

УДК 551.345.3(470.44/.47)

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ВОЗРАСТЕ И УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ ПОЗДНЕПЛЕЙСТОЦЕНОВОГО КРИОГЕНЕЗА НА ЮГЕ ПРИКАСПИЙСКОЙ НИЗМЕННОСТИ[#]

© 2024 г. Н. А. Таратунина^{1,2*}, В. В. Рогов^{1,3}, И. Д. Стрелецкая¹, Т. А. Янина^{1,2},
А. Н. Курчатова^{3,4}, М. С. Лукьянычева^{1,2}, Р. Н. Курбанов^{1,2}

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

² Институт географии РАН, Москва, Россия

³ Тюменский научный центр СО РАН, Тюмень, Россия

⁴ Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

*E-mail: taratuninana@gmail.com

Поступила в редакцию 30.08.2022 г.

После доработки 13.03.2023 г.

Принята к публикации 28.03.2024 г.

В статье приведены новые данные о разновозрастных криогенных структурах, выявленных в разрезах юга Нижнего Поволжья. На основе комплексного криолитологического анализа подтверждено их криогенное происхождение. Посредством абсолютного датирования методом оптически стимулированной люминесценции определен возраст вмещающих, перекрывающих отложений и заполнителя структур. В лиманно-морских отложениях Нижнего Поволжья установлены четыре этапа криогенеза: I этап ~115–105 тыс. л. н. (КОС-4 и КОС-3), II этап ~90–83 тыс. л. н. (КОС-2), III этап ~47–45 тыс. л. н. (ЧЯ-1), IV этап (КОС-1) ~23–22 тыс. л. н. На юге Прикаспийской низменности, где на протяжении всего позднего плейстоцена существовали в целом аридные условия, решающую роль в развитии криогенеза холодных этапов играли условия увлажнения отложений, определявшиеся геоморфологической позицией разрезов. Проведенные исследования геологически доказывают положение границы максимального распространения криолитозоны позднего плейстоцена для данной территории на 250 км южнее, чем считалось ранее. Новые данные существенно уточняют представления об этапах и масштабах развития криогенеза на юго-востоке Русской равнины, детализируя палеогеографические реконструкции для позднего плейстоцена Прикаспийской низменности.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, Нижнее Поволжье, лёссы, криогенез, коэффициент криогенной контрастности, OSL датирование, палеогеография

DOI: 10.31857/S2949178924020107, **EDN:** PMWLK

1. ВВЕДЕНИЕ

Юг Восточно-Европейской равнины на протяжении четвертичного периода неоднократно становился областью развития многолетней мерзлоты, которая формировалась здесь во времена криохронов (ледниковых эпох) (Динамика ландшафтных..., 2022). Процессы криогенеза сопровождаются развитием в четвертичных отложениях образований различного облика — криогенных структур (КС).

Анализ литературы, посвященной природным процессам в криолитозоне и перигляциальных областях, показывает, что КС весьма разнообразны, как разнообразна и интерпретация их происхождения. При этом следует отметить, что основополагающий термин “криогенез” разными исследователями понимается по-разному. Мерзловеды и криолитологи считают, что криогенез — это комплекс процессов, связанных с понижением температуры пород и появлением в них льда (Тютюнов, 1960; Конышев, Рогов, 1994; Романовский, 1993). В данной работе речь идет о палеокриогенных структурах, которые не содержат в настоящее время льда, но содержали его в прошлом. Поэтому мы основываемся на трактовке криогенеза, предложенной О.В. Макеевым (1974), понимавшим под ним совокупность

[#] Ссылка для цитирования: Таратунина Н. А., Рогов В. В., Стрелецкая И. Д. и др. (2024). Новые данные о возрасте и условиях развития позднеплейстоценового криогенеза на юге Прикаспийской низменности. *Геоморфология и палеогеография*. Т. 55. № 2. С. 191–206. <https://doi.org/10.31857/S2949178924020107>; <https://elibrary.ru/PMWLK>

процессов физического, химического и биологического преобразования почвенной толщи, происходящих вследствие влияния отрицательных температур, т.е. при промерзании почв, пребывании их в промерзшем состоянии и протаивании” (1974, с. 7). Этого же мнения придерживался Э. Д. Ершов (2002), характеризуя криогенное текстурообразование в грунтах как результат процессов, протекающих при их промерзании, в мерзлом состоянии и при оттаивании. Такая трактовка является наиболее приемлемой и для изучения истории развития многолетнемерзлых пород, поскольку изучаемые криогенные структуры в своем существовании прошли две стадии: 1) промерзания и образования льда в отложениях; 2) протаивания, деградации льда и заполнения структуры оттаявшими отложениями. Каждая из стадий оставила свои следы, формируя те или иные черты криогенных структур как в макро-, так и в микромасштабе.

Одним из наиболее интересных районов для изучения истории криогенеза на юге Восточно-Европейской равнины является Прикаспийская низменность. Работы по реконструкции природных условий для Прикаспийской низменности выполнялись многими авторами (Шкатова, 1975; Янина, 2012; Tudryn et al., 2013; Свиточ, 2014). Здесь, в многочисленных естественных обнажениях долины р. Волги, вскрываются различные по форме и генезису структуры предположительно криогенного генезиса (Васильев, 1961; Москвитин, 1962; Шкатова, 1975). Указанные структуры встречаются как в субэразовских отложениях (лёссово-почвенные серии), так и аллювиальных и эстуарно-морских. В последние годы наметился существенный прогресс в характеристике новейших отложений региона и реконструкции палеогеографических условий различных этапов плейстоцена, связанный с применением комплекса современных палеогеографических методов (Болиховская и др., 2017; Költringer et al., 2020; Költringer et al., 2021; Zastrozhnov et al., 2020; Kurbanov et al., 2021).

Для Нижнего Поволжья были опубликованы первые данные о строении КС (Рогов и др., 2020), возрасте их образования (Taratunina et al., 2021), палеогеографических условиях их формирования (Таратунина и др., 2023). При этом основные результаты были получены по КС, обнаруженным в лёссово-почвенных сериях ательской свиты, которые наиболее характерны для северной части Нижнего Поволжья (Költringer et al., 2020). Продолжение этих работ в виде обследования естественных обнажений в долине Волги позволило найти подобные

структуры в разрезах Косика и Черный Яр в южной части Нижнего Поволжья. Изучение этих объектов имеет большое значение для понимания этапов развития природной среды юга Прикаспийской низменности, определения влияния трансгрессивно-регрессивных циклов Каспийского моря на рельеф, а также открывает перспективы для более детальных реконструкций этапов максимального распространения криолитозоны на юго-востоке Восточно-Европейской равнины.

В целях установления закономерностей формирования криогенных структур в различных генетических типах четвертичных отложений Нижнего Поволжья, уточнения этапов развития и границ максимального распространения криолитозоны на территории юго-востока Русской равнины нами охарактеризована морфология криогенных структур, изучены морфоскопия кварцевых зерен и микростроение отложений, рассчитан коэффициент криогенной контрастности, выполнено абсолютное датирование.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

В четвертичное время рельеф Прикаспийской низменности подвергался преобразованию в ходе обширных трансгрессий Каспийского моря, в связи с чем широкое развитие получили отложения морского генезиса (Свиточ, 2014). На юге Нижнего Поволжья выделяются два крупных геоморфологических района — южный и северный, границу между которыми можно условно провести по уступу поверхности с абс. отм. ~ 0 м (Свиточ, 2014). В северном районе разрезами вскрывается строение раннехвалынской морской террасы (абс. отм. 0—45—50 м), отложения которой представлены глинами и суглинками (Янина, 2012). Южный район представляет собой поверхность более низкой позднехвалынской террасы. Равнина осложнена бэровскими буграми, которые чередуются с понижениями, образуя грядовый рельеф. Бэровские бугры сложены песками и грубыми супесями желтой, коричневой и буроватой окраски (бэровской толщей). В рамках настоящего исследования проведены работы на многочисленных естественных обнажениях-обрывах, вскрывающих верхнеплейстоценовые отложения (рис. 1).

В южной части района выделяются значительные по мощности серии разновозрастных отложений каспийских трансгрессивных этапов (бакинский, хазарский, гирканский, хвалынский), а также

