

ГЕОМОРФОЛОГИЯ И ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ КАСПИЙСКОГО РЕГИОНА
(ОБЗОРНЫЕ СТАТЬИ)

УДК 551.89:551.435.5 (470.44/.47)

СТРАТИГРАФИЯ, ХРОНОЛОГИЯ И ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ КРИОГЕННЫХ
ЯВЛЕНИЙ ПРИКАСПИЙСКОЙ НИЗМЕННОСТИ
В ПОЗДНЕМ ПЛЕЙСТОЦЕНЕ[#]

© 2024 г. Н. А. Таратунина^{1,2,*}, В. В. Рогов¹, М. П. Лебедева^{1,3}, И. Д. Стрелецкая¹,
Т. А. Янина¹, М. С. Лукьянычева², Ф. Хормали⁴, Р. Н. Курбанов^{1,2}

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

²Институт географии РАН, Москва, Россия

³Почвенный институт имени В.В. Докучаева РАН, Москва, Россия

⁴Горганский университет сельскохозяйственных наук и природных ресурсов, Горган, Иран

* E-mail: taratuninana@gmail.com

Поступила в редакцию 02.05.2023 г.

После доработки 29.02.2024 г.

Принята к публикации 19.07.2024 г.

В статье представлено обобщение результатов экспедиционных и аналитических исследований криогенных явлений в Нижнем Поволжье. Детально описаны разные виды псевдоморфоз и криотурбации, обоснован их криогенный генезис, выделены различные криогенные структуры в лёссово-почвенных сериях, аллювиальных и лиманно-морских отложениях. Морфология структур указывает на то, что развитие криогенеза в схожих условиях природной среды, но в разных генетических типах отложений приводит к формированию структур разного облика, напрямую зависящего от влажности грунтов и их механического состава. Решающее значение для формирования конечного облика грунтовых структур имеют процессы деградации льда и сопутствующие изменения их морфологии. Абсолютное датирование отложений, вмещающих криогенные структуры, позволило выделить временные интервалы их формирования. На основе учета особенностей строения и формирования криогенных структур, их стратиграфического положения, результатов лабораторных анализов в позднем плейстоцене выделено шесть этапов криогенеза. Этап I характеризовался распространением в регионе глубокого сезонного промерзания, зафиксированного в прибрежно-морских осадках МИС 5d. Для этапов II-III (МИС 5b, МИС 4, соответственно) существование криогенных форм зафиксировано в различных генетических типах осадков. Этап IV (МИС 3с – МИС 3b) отвечает существованию криолитозоны только для северной части района (разрезы Средняя Ахтуба, Райгород) и маломощной островной криолитозоны либо глубокого сезонного промерзания – для южной части долины реки Волги. Этапы V (МИС 3а) и VI (МИС 2) характеризуются распространением маломощной островной мерзлоты либо глубокого сезонного промерзания. Выделенные крупные этапы развития многолетнемерзлых пород в Прикаспийской низменности существенно уточняют имеющиеся данные о криогенных горизонтах Восточно-Европейской равнины. Новые свидетельства существования криогенеза позволяют сдвинуть южнее принятую границу максимального распространения многолетнемерзлых пород в холодные этапы позднего плейстоцена на юге Русской равнины.

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

DOI: 10.31857/S2949178924030018, **EDN:** PMURUU

1. ВВЕДЕНИЕ

Роль криогенеза в формировании современной ландшафтной структуры Северной Евразии, развитии экзогенных процессов и рельефа до сих пор остается не до конца исследованной (Величко, 2012). Многие исследователи подчеркивали возможную значительную роль формирования и деградации многолетней мерзлоты в трансформации водного баланса рек бассейна Волги и, как следствие, в значительных колебаниях уровня Каспийского моря (Чепалыга, 2006; Сидорчук и др.,

