateful to the anonymous reviewers, whose critical comments allowed us to improve the article.

REFERENCES

- Buylaert J.P., Jain M., Murray A.S. et al. (2012). A robust feldspar luminescence dating method for Middle and Late Pleistocene sediments. *Boreas*. Vol. 41. P. 435–451. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2012.00248.x>
- Fedorov P.V. (1957). *Stratigrafiya chetvertichnykh otlozhenii i istoriya razvitiya Kaspiiskogo morya* (Stratigraphy of Quaternary deposits and the history of the development of the Caspian Sea). *Trudy GIN AN SSSR*. Vol. 10. Moscow: AN SSSR (Publ.). 308 p. (in Russ.)
- Feng L., Zhang M., Jin Zh. et al. (2021). The genesis, development, and evolution of original vertical joints in loess. *Earth Science Reviews*. Vol. 214. 103526.
- Koltringer C., Bradák B., Stevens T. et al. (2021). Palaeoenvironmental implications from Lower Volga loess – Joint magnetic fabric and multi-proxy analyses. *Quaternary Science Reviews*. Vol. 267. 107057. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107057>
- Koltringer C., Stevens T., Bradák B. et al. (2020). Environmental study of Late Quaternary environmental evolution in Lower Volga loess sequences, Russia. *Quaternary Research*. P. 1–25. <https://doi.org/10.1017/qua.2020.73>
- Koltringer C., Stevens T., Linder M. et al. (2022). Quaternary sediment sources and loess transport pathways in the Black Sea – Caspian Sea region identified by detrital zircon U-Pb geochronology. *Global and Planetary Change*. Vol. 209 (2): 103736. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103736>
- Konishchev V.N. (1981). *Formirovanie sostava dispersnykh porod v kriolitosfere* (Formation of the composition of dispersed rocks in the Cryolithosphere). Novosibirsk: Nauka (Publ.). 197 p. (in Russ.)
- Konishchev V.N. (1999). *Evolutsiya temperatury porod arkticheskoi zony Rossii v verkhnem kainozoe* (Temperature evolution of rocks in the Arctic zone of Russia in the Upper Cenozoic). *Earth's Cryosphere*. Vol. III. No. 4. P. 39–47. (in Russ.)
- Konishchev V.N., Lebedeva-Verba M.P., Rogov V.V., Stalina E.E. (2005). *Kriogenez sovremennykh i pozdnepleistotsenovykh otlozhenii Altaya i periglyatsial'nykh oblastei Evropy* (Cryogenesis of modern and late Pleistocene deposits of Altai and periglacial regions of Europe). M.: GEOS (Publ.). 132 p.
- Konishchev V.N., Rogov V.V. (1994). *Metody kriolitologicheskikh issledovaniy* (Methods of cryolithological research). Moscow: MSU (Publ.). 135 p. (in Russ.)

¹ For citation: Taratunina N.A., Rogov V.V., Streletskaya I.D. et al. (2023). Chronology and development of cryogenesis in loess-paleosol sequence in the Lower Volga Region. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 54. No. 3. P. 49–66 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S2949178923030118>; <https://elibrary.ru/WEPPLC>