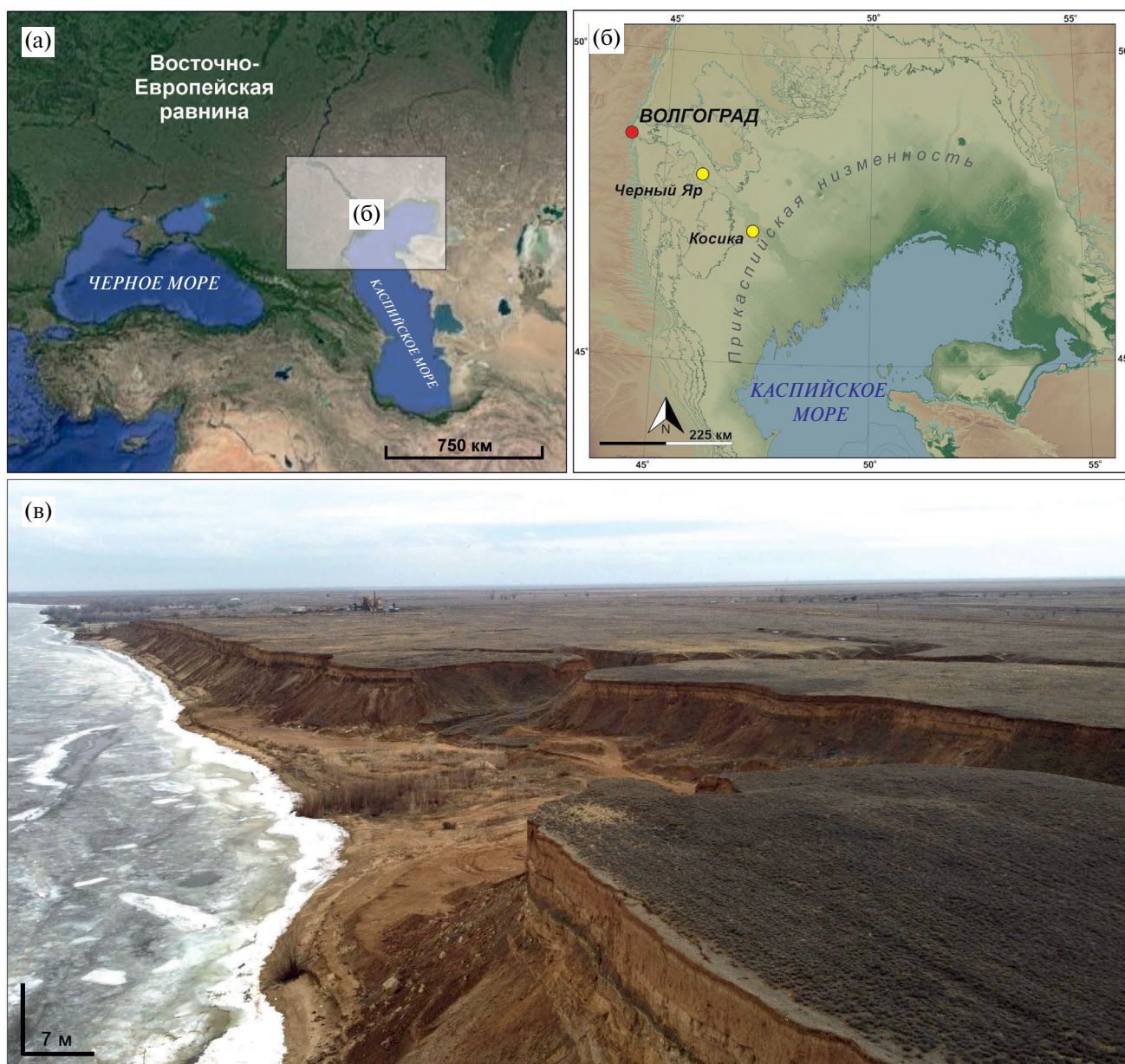


Рис. 1. Район исследований: (а, б) — расположение территории и изученных разрезов; (в) — общий вид местности в районе Черного Яра.

Fig. 1. Studied area: (а, б) — the location of the area and studied sections; (в) — general view on the relief of the southern part of the Lower Volga Region (Chernyy Yar location).

незначительные по мощности и спорадически распространенные горизонты сохранившихся аллювиальных и субаэральных осадков (Янина, 2012). Особенностью седиментогенеза в данном районе является значительное влияние Каспийского моря, выраженное в трансгрессивных аккумулятивных фазах осадконакопления, а также размывах отложений, определивших неполноту геологической летописи.

3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Полевые работы

В ходе полевых работ выполнялся поиск наиболее полных обнажений, содержащих структуры, описанные ранее как криогенные (Федоров, 1957; Васильев, 1961; Москвитин, 1962; Шкатова, 1975; Свиточ, Янина, 1997). Из серии обследованных обнажений выбраны

два, содержащих наиболее выраженные КС: Черный Яр и Косика. Здесь подготовлены расчистки, выполнено детальное послойное описание отложений, измерение морфометрических параметров структур, их фотофиксация и зарисовка, опробование (заполнителя, вмещающих и перекрывающих отложений) на литологические исследования, OSL датирование. Всего в двух разрезах изучено и опробованы породы из семи структур.

3.2. Аналитические исследования

Лабораторное изучение отложений выполнено в Институте криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, на Географическом факультете МГУ, в Институте географии РАН, в Скандинавской лаборатории люминесцентного датирования (Орхусский университет).

Согласно концепции В. Н. Конищева (1981), в криолитозоне в результате разрушения минеральных составляющих отложений формируется особая криогенная организация минерального вещества, выражающаяся в своеобразном распределении его составляющих по гранулометрическому спектру. Для оценки влияния перигляциальных условий на формирование отложений был предложен коэффициент криогенной контрастности (ККК), характеризующий распределение максимального количества основных породообразующих минералов (кварца и полевого шпата) во фракциях крупной пыли (0.05–0.01 мм) и тонкого песка (0.1–0.05), в которых они накапливаются в ходе криогенеза (Конищев, Рогов, 1994). В качестве подготовительной стадии для минералогического анализа использовался метод влажного ситования (для получения крупноалевритовой и тонкопесчаной фракций). Далее образец каждой фракции высушивался, растирался в агатовой ступке и укладывался в кювету для дальнейшей загрузки в дифрактометр для определения минерального состава выделенных фракций. Определение ККК выполнено для 16 образцов с использованием рентгеноструктурного дифрактометра D2 PHASER (Bruker). Для оценки степени криогенной переработки осадка проведен расчет ККК — как для вмещающих отложений, так и для заполнителя структур.

Изучение микростроения отложений проводилось в двух аспектах: 1) изучение микростроения образцов ненарушенного сложения по сколам небольших образцов (0.5–1.0 см³); 2) изучение микротекстурных характеристик поверхности кварцевых зерен по выборке 20 зерен для каждого образца (Таратунина и др., 2023). Последнее обусловлено тем, что морфологические характеристики кварцевых частиц являются важным диагностическим признаком в определении генезиса осадков.

Абсолютное датирование выполнено методом оптически стимулированной люминесценции (OSL) для 5 образцов разреза Черный Яр по методике, описанной в статье (Kurbanov et al., 2021). OSL датирование многократно успешно применялось для определения возраста криогенных структур, путем датирования пород заполнителя структур, перекрывающих и подстилающих отложений (Buylaert et al., 2009; Вольвах и др., 2021). Результаты люминесцентного датирования разреза Косика опубликованы в работе (Butuzova et al., 2022). Все измерения выполнены по навескам зерен кварца и калиевого полевого шпата на стальных дисках (8 мм в диаметре для кварца и 2 мм для полевых шпатов) на стандартном ТЛ/OSL ридере Risø, модель DA-20, оснащенном калиброванным бета-источником изотопа стронция-90. Концентрации радионуклидов в отложениях измерены с помощью гамма-спектрометра высокого разрешения. Надежность полученных датировок определялась на основе сравнения трех протоколов и датировок по кварцу и по калиевым полевым шпатам (Курбанов и др., 2022). Применение абсолютного датирования позволило установить хронологию этапов развития криогенеза.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разрез Черный Яр (рис. 1, (б); 2) расположен в 1 км южнее одноименного села (Н_{абс} 4.5 м, координаты 48.0321° N, 46.1116° E) в песчаном карьере на правом берегу р. Волги. В строении разреза выделяются субэральные, аллювиальные и морские пачки отложений. Ниже современной почвы (слой 1) залегает палеопочва глинистого состава (слой 2). Ниже (слои 3–6) — пески различного состава: с косой слоистостью и без слоистости, слой 5 насыщен раковинами каспийских моллюсков (*Didacna protracta*, *D. trigonoides*, *Dreissena rostriformis*) (Свиточ, Янина, 1997). Слои 7–8 представлены тонкодисперсными пойменными отложениями и осадкам мелководного бассейна. Их переход в залегающую ниже мощную толщу руслового аллювия (слой 11) подчеркнут горизонтом плотного сцементированного песка (слои 9–10). Нижняя часть разреза представлена толщей аллювия — горизонтом черной свиты Нижнего Поволжья (слой 11), в котором выделяется несколько слоев и многочисленные костные остатки крупных сухопутных животных (*Mammuthus trogonterii chosaricus*, *Equus caballus chosaricus* и др.) (Свиточ, Янина, 1997).

В разрезе Черный Яр вскрыты многочисленные структуры предположительно криогенного генезиса (рис. 2). Они присутствуют на протяжении всего