[#]Ссылка для цитирования: Таратунина Н.А., Рогов В.В., Лебедева М.П. и др. (2024). Стратиграфия, хронология и палеогеография криогенных явлений Прикаспийской низменности в позднем плейстоцене. *Геоморфология и палеогеография*. Т. 55. № 3. С. 5–31. <https://doi.org/10.31857/S2949178924030018>; <https://elibrary.ru/PMURUU>

2008, 2021; Гельфан, Калугин, 2021; Gelfan et al., 2024; Sidorchuk et al., 2024). Проблема трансформации водного баланса Каспийского моря для различных этапов плейстоцена остается нерешенной: не до конца ясны причины крупных палеогеографических событий, определявших изменение уровня моря. Одним из возможных факторов могло быть таяние многолетней мерзлоты и увеличение водности рек Восточно-Европейской равнины (ВЕР). Реконструкция механизмов и условий образования древней мерзлоты открывает путь к лучшему пониманию водного баланса Каспийского моря в плейстоцене.

Термин “перигляциальные территории” предложен в 1909 г. польским исследователем В. Лозинским и обозначал сушу, примыкавшую к ледниковым покровам и испытывавшую сильное влияние ледников на весь комплекс природных условий (Тимофеев, Втюрина, 1983). В настоящее время под термином “перигляциальный” понимается гиперзона, которая достигала многих сотен, а иногда и тысяч километров, и занимала значительную часть территории Евразии. Для этой зоны был характерен очень суровый климат с многолетней или мощной сезонной мерзлотой, специфической растительностью и арктической фауной. Здесь формировались криогенные формы рельефа и коррелятивные им осадки с характерными криотекстурами и подземными льдами (Рябуха, 2015). Анализ обширной литературы, касающейся перигляциальной зоны, приводит к выводу о том, что наиболее важным вопросом ее исследования является установление генезиса и условий формирования разнообразных криогенных структур (КС), которые являются важнейшим архивом природных изменений прошлого, и образование которых сопровождается как накопление, так и преобразование рыхлых отложений. Упоминание криогенного генезиса седиментационных структур зачастую открывает дискуссию, в которой высказываются аргументы против их криогенной природы, приводятся примеры структур похожей формы, размеров, возраста, стратиграфического положения, но имеющих иное происхождение. Проблема палеогеографических реконструкций с использованием КС как индикатора условий прошлого заключается в отсутствии общепринятых критериев, позволивших бы отличить их от близких по морфологии структур, не связанных с криогенезом (трещин усыхания, сейсмических явлений), а также в отсутствии общепринятых параметров для характеристики грунтовых структур иного генезиса.

Длительную историю имеет изучение криогенеза в Западной и Центральной Европе. Для тер-

риторий с абсолютными отметками близкими к уровню моря приведена оценка динамики мерзлотных условий Европы за период 110–11 тыс. л. н. (Vandenberghе, Pissart, 1993). В это время здесь образовались различные формы КС, распространение которых было связано с одним из четырех типов многолетней и сезонной мерзлоты (сплошного и островного распространения, глубокого и неглубокого сезонного промерзания). Для мерзлых пород сплошного распространения характерны ледяные жилы и полигонально-жильный рельеф, бугры пучения закрытого типа (булгуньяхи, пинго), сегрегационное льдообразование. Редкоостровная и прерывистая мерзлота характеризуется наличием таких форм, как миграционные бугры пучения, крупные криотурбации, псевдоморфозы по ледяным жилам в тонкодисперсных грунтах, термокарстовый рельеф. Для глубокого сезонного промерзания характерны песчаные клинья, а для условий неглубокого сезонного промерзания – трещинообразование, небольшие или изолированные криотурбации. Выделяются закономерные этапы распространения сплошной мерзлоты на территории Западной и Центральной Европы, наиболее ярко выраженные в периоды 72–61 и 27–17 тыс. л. н. Более мягкие условия с распространением прерывистой и островной мерзлоты реконструируются в период 41–35 тыс. л. н.