- Krinsley D.H., Doornkamp J.C. (1973). Atlas of quartz sand surface textures. *Cambridge University Press*. Cambridge. 91 p.
- Kurbanov R., Murray A., Thompson W. et al. (2021). First reliable chronology for the early Khvalynian Caspian Sea transgression in the Lower Volga River valley. *Boreas*. Vol. 50. No. 1. P. 134–146. <https://doi.org/10.1111/bor.12478>
- Kurbanov R.N., Buylaert J.-P., Stevens T. et al. (2022). A detailed luminescence chronology of the Lower Volga loess-palaeosol sequence at Leninsk. *Quaternary Geochronology*. 73. 101376. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2022.101376>
- Kurchatova A.N., Rogov V.V. (2020). *Electron Microscopy in Geocryology*. Tyumen: TIU (Publ.). 106 p.
- Makeev A., Lebedeva M., Kaganova A. et al. (2021). Pedosedimentary environments in the Caspian Lowland during MIS 5 (Srednaya Akhtuba reference section, Russia). *Quaternary International*. Vol. 590. P. 164–180.
- Mezhregional'naya stratigraficheskaya skhema kvartera territorii Rossiiskoi Federatsii* (Interregional stratigraphic scheme of the quarter of the territory of the Russian Federation). (2014). Supplement to the "Map of Quaternary formations of the territory of the Russian Federation 1:2 500 000". St. Petersburg: VSEGEI.
- Moskvitin A.I. (1962). *Pleistotsen Nizhnego Povolzh'ya* (Pleistocene of the Lower Volga region). Trudy GIN AN SSSR. Vol. 64. Moscow: AN SSSR (Publ.). 263 p. (in Russ.)
- Murray A.S., Marten R., Johnston A., Martin P. (1987). Analysis for naturally occurring radionuclides at environmental concentrations by gamma spectrometry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. Vol. 115. No. 2. P. 263–288.
- Popov A.I. (1960). *Periglyatsial'nye obrazovaniya Severnoi Evrazii i ikh geneticheskie tipy* (Periglacial formations of Northern Eurasia and their genetic types). *Periglacial phenomena on the territory of the USSR*. M.: MGU (Publ.). P. 10–36. (in Russ.)
- Popov A.I. (1967). Loess and loess-like rocks as a product of cryolithogenesis. *Vestnik MSU. Seria 5. Geografiya*. No. 6. P. 43–48. (in Russ.)
- Railsback L.B., Gibbard P.L., Head M.J. et al. (2015). An optimized scheme of lettered marine isotope substages for the last 1.0 million years, and the climatostatigraphic nature of isotope stages and substages. *Quaternary Science Reviews*. Vol. 111. P. 94–106. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.01.012>
- Rozenbaum G.E. (1985). Cover paleocryogenic complex in the north of the Valdai periglacial zone. Development of the Eurasian permafrost zone in the Upper Cenozoic. Moscow: Nauka (Publ.). P. 4–15. (in Russ.)
- Shkatova V.K. (1975). *Stratigrafiya pleistotsenovykh otlozhenii nizov'ev rek Volgi i Urala i ikh korrelyatsiya* (Stratigraphy of Pleistocene deposits in the lower reaches of the Volga and Ural rivers and their correlation). *PhD Thesis*. Leningrad: VSEGEI (Publ.). 25 p. (in Russ.)
- Streletskaia I.D. (2017). Wedge-shaped structures on the southern coast of the Gulf of Finland. *Earth's Cryosphere*. Vol. 21. No. 1. P. 3–12. (in Russ.)
- Svitoch A.A., Yanina T.A. *Chevertichnye otlozheniya poberezhii Kaspiiskogo morya* (Quaternary deposits of the coasts of the Caspian Sea). Moscow: RASKHN (Publ.). 1997. 267 p. (in Russ.)
- Sycheva S.A. (2012). Paleofrost events in the periglacial region of the Russian Plain at the end of the Middle and Late Pleistocene. *Earth's Cryosphere*. Vol. 16. No. 4. P. 45–56. (in Russ.)
- Taratunina N., Rogov V., Streletskaia I. et al. (2021). Late Pleistocene cryogenesis features of a loess-paleosol sequence in the Srednyaya Akhtuba reference section, Lower Volga River valley, Russia. *Quaternary International*. 590. P. 56–72. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.12.015>
- Taratunina N.A., Buylaert J.-P., Kurbanov R.N. et al. (2022). Late Quaternary evolution of lower reaches of the Volga River (Raygorod section) based on luminescence dating. *Quaternary Geochronology*. 72, 101369. <https://doi.org/10.1016/j>
- Vandenberghe J., French H.M., Gorbunov A. et al. (2014). The Last Permafrost Maximum (LPM) map of the Northern Hemisphere: permafrost extent and mean annual air temperatures, 25–17 ka BP. *Boreas*. 43 (3). P. 652–666. <https://doi.org/10.1111/bor.12070>
- Vasil'yev Yu.M. (1961). *Antropogen Yuzhnogo Zavolzh'ya* (Anthropogen of the Southern Trans-Volga region). Moscow: AN SSSR (Publ.). 128 p. (in Russ.)
- Velichko A.A. (1973). *Prirodnyi protsess v pleistotsene* (Natural process in the Pleistocene). Moscow: Nauka (Publ.). 256 p. (in Russ.)
- Velichko A.A. (Ed.). (2002). *Dinamika landshaftnykh komponentov i vnutrennikh morskikh basseinov Severnoi Evrazii za poslednie 130 000 let* (Dynamics of landscape components and inland marine basins of Northern Eurasia over the past 130,000 years). M.: GEOS (Publ.). 296 p. (in Russ.)
- Velichko A.A., Borisova O.K., Kononov Yu.M. et al. (2017). *Rekonstruktsiya sobytii pozdnego pleistotsena v periglyatsial'noi zone yuga Vostochno-Evropейskoi ravniny* (Reconstruction of Late Pleistocene events in the periglacial zone of the south of the East European Plain). *Doklady Akademii nauk*. Vol. 475. No. 4. P. 448–452.
- Velichko A.A., Morozova T.D., Nechayev V.P., Porozhnyakova O.M. (1996). *Paleokriogenez, pochvennyi pokrov i zemledelie* (Paleocryogenesis, soil cover and agriculture). M.: Nauka (Publ.). 150 p. (in Russ.)
- Vos K., Vandenberghe N., Elsen J. et al. (2014). Surface textural analysis of quartz grains by scanning electron microscopy (SEM): From sample preparation to environmental interpretation. *Earth-Science Reviews*. No. 128. P. 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.10.013>
- Woronko B., Pisarska-Jamrozy M. (2015). Micro-scale frost weathering of sand-sized quartz grains. *Permafrost and Periglacial Processes*. No. 27. P. 109–122. <https://doi.org/10.1002/ppp.1855>
- Yanina T.A. (2012). *Neopleystotsen Ponto-Kaspiya: biostratigrafiya, paleogeografiya, korrelyatsiya* (Neopleistocene of the Ponto-Caspian: biostratigraphy, paleogeography, correlation). Moscow: MSU (Publ.). 264 p. (in Russ.)
- Yanina T.A., Svitoch A.A., Kurbanov R.N. et al. (2017). Experience in dating Pleistocene deposits of the Lower Volga region by optically stimulated. *Vestnik MSU. Seria 5. Geografiya*. No. 1. P. 21–29. (in Russ.)