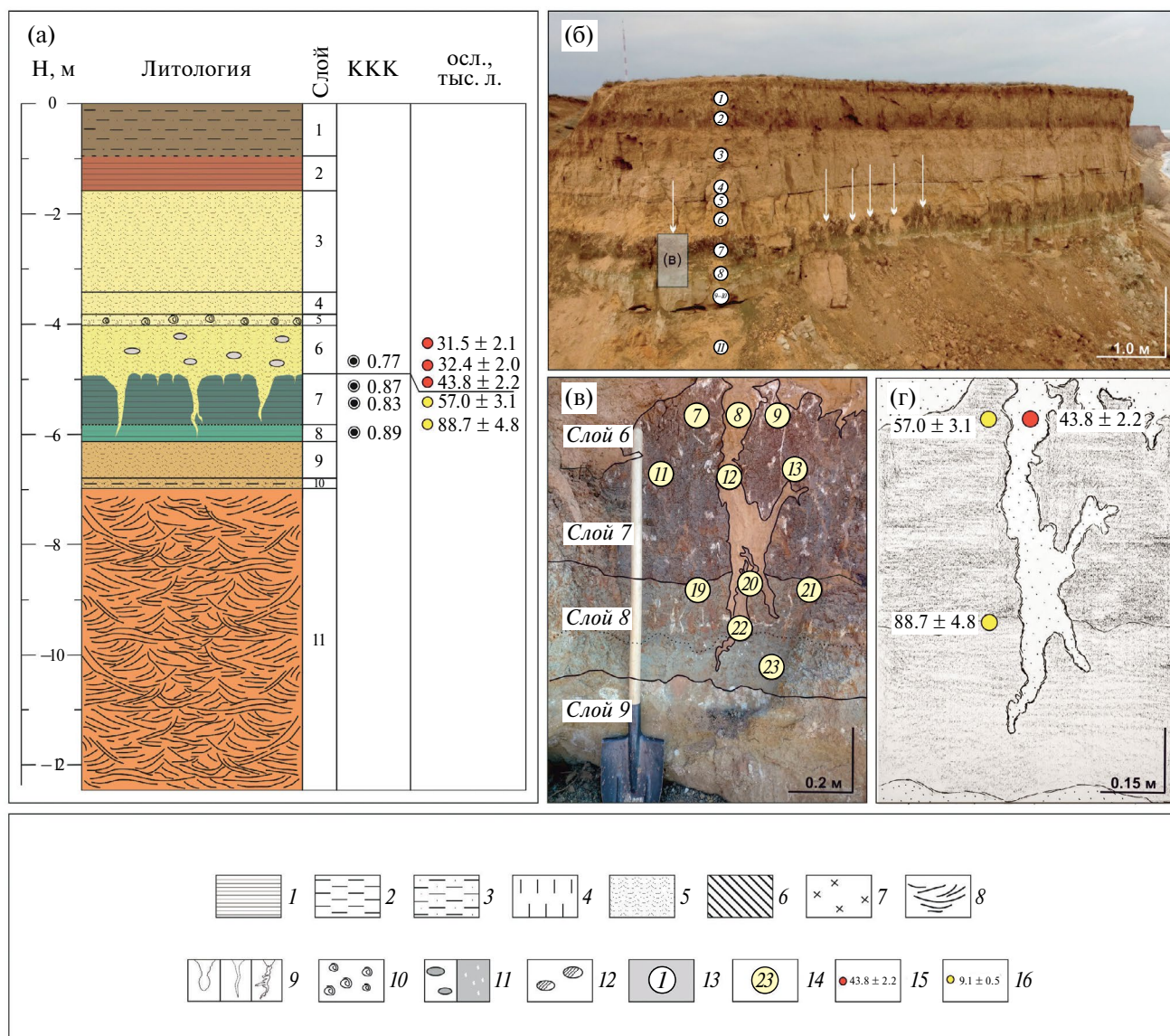


Рис. 2. Разрез Черный Яр: (а) — схема разреза с результатами расчета коэффициента криогенной контрастности, OSL датирования, цвет отложений отражает естественный цвет осадка; (б) — общий вид (белые стрелки указывают на кровлю исследованных структур); (в) — опробованная структура (номера обозначены точки отбора образцов для литологического анализа); (г) — зарисовка опробованной структуры с результатами OSL датирования отложений.

1 — глина; 2 — суглинок; 3 — супесь; 4 — лёсс; 5 — песок; 6 — переотложенный осадок; 7 — палеопочвы; 8 — слоистость; 9 — структуры по типу криогенных; 10 — малакофауна; 11 — карбонаты (конкреции и примазки); 12 — кротовины; 13 — номера слоев; 14 — точки отбора образцов на литологические анализы; 15 — возраст OSL, тыс. л. (заполнитель структур и перекрывающих отложений); 16 — возраст OSL, тыс. л. (вмещающие отложения).

Fig. 2. Chernyy Yar section: (a) — the scheme of the section with the coefficient of cryogenic contrast, OSL dating results, the color of the deposits reflects the natural color of the sediments; (б) — general view (white arrows show studied structures); (в) — sampled structure (numbers indicate sampling points for lithological analysis); (г) — sketch of the sampled structure with the results of OSL dating.

1 — clay; 2 — loam; 3 — sandy loam; 4 — loess; 5 — sand; 6 — redeposited sediment; 7 — paleosols; 8 — stratification; 9 — cryogenic-like structures; 10 — malacofauna; 11 — carbonates (concretions and admixtures); 12 — krotovinas; 13 — layers numbers; 14 — sampling points for lithological analyses; 15 — OSL age, ka (structures filler and overlying sediments); 16 — OSL age, ka (enclosing sediments).

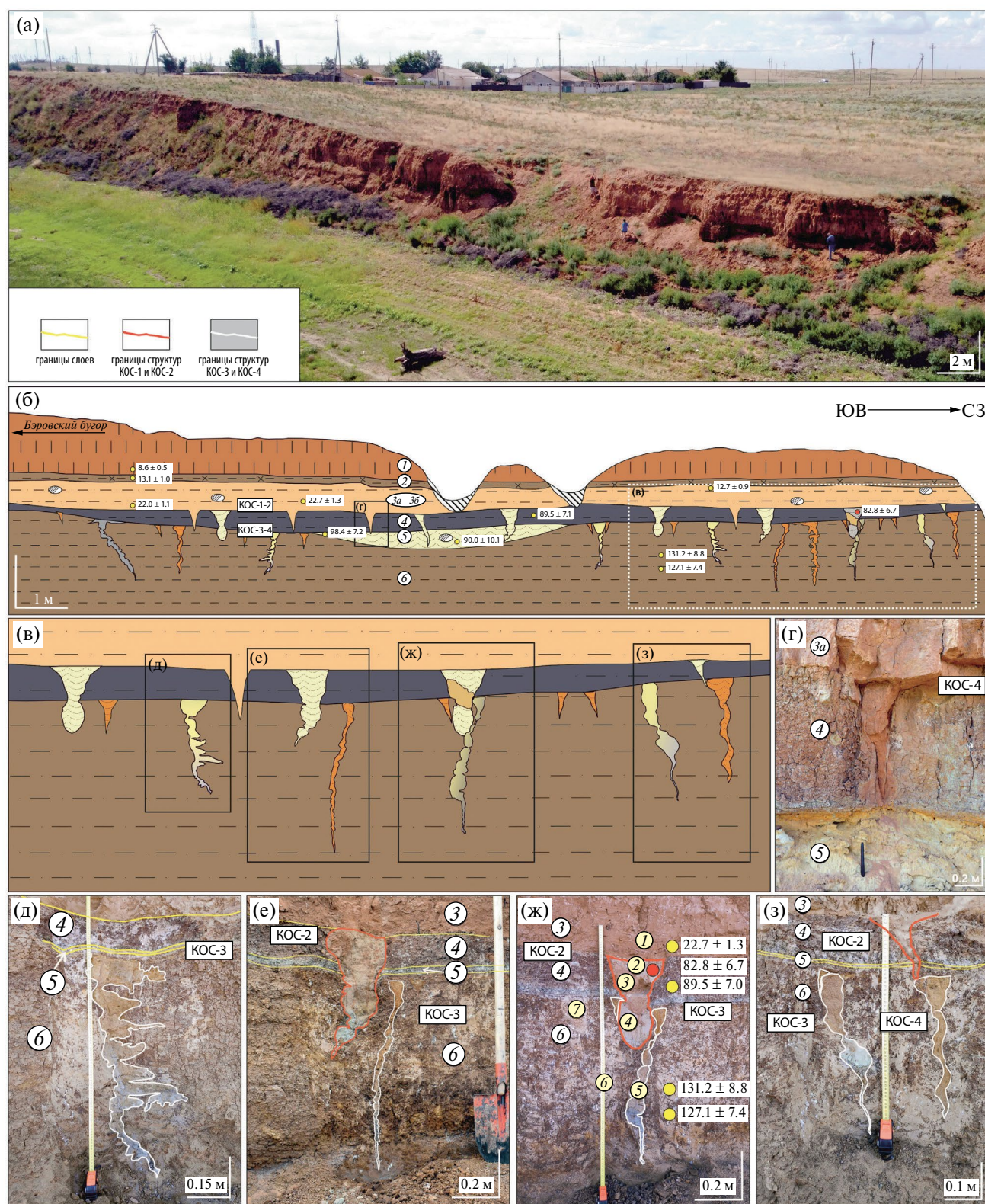


Рис. 3. Разрез Косика: (а) — общий вид; (б) — схема разреза (по Butuzova et al., с изменениями); (в) — фрагмент с рис. 3, (б); (г) — клиновидная структура горизонта КОС-1; (д) — структура горизонта КОС-3 с горизонтальными отрогками; (е) — клиновидная, заполнена бежевым песком, структура горизонта КОС-2 (красный контур) и тонкая, длинная, заполнена рыжим песком (белый контур) структура КОС-4; (ж) — мешкообразная структура КОС-2 (красный контур), наложенная на структуру КОС-3, а также результаты датирования отложений; положение дат показано по горизонтам условно; (з) — структуры КОС-2 (красный контур), КОС-3 (слева, хвостовая

обнажения, где заложен разрез, а также в различных стенках карьера к югу и северу. В работе (Шкатова, 1975) эти структуры описаны как “сингенетичные мерзлотные деформации в пойменном аллювии” и “щельники, выполненные ахтубинскими песками”. Деформации расположены на расстоянии до 1.5 м друг от друга и имеют неровные границы, различную форму и вертикальную протяженность. Изучена и опробована одна из псевдоморфоз клиновидной формы вертикальной протяженностью ~1.2 м (рис. 2, (в)). Раскрытие по верху у нее составляет 10 см, однако ниже структура расширяется до 20 см, а в центральной части сужается с разделением на два ветвящихся хвоста. Вмещающие отложения (слой 7) представлены глинами с сетчатой, предположительно, посткриогенной текстурой и следами почвообразования в верхних 30 см. Перекрывающие отложения и слагающие собственно тело жилы, представляют собой песок среднезернистый (слой 6). Границы структур четкие. Размеры структур различны: некоторые из них меньше (40—60 см по вертикали, тонкие), другие крупнее и шире и имеют воронкообразную форму.