Обширные исследования истории криолитозоны позднего плейстоцена выполнены представителями польской научной школы (Starkel, 1988). Комплексные исследования криогенных структур Центральной Польши (Ewertowski, 2009) позволили выделить три типа клиновидных форм в отложениях, связанных с вислинским оледенением (МИС 5 – МИС 2): 1) псевдоморфозы по ледяным жилам; 2) реликтовые морозобойные трещины; 3) псевдоморфозы по ледяным жилам, сильно деформированные термокарстовыми процессами.

На равнинах Восточной Европы встречается все многообразие ископаемых мерзлотных образований (Vandenberghе et al., 2014): большое количество грунтовых клиньев было описано в центральной части Восточно-Европейской равнины, в Среднем и Нижнем Поволжье, в бассейнах рек Десны и Дона, в средней части Приуралья, на юге Западной Сибири. Следы криогенных процессов – псевдоморфозы по жильным льдам, грунтовые жилы, инволюции в реликтовом деятельном слое – описаны в южной Скандинавии (Серебряный, 1960) и европейской части России (Бердников, 1976; Розенбаум, 1985; Сычева, 2012; Наугольных, 2018, и др.).

В региональных исследованиях последних лет отмечается широкое внедрение оптически стиму-

лированного люминесцентного (OSL) датирования, поскольку метод имеет большой возрастной предел, а результаты измерений связаны со временем образования отложений. Известны примеры применения метода OSL датирования для определения возраста грунтовых клиньев для территории Европы (Buylaert et al., 2009; Leszczynski, Nemes, 2020), Северной Америки (French et al., 2003), Китая (Guhl et al., 2012).

На Восточно-Европейской равнине (ВЕР) исследования перигляциальной зоны связаны, прежде всего, с именами К.К. Маркова, А.И. Попова, А.И. Москвитина, Е.М. Катасонова Н.Н. Романовского, А.А. Величко. Многочисленны работы по изучению почвенного криогенеза пушинского коллектива исследователей (Л.А. Гугалинская, В.М. Алифанов, А.Ю. Овчинников). Наиболее весомый вклад в изучение перигляциальных явлений плейстоцена в регионе сделан группой исследователей под руководством А.А. Величко (1965, 1973; Динамика ..., 2002). В обобщающих работах коллектива представлена систематизация следов мерзлоты по формам их проявления и стратиграфическим горизонтам в виде карт распространения мерзлоты и перигляциальных явлений (Величко, 1965, 1973; Динамика ..., 2002). Характеристика и анализ собственно криогенных образований по А.А. Величко всегда ведется в комплексе всех проблем плейстоцена – стратиграфии, климата, растительности, строения и состава отложений. Установлено, что с течением времени (от раннего до позднего плейстоцена) в периоды похолоданий область древней мерзлоты расширялась, а климат становился более суровым. Для этого периода характерно проявление мерзлоты не только в виде клиновидных образований различного размера, бугров пучения и криотурбаций, но и в виде остатков полигонального рельефа – т.н. “реликтовая криогенная морфоскульптура”. Карта размещения такого рельефа на территории ВЕР была впервые представлена А.А. Величко в 1963 г. (Величко, 1973).

При изучении лёссово-почвенных серий (ЛПС) перигляциальной зоны ВЕР А.А. Величко выявлены особые морфологические образования в этих отложениях – псевдоморфозы, клиновидные образования, криотурбации. На основе глубокого анализа материалов по палеокриогенезу ВЕР установлены три самостоятельных криогенных горизонта (КГ): смоленский, владимирский и ярославский (Величко, 2012).

Со смоленским КГ связывают наиболее ранний этап криогенеза с двумя подфазами. Первая отражает самое раннее похолодание валдайской эпохи, наступившее после микулинского межледниковья.