Разрез Косика (рис. 1, (б); 3) расположен на правом берегу р. Волги, в 500 м к северо-западу от одноименного села ($H_{абс}$ 1.0 м, 47.0993° N, 47.2043° E), и является самым южным обнажением, в котором встречены криогенные структуры в Нижнем Поволжье. Разрез вскрывает строение бэровского бугра и отражает историю Нижнего Поволжья в хвалынскую (слои 1—3) и позднехазарскую (слои 6—7) эпохи (Butuzova et al., 2022), между которыми наблюдается перерыв в осадконакоплении. Молодые (хвалынские) осадки представлены красноватыми супесями, в то время как более древние (хазарские) слои характеризуются суглинистым и глинистым составом отложений с высоким содержанием гипса. В разрезе Косика вскрываются весьма разнообразные и сложные структуры по типу псевдоморфоз, образующие несколько горизонтов по времени формирования и по положению с вышележащими и нижележащими отложениями.

Первый горизонт структур (КОС-1), берущих начало на границе слоев 3а и 4 и секущих слой 4, представлен клиновидными формами до 50 см по вертикали, с четкими границами и заполнителем из рыжего сцементированного материала слоя 3а — раннехвалынских осадков (рис. 3, (г)).

Структуры *второго* горизонта (КОС-2) также берут начало под красновато-коричневой супесью (слой 3), секут нижележащий горизонт плотной супеси (слой 4) и тонкий прослой желтого песка (слой 5). Однако, в отличие от КОС-1, внедряются в плотную коричневую супесь слоя 6 (рис. 3, (е, ж, з), красный контур); хвост таких структур заполнен однородным сцементированным среднезернистым бежевым песком с голубым оттенком, а в верхней части — рыхлым бежевым песком. Одни структуры горизонта КОС-2 имеют клинообразную форму (например, рис. 3, (е)), другие — четкую мешкообразную форму с округлым нижним краем, заполнены рыхлым бежевым песком (рис. 3, (ж)); иногда псевдоморфозы нарушены кротовинами. Как видно из рис. 3, (ж), псевдоморфоза наложена на структуры нижних криогенных горизонтов. Границы описанных структур с вмещающими отложениями четкие; материал заполнителя отсутствует выше в разрезе. Вертикальная протяженность структур КОС-2 40—60 см, горизонтальная — 25—30 см.

Клиновидные структуры *третьего* (КОС-3) и *четвертого* (КОС-4) горизонтов берут начало на 2 см ниже верхней границы слоя 6 и представлены псевдоморфозами различной конфигурации. Структуры КОС-3 имеют вертикальную протяженность 60—65 см, ширину до 25 см; заполнены в верхней части рыхлым бежевым песком, в хвостовой — серо-голубым сцементированным песком (рис. 3, (д, з)); границы четкие, неровные, извилистые, иногда — с горизонтальными отростками (рис. 3, (д)). Всего в стенке вскрыто четыре таких структуры; материал одной из них полностью окрашен в сине-серый цвет. Материал заполнителя выше в разрезе отсутствует. Структуры КОС-4 представлены псевдоморфозами с четкими границами, выраженной клиновидной



часть сцементирована) и КОС-4 (справа), заполненные рыхлым песком. Цвет на схемах отражает естественный цвет осадка. Усл. обозначения на рис. 2.

Fig. 3. The Kosika section: (a) — general view; (б) — section scheme (according to Butuzova et al., with additions); (в) — fragment from fig. 3, (б); (г) — wedge-shaped structure of КОС-1 horizon; (д) — structure of horizon КОС-3 with horizontal schliers; (е) — wedge-shaped structure filled with beige sand of КОС-1 horizon (red outline), and thin, long structure filled with red sand (white outline) of КОС-4 horizon; (ж) — bag-shaped structure of КОС-2 (red outline) inflicted on the structure of КОС-3, also the results of OSL dating of the deposits of the Kosika section, the position of dates is shown by horizons conditionally; (з) — structures of КОС-3 (left) and КОС-4 (right) filled with loose sand, the tail of the left one is cemented. The color in the schemes reflects the natural color of the sediments. Symbols are in fig. 2.

формой; заполнены рыжим среднезернистым песком, отсутствующим выше в разрезе (рис. 3, (е, з)). Структуры тонкие, извилистые, 15—30 см по вертикали, 7—10 см в широкой части. Структуры разреза Косика выделены в отдельные горизонты ввиду различий в форме границ, вертикальной протяженности и заполнителя.

4.1. Абсолютный возраст

Для разреза Черный Яр получено пять OSL дат (Таратунина, 2022). Три из них позволяют зафиксировать время формирования структур в разрезе (ЧЯ-1). Возраст верхней части отложений слоя 6 (вмещающие отложения, образец № 7 на рис. 2, (в)) определен в 57.0 ± 3.1 тыс. л. н.; для перекрывающих жилу отложений (слой 6) получена дата 32.4 ± 2.0 тыс. л. н.; возраст заполнителя жилы (образец № 8 на рис. 2, (в)) определен в 43.8 ± 2.2 тыс. л. н. Голубые глины слоя 8 датируются 88.7 ± 4.8 тыс. л. н. Для определения возраста структур разреза Косика использованы полученные ранее результаты (Butuzova et al., 2022). Датирование для обоих разрезов выполнялось по единой методике, описанной в (Butuzova et al., 2022), где приведено и обоснование надежности результатов.

Микростроение вмещающих, перекрывающих отложений и заполнителя КС разреза Черный Яр изучено с применением сканирующей электронной микроскопии. Особое внимание уделялось таким параметрам частиц, как форма и рельеф поверхности кварцевых зерен, которые несут признаки их перемещения различными природными агентами, обработки и накопления в определенных условиях (наличие сколов, включения агрегатов, органические и минеральные примеси). Верхняя часть вмещающих отложений (слой 7) разреза Черный Яр характеризуется присутствием остатков растений, наличием пор диаметром 0.4 мм с уплотненными стенками.

Морфология кварцевых зерен разреза Черный Яр верхней части слоя 7 (зона интенсивного преобразования) разнообразна: встречаются угловатые частицы с раковистыми сколами (рис. 4, (а, б)), параллельными бороздами (рис. 4, (в)), белыми стрелками), свежими и сглаженными поверхностями (рис. 4, (в, г)); в то же время присутствуют изометричные окатанные зерна с поверхностью, покрытой многочисленными равномерно распределенными ямками, а также вытянутые зерна. На кварцевых частицах, помимо раковистых сколов, присутствуют следы травления (рис. 4, (д)). Агрегаты представлены дру-

зами и кристаллами карбоната кальция (рис. 4, (е)). Отложения слоя 8 (зона хвостовой части криогенной структуры) характеризуются зернами со сглаженными гранями, на некоторых присутствуют бороздки, заполненные повторно осажденным кремнием, на других — следы травления. Отложения слоя 6, формирующие тело структуры, характеризуются более округлыми зернами кварца со следами травления, серповидными бороздками.

В разрезе Косика горизонты со структурами залегают один над другим, и в целом вмещающими отложениями служат одни и те же слои, хотя заполнитель структур выше в разрезе отсутствует (за исключением КОС-1). Следовательно, отложения, являющиеся источником материала, который заполнил структуры, был денудирован. Отложения слоя 6 (рис. 3, (ж), образцы № 6, 7 на желтом фоне) представлены тонкодисперсной фракцией с большим количеством агрегатов; встречаются остроугольные зерна кварца (рис. 5, (а)). В песчаных отложениях, формирующих тело псевдоморфоз (рис. 3, (ж), образцы № 2—5), морфология кварцевых частиц представлена преимущественно хорошо окатанными (рис. 5, (б)) и изометричными зернами с ямчатым рельефом (рис. 5, (в)), в плотной рубашке; некоторые зерна остроугольные, со сколами (рис. 5, (г)). Присутствуют агрегаты, центральная часть которых сложена тонкой фракцией, а периферийные части — более крупной (рис. 5, (д)). Присутствуют друзы целестина и иголки кальцита как на поверхности, так и в виде отдельных сростков, микроконкреции железа (рис. 5, (е)) и микродрузы циркона.

Расчет коэффициента криогенной контрастности (ККК) для отложений разреза Черный Яр показывает значения менее единицы: для песчаных отложений слоя 6 и заполнителя псевдоморфозы коэффициент составляет 0.77; слои 7—8 (вмещающие структуры отложения) характеризуются значениями 0.83—0.89.

Для разреза Косика ККК рассчитан для вмещающих и заполняющих псевдоморфозы отложений (12 образцов). Для слоев 1—3 значения коэффициента находятся в пределах 0.84—0.95. В нижней части разреза (слои 4—6), где заключены все криогенные структуры, значения ККК составляют около или более 1: в слое 4 отмечается самое высокое значение коэффициента по всему разрезу — 1.13. В слое 5 значение коэффициента составляет 0.90; для нескольких образцов вдоль верхней границы слоя 6 — более единицы (1.01—1.07), в то время как нижние горизонты слоя 6 характеризуются коэффициентом менее единицы и убывают с глубиной.

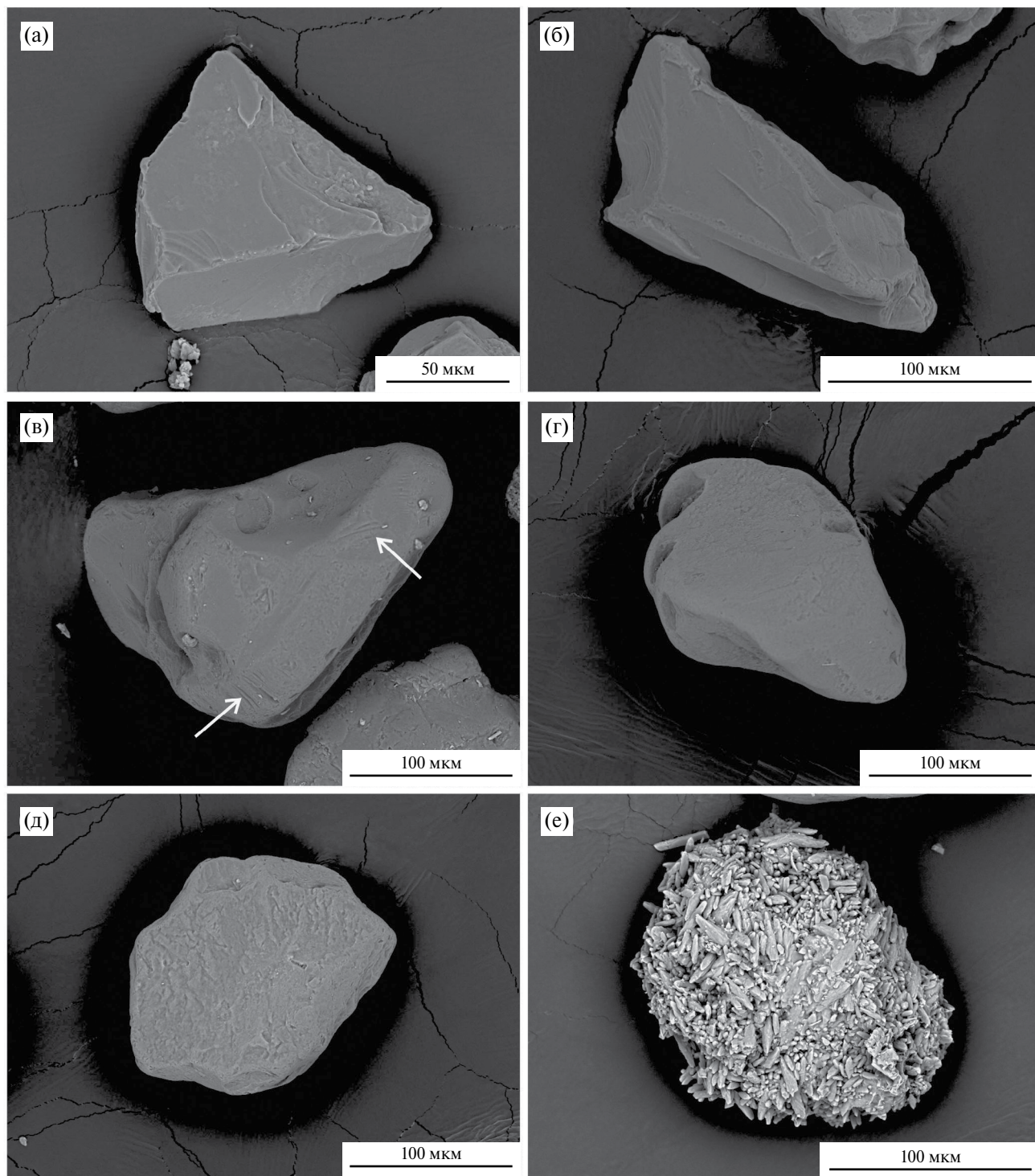


Рис. 4. Морфология кварцевых зерен и агрегатов вмещающих псевдоморфозу отложений (слои 7–8) разреза Черный Яр: (а) — угловатое зерно с раковистыми сколами; (б) — зерно со сколами и свежей поверхностью; (в) — угловатое зерно со сглаженными углами и параллельными бороздами (белые стрелки); (г) — вытянутое зерно со сглаженными гранями; (д) — следы травления на поверхности зерен; (е) — агрегат, сложенный кальцитом.

Fig. 4. Morphology of quartz grains and aggregates of deposits that enclosing ice-wedge casts (layers 7–8), Chernyy Yar section: (a) — angular quartz grain with conchoidal chips; (б) — grain with chips and a fresh surface; (в) — angular grain with smoothed angles and parallel grooves (white arrows); (г) — elongated grain with smooth edges; (д) — traces of etching on the grain surface; (е) — calcite aggregate.

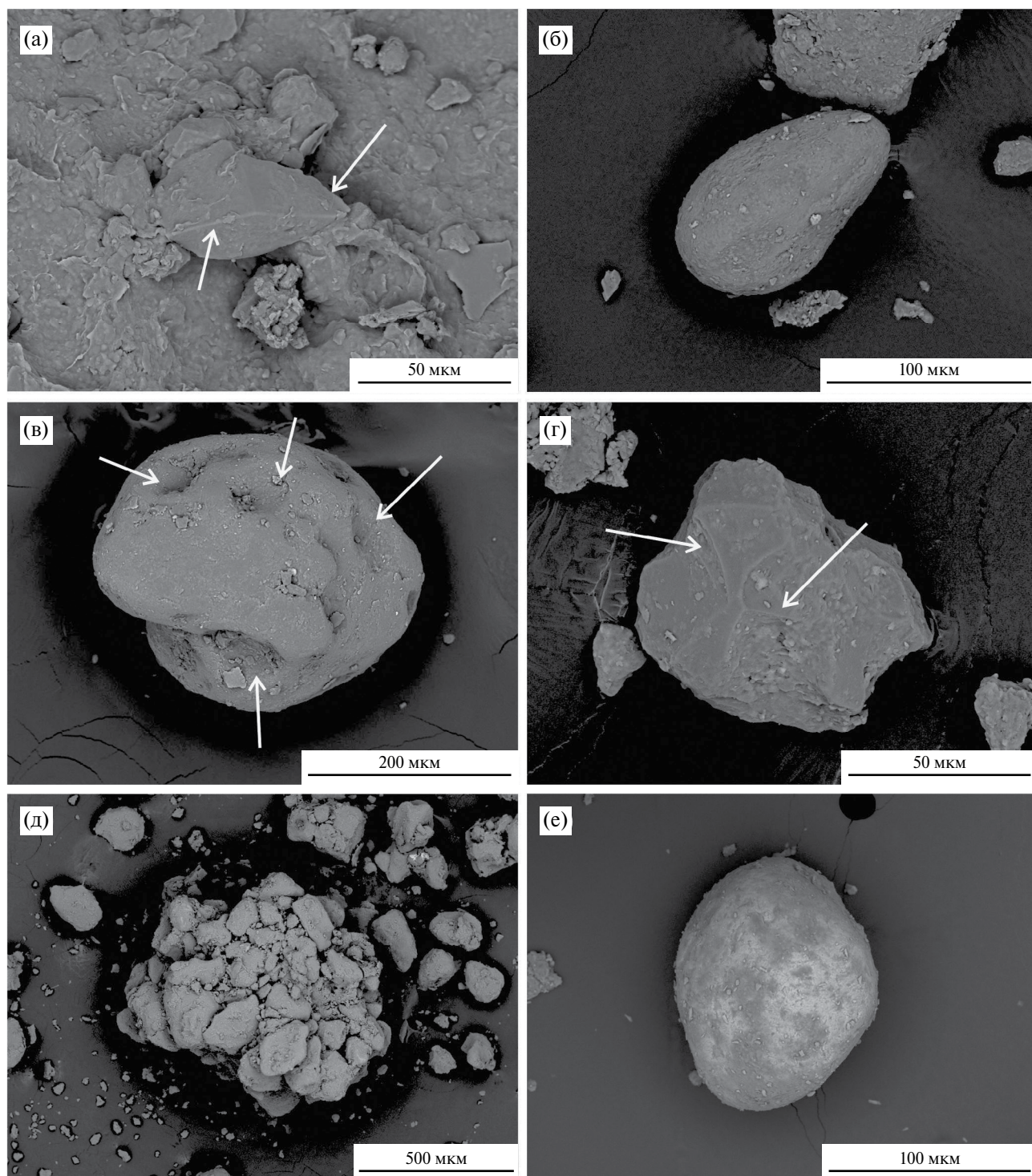


Рис. 5. Морфология кварцевых зерен отложений разреза Косика: (а) — угловатое кварцевое зерно (слой 7); (б) — продолговатое хорошо окатанное зерно (отложения псевдоморфозы с рис. 3, (д)); (в) — зерно кварца с ямчатым рельефом (отложения псевдоморфозы с рис. 3, (з)); (г) — кварцевое зерно со сколами (отложения псевдоморфозы с рис. 3, (з)); (д) — агрегат с частицами разного гранулометрического состава (псевдоморфоза с рис. 3, (з)); (е) — железистая конкреция (псевдоморфоза рис. 3, (д)).

Fig. 5. Morphology of quartz grains of the Kosika section: (a) — angular quartz grain (layer 7); (б) — elongate, well-rounded grain (from ice-wedge cast deposits, fig. 3, (д)); (в) — quartz grain with pits (from ice-wedge cast deposits, fig. 3, (з)); (г) — quartz grain with chips (from ice-wedge cast deposits, fig. 3, (з)); (д) — aggregate with particles of different size (from ice-wedge cast deposits, fig. 3, (з)); (е) — ferruginous nodule (pseudomorphosis from fig. 3, (д)).

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Флуктуации уровня Каспийского моря наравне с малыми уклонами поверхности Прикаспийской низменности способствовали широкому развитию лагун и лиманов на данной территории (Бадюкова, 2021). Выделенные в разрезах Черный Яр и Косика структуры зафиксированы в лиманно-морских отложениях. Структуры, получившие развитие в данном типе отложений, отличаются большими размерами по сравнению с зафиксированными в лёссово-почвенных сериях, и представлены заключенными в глинистых отложениях клиновидными и мешкообразными псевдоморфозами вертикальной протяженностью 30—130 см, а также псевдоморфозами мощностью до 65 см с горизонтальными отроостками.

Морфология изученных структур, особенности соотношения вмещающих отложений и заполнителя (четкие границы, заполнение вышележащим материалом, более широкая верхняя часть структур, сегрегационные отроостки, сетчатое организация структур при горизонтальной зачистке) указывают на криогенный характер их формирования.

Структуры разреза Косика берут начало на границе слоев 3/4 и 5/6, поэтому для оценки времени их формирования было важно определить возраст отложений вблизи границ указанных слоев.

Имеющиеся данные указывают на время формирования слоя 6 в МИС 5e (даты 127.1 ± 7.4 и 131.2 ± 8.8), а накопление отложений слоев 4 и 5 происходило в один цикл развития палеолагун в МИС 5c или 5b (даты 98.4 ± 7.2 , 90.0 ± 10.1 и 89.5 ± 7.0). Исходя из этих данных время формирования структур КОС-4 и КОС-3, расположенных в кровле слоя 6, наиболее логично соотнести с фазой похолодания МИС 5d ($115—105$ тыс. л. н.).

Формирование структур двух горизонтов произошло в период осушения территории, при переходе к субаэральному осадконакоплению: сформировались клиновидные псевдоморфозы вертикальной протяженностью до 30 см, в настоящее время заполненные рыхлым рыжим песком (КОС-4); псевдоморфозы мощностью до 65 см с горизонтальными отроостками, заполненные в верхней части также рыжим песком, а в хвостовой — сцементированным серо-синим песком (КОС-3). Заполнитель структур отсутствует выше в разрезе. Более детальное подразделение этапов криогенеза возможно в будущем при увеличении количества датировок.

Формирование структур этих горизонтов, вероятно, происходило при разных гидроморфных условиях: малые размеры и высокая степень ожелезнения заполнителя свидетельствуют о меньшей

увлажненности и существовании окислительных условий (КОС-4), в то время как в КОС-3 структуры отличаются большими вертикальными размерами, наличием горизонтальных шпиров, неровными границами, сцементированным материалом и потемнением в хвостовой части.

Интересны результаты расчета ККК, которые для верхней части позднехазарских осадков (слой 6) составляют $0.93—1.13$, что соответствует представлениям о многократном циклическом промерзании-протаивании отложений либо существовании маломощной многолетней мерзлоты. ККК для нижней части слоя 6 характеризуется меньшими значениями (0.89), что свидетельствует о меньших количествах циклов промерзания-оттаивания для этого уровня отложений. Таким образом, наблюдается интенсивное криогенное преобразование верхней части толщи морских осадков, убывающее с глубиной.

Для горизонта КОС-2 описаны мешкообразные псевдоморфозы с однородным песчаным заполнителем, отсутствующим выше в разрезе. Структуры вертикальной протяженностью до 40 см внедряются в толщу плотных супесей (слой 4). По песчаному материалу заполнителя одной из структур (рис. 3, ж)) получена дата 82.8 ± 6.7 тыс. л. н. Также получена дата по вмещающим отложениям (слой 4) — 89.5 ± 7.0 тыс. л. н. Таким образом, заполнение криогенных структур произошло не позднее ~ 82 тыс. л. н., что позволяет говорить о времени формирования структур верхнего горизонта КОС-1 на этом участке в период $\sim 83—90$ тыс. л. н., что, с учетом доверительных интервалов, укладывается в завершающий этап похолодания морской изотопной стадии МИС 5b (Raisback et al., 2015).

Структуры горизонта КОС-1 секут толщу слоя 4 и заполнены материалом вышележащего слоя 3a, для нижней части которого получены даты 22.7 ± 1.3 и 22.0 ± 1.1 тыс. л. В связи с этим мы оцениваем время формирования криогенных структур КОС-1 в $\sim 23—22$ тыс. л. н.

Для отложений криогенных горизонтов разреза Косика и отдельных структур в них проведен расчет коэффициента криогенной контрастности, который показал, что вмещающие отложения характеризуются более высокими значениями ККК (до 1.13), которые убывают по профилю вмещающих структуры отложений с глубиной. Это закономерно, поскольку вмещающие отложения проходят через большее количество циклов промерзания-протаивания, а значит испытывают более интенсивное криогенное преобразование. Морфология кварцевых зерен также несет в себе следы криогенного воздействия: вмещающие

отложения характеризуются многочисленными кварцевыми зернами со сколами, раковистыми изломами криогенного характера; присутствует большое количество агрегатов. Заполнитель структур представлен преимущественно хорошо окатанными песчаными зернами со следами эолового переноса, в плотной “рубашке”. Последнее свидетельствует о нахождении материала в водной среде, вероятно, после осадконакопления.

В разрезе Черный Яр выделен один горизонт со структурами (ЧЯ-1), выраженный в виде псевдоморфоз мощностью до 1.3 м, с неровными границами, ответвлениями в хвостовой части и заполнением вышележащим песчаным материалом. Структуры нарушают верхнюю часть слоя 7 с признаками почвообразования, которые свидетельствуют о начале осушения бассейна в завершающую стадию формирования этого горизонта с образованием дневной поверхности и развитием гидроморфной палеопочвы. По результатам датирования разреза Черный Яр можно сделать вывод, что до ~57—55 тыс. л. н. на данной территории существовал бассейн эстуарного типа (накопление отложений горизонтов 7—8). Даты верхней части слоя 7 (57.0 ± 3.1 тыс. л. н.) и заполнителя структур (43.8 ± 2.2 тыс. л. н.) позволяют отнести время формирования структур к ~43 тыс. л. н., т.е. к периоду похолодания МИС 3b, когда на низких геоморфологических уровнях, на участках с повышенным увлажнением существовали условия для формирования мерзлых пород. Наиболее вероятным механизмом заполнения песком протаявших клиньев является эоловый перенос. Так как сам факт существования мерзлоты фиксирует дневную поверхность на этом участке, предположить попадание песчаных частиц склоновыми процессами в равнинной Прикаспийской низменности, либо в результате аллювиальных и прибрежно-морских процессов, которые бы деформировали поверхность слоя, измятого криогенезом, не представляется возможным. Даже если песчаный материал и поступал с ближайших морских, либо речных пляжей, либо потенциальных склоновых чехлов, последним агентом транспорта должен был быть эоловый перенос, что позволяет считать датировку по заполнителю, с учетом особенностей OSL датирования, наиболее надежной.

Изучение в разрезе Черный Яр микростроения вмещающих и формирующих псевдоморфозу отложений горизонта со структурами показало, что кварцевые зерна имеют как признаки криогенной переработки (угловатый облик, сколы на поверхности), так и сохранили признаки обстановок седиментации (изометричную и окатанную эоловую

форму, сглаженные грани, мелкоямчатый рельеф, серповидные бороздки водной обработки). Значения ККК для криогенного горизонта значительно ниже единицы, что, при условии существования мелководного бассейна и высокой влажности отложений (ввиду глинистого состава), свидетельствуют о малых количествах циклов промерзания-протаивания, через которые прошли вмещающие отложения. Вероятно, произошел быстрый переход от субэкральных условий, в которых формировались криогенные структуры, к лиманно-морскому осадконакоплению и перекрытию существовавших криогенных структур водой.

Таким образом, в увлажненных (пойменных или периодически осушаемых лагунных) условиях, происходило промерзание-протаивание, что привело к формированию вертикальных и горизонтальных шлиров льда. В разрезе Косика, ввиду его особого геоморфологического положения (на низких уровнях), определявшего повышенное увлажнение, мы наблюдаем четыре криогенных горизонта, часть из которых не имела регионального значения, а формировалась в результате слабых и непродолжительных этапов промерзания увлажненных отложений. Вмещающие отложения носят признаки криогенной переработки (сетчатая текстура, кварцевые зерна остроугольной формы со сколами, высокая агрегированность частиц), в то время как заполнитель представлен хорошо окатанными изометричными зернами.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное комплексное изучение строения двух опорных разрезов в южной части Нижнего Поволжья позволило подтвердить криогенное происхождение многочисленных КС и выделить четыре криогенных этапа. На основании полученных материалов о строении криогенных структур, анализа распределения коэффициента криогенной контрастности, литологической характеристики отложений выполнена реконструкция условий их формирования в позднем плейстоцене. Осадконакопление здесь происходило при интенсивном влиянии Каспийского моря, и, следовательно, в условиях большей увлажненности отложений, чем в других участках Прикаспийской низменности. В связи с этим структуры, получившие развитие в исследованном районе (Косика, Черный Яр), отличаются большими размерами по сравнению с теми, что зафиксированы в лёссово-почвенных сериях, и представлены клиновидными и мешкообразными псевдоморфозами в лиманно-морских отложениях.

Новые данные позволили уточнить хронологию и масштабы развития криогенеза в Нижнем Поволжье. Для разрезов Косика и Черный Яр выделены следующие этапы развития криогенеза:

I этап (КОС-4, КОС-3): ~115—105 тыс. л. н., МИС 5d, выраженный в прибрежно-морских отложениях в виде псевдоморфоз с различным песчаным заполнителем, с горизонтальными отростками.

II этап (КОС-2): ~90—83 тыс. л. н., граница МИС 5b — МИС 5a), зафиксированный в прибрежно-морских отложениях в виде мешкообразных и клинообразных структур 40—60 см, заполненных песчаным материалом, который выше в разрезе отсутствует.

III этап (ЧЯ-1): ~47—45 тыс. л. н., граница МИС 3c и МИС 3b, представлен псевдоморфозами в пойменных/лагунных отложениях, мощностью до 1,3 м по вертикали. Этап не имеет аналогов в других разрезах региона. Формирование таких структур определялось локальными факторами (рельефом, характером увлажнения, составом отложений, их теплоизоляцией и т. д.), что свидетельствует о существовании либо островной криолитозоны, либо условий глубокого сезонного промерзания.

IV этап (КОС-1): ~23—22 тыс. л. н., конец МИС 2, представлен клиновидными структурами в прибрежно-морских отложениях; заполнитель структур — переработанные осадки раннехвалынской трансгрессии.

На юге Прикаспийской низменности, где на протяжении всего позднего плейстоцена существовали в целом аридные условия, решающую роль в развитии криогенеза холодных этапов играли условия увлажнения. Ввиду этого наиболее выраженные криогенные структуры встречаются в тонкодисперсных прибрежно-морских отложениях, которые на момент криогенного воздействия были насыщены влагой. Разнообразие размещения криогенных структур как по отдельным разрезам Нижнего Поволжья (Рогов и др., 2020; Таратунина и др., 2023; Taratunina et al., 2021), так и по площади позволяет предположить, что особую роль при формировании структур имели местные особенности, в частности — геоморфологическая позиция поверхности (определяла увлажнение/лдьистость осадков), генезис отложений и историческое прошлое района. Наиболее ярко криогенез проявился в тонкодисперсных, более влагоемких отложениях (палеопочвенных горизонтах, пойменных и морских осадках), в то время как в лёссовых отложениях ледниковых эпох криогенные явления не находят отражения.

Традиционно считалось, что граница максимального распространения криолитозоны позднего плейстоцена в Северном Прикаспии проходила

примерно по широте Волгограда (Величко и др., 1996, 2002). Проведенные исследования позволяют сдвинуть эту границу как минимум до с. Косика, т.е. на 250 км южнее. Ранее на основе климатических реконструкций уже предполагалось, что граница сплошной мерзлоты проходила южнее Волгограда (Vandenberghe et al., 2014), но наши исследования впервые предоставляют геологические доказательства этого. Криогенез наиболее выражен на участках с преобладанием гидроморфизма; другие, более сухие районы, также носят следы криогенного преобразования, однако степень выраженности и сохранности криогенных форм здесь ниже.

Изучение криогенных явлений весьма актуально для палеогеографических реконструкций, поскольку криогенные структуры фиксируют дневную поверхность, и наиболее ярко отражают эпизоды неполноты геологической летописи, в том числе давая возможность из материала заполнителя изучить отложения горизонтов, утерянных в результате денудационных процессов. Помимо этого, криогенные формы часто наследуют друг друга, что отражает неоднократность промерзания и многократность развития криогенеза в регионе.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Я.-П. Булярту и Э.С. Мюррею за помощь и рекомендации в проведении OSL датирования, а также анонимным рецензентам, комментарии которых существенно улучшили статью. Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ 19-77-10077 (OSL датирование), госзаданий НИЛ новейших отложений и палеогеографии плейстоцена, географический факультет МГУ (программа № 121051100135-0, палеогеографические реконструкции) и отдела палеогеографии четвертичного периода ИГ РАН (программа № 0148-2019-0005, полевые исследования). Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды” и при поддержке госзадания кафедры криолитологии, географический факультет МГУ (программа № 121051100164-0, криолитологические исследования).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бадюкова Е. Н. (2021). Колебания уровня Каспийского моря в неоплейстоцене (была ли ательская регрессия?). *Океанология*. Т. 61. № 2. С. 320—329. <https://doi.org/10.31857/S0030157421010020>

- Болиховская Н.С., Янина Т.А., Сорокин В.М. (2017). Природная обстановка ательской эпохи (по данным палинологического анализа). *Вестник Моск. ун-та. Серия 5. География*. № 6. С. 96—101.
- Васильев Ю.М. (1961). Антропоген Южного Заволжья. М.: Изд-во АН СССР. 128 с.
- Величко А.А., Морозова Т.Д., Нечаев В.П., Порожнякова О.М. (1996). Палеокриогенез, почвенный покров и земледелие. М.: Наука. 147 с.
- Величко А.А., Нечаев В.П., Баулин В.В. и др. (2002). Карта 2. Поздневалдайская — сартанская ледниковая эпоха (20 000—18 000 л. н.). Многолетняя мерзлота. В сб.: *Динамика ландшафтных компонентов и внутренних морских бассейнов Северной Евразии за последние 130 000 лет*. Под ред. А.А. Величко. М.: ГЕОС. С. 4—5.
- Вольвах Н.Е., Курбанов Р.Н., Вольвах А.О. и др. (2021). Первые результаты люминесцентного датирования лёссово-почвенных серий юга Западной Сибири (опорный разрез Ложок). *Известия РАН. Серия географическая*. Т. 85. № 2. С. 284—301.
<https://doi.org/10.31857/S2587556621020151>
- Динамика ландшафтных компонентов и внутренних морских бассейнов Северной Евразии за последние 130 000 лет. (2002). Отв. ред. А.А. Величко. М.: ГЕОС. 296 с.
- Ершов Э.Д. (2002). Общая геоэкология: учебник. М.: Изд-во МГУ. 682 с.
- Конищев В.Н. (1981). Формирование состава дисперсных пород в криолитосфере. Новосибирск: Наука. 197 с.
- Конищев В.Н., Рогов В.В. (1994). Методы криолитологических исследований. М.: Изд-во МГУ. 135 с.
- Курбанов Р.Н., Ульянов В.А., Анойкин А.А. и др. (2021). Первая люминесцентная хронология начального верхнего палеолита Восточного Казахстана (по материалам стоянки Ушбулак). *Вестник Моск. ун-та. Серия 5. География*. № 5. С. 131—148.
- Макеев О.В. (1974). Проблемы почвенного криогенеза. В сб.: *Почвенный криогенез. К X Междунар. конгрессу почвоведов*. М.: Наука. 1974. С. 7—17.
- Москвитин А.И. (1962). Плейстоцен Нижнего Поволжья. В сб.: *Труды ГИН АН СССР*. Вып. 64. М.: Изд-во АН СССР. 263 с.
- Рогов В.В., Стрелецкая И.Д., Таратунина Н.А. и др. (2020). Позднеплейстоценовый криогенез в Нижнем Поволжье. *Вестник Моск. ун-та. Серия 5. География*. № 6. С. 73—85.
- Романовский Н.Н. (1993). Основы криогенеза литосферы: учебное пособие. М.: Изд-во МГУ. 336 с.
- Свиточ А.А. (2014). Большой Каспий: строение и история развития. М.: Изд-во МГУ. 272 с.
- Таратунина Н.А. (2022). Позднеплейстоценовый криогенез в Нижнем Поволжье: условия и хронология этапов развития. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ. 28 с.
- Таратунина Н.А., Рогов В.В., Стрелецкая И.Д. и др. (2023). Хронология и условия развития криогенеза в Прикаспийской низменности в позднем плейстоцене. *Геоморфология и палеогеография*. Т. 54. № 3. С. 49—66.
<https://doi.org/10.31857/S2949178923030118>
- Тютюнов И.А. (1960). Процессы изменения и преобразования почв и горных пород при отрицательной температуре (криогенез). М.: Изд-во АН СССР. 133 с.
- Шкатова В.К. (1975). Стратиграфия плейстоценовых отложений низовьев рек Волги и Урала и их корреляция. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Л.: ВСЕГЕИ. 25 с.
- Янина Т.А. (2012). Неоплейстоцен Понто-Каспия: биостратиграфия, палеогеография, корреляция. М.: Географический факультет МГУ. 264 с.
- Butuzova E. A., Kurbanov R. N., Taratunina N. A. et al. (2022). Shedding light on the timing of the largest Late Quaternary transgression of the Caspian Sea. *Quat. Geochronology*. V. 73. P. 101378.
<https://doi.org/10.1016/j.quageo.2022.101378>
- Buylaert J. P., Ghysels G., Murray A. S. et al. (2009). Optical dating of relict sand wedges and composite-wedge pseudomorphs in Flanders, Belgium. *Boreas*. V. 38. № 1. P. 160—175.
<https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2008.00037.x>
- Költringer C., Stevens T., Bradák B. et al. (2020). Enviromagnetic study of Late Quaternary environmental evolution in Lower Volga loess sequences, Russia. *Quat. Res.* 25 p.
<https://doi.org/10.1017/qua.2020.73>
- Költringer C., Bradák B., Stevens T. et al. (2021). Palaeoenvironmental implications from Lower Volga loess — Joint magnetic fabric and multi-proxy analyses. *Quat. Sci. Rev.* V. 267. 107057.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107057>
- 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*. V. 50. № 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. *Quat. Geochronology*. V. 73. P. 101376.
<https://doi.org/10.1016/j.quageo.2022.101376>
- 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. *Quat. Int.* 590. P. 56—72.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.12.015>
- Tudryn A., Chalié F., Lavrushin Yu. A. et al. (2013). Late Quaternary Caspian Sea environment: Late Khazarian and Early Khvalynian transgressions from the lower reaches of the Volga River. *Quat. Int.* V. 292. P. 193—204.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.10.032>
- 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*. V. 43. P. 652—666.
<https://doi.org/10.1111/bor.12070>
- Zastrozhnov A., Danukalova G., Golovachev M. et al. (2020). Biostratigraphical investigations as a tool for palaeoenvironmental reconstruction of the Neopleistocene (Middle-Upper Pleistocene) at Kosika, Lower Volga, Russia. *Quat. Int.* V. 540. P. 38—67.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.11.036>

NEW DATA ON THE AGE AND EVOLUTION OF THE LATE PLEISTOCENE CRYOGENESIS IN THE SOUTHERN CASPIAN LOWLAND

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

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

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

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

^d *Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia*

[#] *E-mail: taratuninana@gmail.com*

The article presents new data on cryogenic structures of different periods found in sections in the south of the Lower Volga Region. Based on a comprehensive cryolithological analysis, cryogenic origin of these structures was confirmed. Absolute dating by the method of optically stimulated luminescence was used to determine the age of enclosing, overlying deposits and filler of the structures. Four stages of cryogenesis were established in in firth-marine deposits of the Lower Volga region: I stage ~115–105 ka (KOC-4 and KOC-3 horizons), II stage ~90–83 ka (KOC-2), III stage ~47–45 ka (CY-1), IV stage ~23–22 (KOC-1). In the south of the Caspian Lowland, with generally arid conditions existed throughout the Late Pleistocene, the humidity of sediments (determined by the geomorphological position of the sections) played a decisive role in the development of cryogenesis of cold stages. This study makes it possible to move the boundary of the maximum distribution of the Late Pleistocene permafrost area for this territory by 250 km to the south than previously assumed. The new data significantly refine our understanding of the stages and scales of the development of cryogenesis in the southeast of the East European Plain, and allow us to improve paleogeographic reconstructions for the Late Pleistocene of the Caspian Lowland.

Keywords: permafrost, Lower Volga Region, loess, cryogenesis, coefficient of cryogenic contrast, OSL dating, paleogeography

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to J.-P. Buylaert and A. S. Murray for their help and recommendations in OSL dating. The study was supported by the Russian Science Foundation grant 19-77-10077 (OSL dating), by the Pleistocene paleogeography Laboratory, Faculty of Geography, MSU (state program № 121051100135-0, paleogeographic reconstructions) and Department of Quaternary Paleogeography (state program № 0148-2019-0005, field research). The study was carried out within the framework of the Development Program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Lomonosov Moscow State University “The future of the planet and global changes in the environment” and with the support of the state assignment of the Department of Cryolithology, Faculty of Geography of MSU (state program № 121051100164-0, cryolithological research).

REFERENCES

- Badyukova E. N. (2021). Fluctuations in the level of the Caspian Sea in the Neopleistocene (was there an Ate-
lian regression?). *Oceanology*. T. 61. № 2. P. 283–291.
<https://doi.org/10.1134/S0001437021010021>
- Bolikhovskaya N. S., Yanina T. A., Sorokin V. M. (2017). Natural environment of the Ate-
lian epoch (according to palynological analysis). *Vestnik Moskovskogo
universiteta. Seriya 5. Geografiya*. № 6. P. 96–101.
(in Russ.)
- Butuzova E. A., Kurbanov R. N., Taratunina N. A. et al. (2022). Shedding light on the timing of the largest Late
Quaternary transgression of the Caspian Sea. *Quat. Geo-
chronology*. V. 73. P. 101378.
<https://doi.org/10.1016/j.quageo.2022.101378>
- Buylaert J. P., Ghysels G., Murray A. S. et al. (2009). Op-
tical dating of relict sand wedges and composite-wedge
pseudomorphs in Flanders, Belgium. *Boreas*. V. 38. № 1.
P. 160–175.
<https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2008.00037.x>

¹ For citation: Taratunina N. A., Rogov V. V., Streletskaya I. D. et al. (2024). New data on the age and evolution of the late
Pleistocene cryogenesis in the southern Caspian Lowland. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. V. 55. № 2. P. 191–206.
(in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2949178924020107>; <https://elibrary.ru/PMWLRK>

- Költringer C., Bradák B., Stevens T. et al. (2021). Palaeoenvironmental implications from Lower Volga loess — Joint magnetic fabric and multi-proxy analyses. *Quat. Sci. Rev.* V. 267. 107057. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107057>
- Költringer C., Stevens T., Bradák B. et al. (2020). Enviromagnetic study of Late Quaternary environmental evolution in Lower Volga loess sequences, Russia. *Quat. Res.* 25 p. <https://doi.org/10.1017/qua.2020.73>
- 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., Rogov V. V. (1994). Metody kriolitologicheskikh issledovaniy (Methods of cryolithological research). Moscow: MSU (Publ.). 135 p. (in Russ.)
- 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*. V. 50. № 1. P. 134—146. <https://doi.org/10.1111/bor.12478>
- Kurbanov R. N., Ulyanov V. A., Anoykin A. A. et al. (2021). The first luminescence chronology of the Initial Upper Paleolithic of Eastern Kazakhstan (case study of the Ushbulak archaeological site). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. № 5. P. 131—148. (in Russ.)
- Kurbanov R. N., Buylaert J.-P., Stevens T. et al. (2022). A detailed luminescence chronology of the Lower Volga loess-palaeosol sequence at Leninsk. *Quat. Geochronology*. V. 73. P. 101376. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2022.101376>
- Makeev O. V. (1974). Problems of soil cryogenesis. In: *Pochvennyi cryogenez*. Moscow: Nauka (Publ.). P. 7—17. (in Russ.)
- Moskvitin A. I. (1962). Pleistotsen Nizhnego Povolzh'ya (Pleistocene of the Lower Volga region). In: *Trudy GIN AN SSSR*. V. 64. Moscow: AN SSSR (Publ.). 263 p. (in Russ.)
- Rogov V. V., Streletskaia I. D., Taratunina N. A. et al. (2020). Late Pleistocene cryogenesis in the Lower Volga River region. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 2020. № 6. P. 73—85. (in Russ.)
- Romanovskiy N. N. (1993). Osnovy kriogeneza litosfery (Fundamentals of cryogenesis of the lithosphere). Moscow: MSU (Publ.). 336 p. (in Russ.)
- Shkatova V. K. (1975). Stratigrafiya pleistotsenovykh otlozhenii nizov'yev 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. 25 p. (in Russ.)
- Svitoch A. A. (2014). Bol'shoi Kaspii: stroenie i istoriya razvitiya (*Big Caspian: structure and history of development*). Moscow: MSU (Publ.). 272 p. (in Russ.)
- Taratunina N. A. (2022). Pozdnepleistotsenovi kriogenez v Nizhnem Povolzh'e: usloviya i khronologiya etapov razvitiya (Late Pleistocene cryogenesis in the Lower Volga Region: chronology and paleoenvironmental context). PhD Thesis. Moscow: MSU. 28 p. (in Russ.)
- Taratunina N., Rogov V., Streletskaia I. et al. (2021). Late Pleistocene cryogenesis features of a loess-palaeosol sequence in the Srednyaya Akhtuba reference section, Lower Volga River valley, Russia. *Quat. Int.* V. 590. P. 56—72. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.12.015>
- Taratunina N. A., Rogov V. V., Streletskaia I. D. et al. (2023). Chronology and conditions of the development of cryogenesis in the Caspian Lowland in the Late Pleistocene. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. V. 54. № 3. P. 49—66. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2949178923030118>
- Tudryn A., Chalié F., Lavrushin Yu. A. et al. (2013). Late Quaternary Caspian Sea environment: Late Khazarian and Early Khvalynian transgressions from the lower reaches of the Volga River. *Quat. Int.* V. 292. P. 193—204. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.10.032>
- Tyutyunov I. A. (1960). Protsessy izmeneniya i preobrazovaniya pochv i gornykh porod pri otritsatel'noi temperature (kriogenez) (Processes of change and transformation of soils and rocks at negative temperatures (cryogenesis)). Moscow: AS USSR (Publ.). 133 p. (in Russ.)
- 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*. V. 43. 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., Morozova T. D., Nechaev V. P., Porozhnaykova O. M. (1996). Paleocryogenez, pochvennyi pokrov i zemledelie (Paleocryogenesis, soil cover and agriculture). Moscow: Nauka (Publ.). 147 p. (in Russ.)
- Velichko A. A., Nechaev V. P., Baulin V. V. et al. (2002). Map 2. Late Valsai — Sartan ice age (20,000—18,000 BP). Permafrost. Velichko A. A. (Ed.). In: *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). Moscow: GEOS (Publ.). P. 4—5. (in Russ.)
- Volvakh N. E., Kurbanov R. N., Volvakh A. O. et al. (2021). The First Results of Luminescent Dating of Loess-Palaeosol Series in the South of Western Siberia (Lozhok Reference Section). *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*. № 2. P. 284—301. (in Russ.) <https://doi.org/10.31857/S2587556621020151>
- Yanina T. A. (2012). Neopleistotsen Ponto-Kaspiya: biostratigrafiya, paleogeografiya, korrelyatsiya (Neopleistocene of the Ponto-Caspian: biostratigraphy, paleogeography, correlation). Moscow: Geograficheskii fakultet MSU (Publ.). 264 p. (in Russ.)
- Yershov E. D. (2002). Obshchaya geokriologiya (General geocryology). Moscow: MSU (Publ.). 682 p. (in Russ.)
- Zastrozhnov A., Danukalova G., Golovachev M. et al. (2020). Biostratigraphical investigations as a tool for palaeoenvironmental reconstruction of the Neopleistocene (Middle-Upper Pleistocene) at Kosika, Lower Volga, Russia. *Quat. Int.* V. 540. P. 38—67. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.11.036>