Криогенные деформации этой подфазы различны в западной (грунтовые и ледогрунтовые жилы) и восточной (инволюции и криотурбации) частях ВЕР. Вторая фаза смоленского КГ включает пластические и разрывные деформации, солифлюкцию (57–55° с.ш.). Владимирский КГ связан с деформациями брянской ископаемой почвы (31–24 тыс. л. н.) и носит четкий зональный характер: на западе выделяют солифлюкционные и пластические нарушения палеопочвы при слабом развитии мелкополигональных структурных форм; в центральной части равнины горизонт почвы мало нарушен деформациями; на востоке господствуют мелкие мерзлотные образования типа пятен-медальонов (Динамика ..., 2002). Ярославский криогенный горизонт, выделенный А.А. Величко в районе д. Кучино (Изменение климата ..., 1999), соотносится с основной частью МИС 2 (20–12 тыс. л. н.) и характеризуется клиновидными образованиями до 5 м по вертикали и шириной по верху до 3 м и линейными размерами полигонов до 15–20 м.

В последнее время отмечается рост интереса к проблеме распространения и условий формирования криогенеза на территории ВЕР. Получены новые данные для северо-западных районов (Стрелецкая, 2017); описаны многочисленные криогенные структуры (КС) в разрезах Ярославского ополя (Garankina et al., 2022); изучены рельеф и структуры Заволжско-Уральского региона (Рябуха, 2019).

В связи с широким распространением следов криогенных структур в пределах всей перигляциальной зоны позднего плейстоцена установлена связь между криогенными образованиями и палеоклиматом (Величко, 1973; Vandenberghe et al., 2014). В.Н. Конищевым (1998) найдена взаимосвязь гранулометрического и минералогического состава грунтов и почв и степенью их криогенного преобразования, и предложен его численный показатель – коэффициент криогенной контрастности (ККК). Значения коэффициента менее единицы соответствуют наличию умеренного (неинтенсивного) проявления криогенеза в условиях сезонной мерзлоты, более единицы – температурным условиям верхних горизонтов литосферы, ведущим к появлению вечной мерзлоты и усилению криогенеза. На территории ВЕР описано большое количество КС, однако лишь малая часть из них охарактеризована детальными литологическими исследованиями и абсолютными датами, что не позволяет коррелировать события одних регионов с другими и реконструировать влияние криогенеза на различные элементы ландшафта.

Специальные работы развернуты и на юго-востоке ВЕР, где в нижнем течении р. Волги изучена серия разрезов с многочисленными КС в толще пород среднего и позднего плейстоцена. Для региона опубликованы материалы по разрезам, где фиксируются структуры как в лёссово-почвенных сериях (Рогов и др., 2020; Таратунина и др., 2023; Taratunina et al., 2021), так и в лагунно-лиманных осадках (Таратунина и др., 2024; Butuzova et al., 2022). Целью настоящей работы является анализ и обобщение всего комплекса данных, полученных по Нижнему Поволжью для дополнительного обоснования генезиса структур, реконструкции условий их формирования и создания хронологической схемы этапов развития криогенеза на территории Прикаспийской низменности в позднем плейстоцене.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

В пределах Прикаспийской низменности структуры по типу криогенных отмечались рядом исследователей. Н.А. Васильев (1961) фиксирует

наличие криогенных структур (псевдоморфозы, складчатые деформации и криотурбации) в разрезах Копановка, Средняя Ахтуба, Черный Яр и др., относя их, предположительно, к мерзлотным (рис. 1, (а)). А.И. Москвитин (1962) также упоминает мерзлотные явления в разрезах четвертичных образований (у г. Волжского, Нижнее Займище), однако без интерпретации условий (рис. 1, (б, в)). В диссертации В.К. Шкатовой (1975) представлен обширный обзор по Нижней Волге с характеристикой условий и времени накопления ательских и хвалынских отложений по данным фаунистического и флористического анализа. Особое внимание уделено описанию разрезов четвертичных отложений и выделению криогенных явлений (щельников/клиновидных структур и инволюций). По мнению автора, они являются индикаторами аридизации и похолодания климата, но не многолетней мерзлоты, и встречаются только в позднем плейстоцене начиная с калининского оледенения, в конце которого сформировались наиболее мощные из этих структур (рис. 1, (г)). Для более ранних и влажных периодов следы деформаций

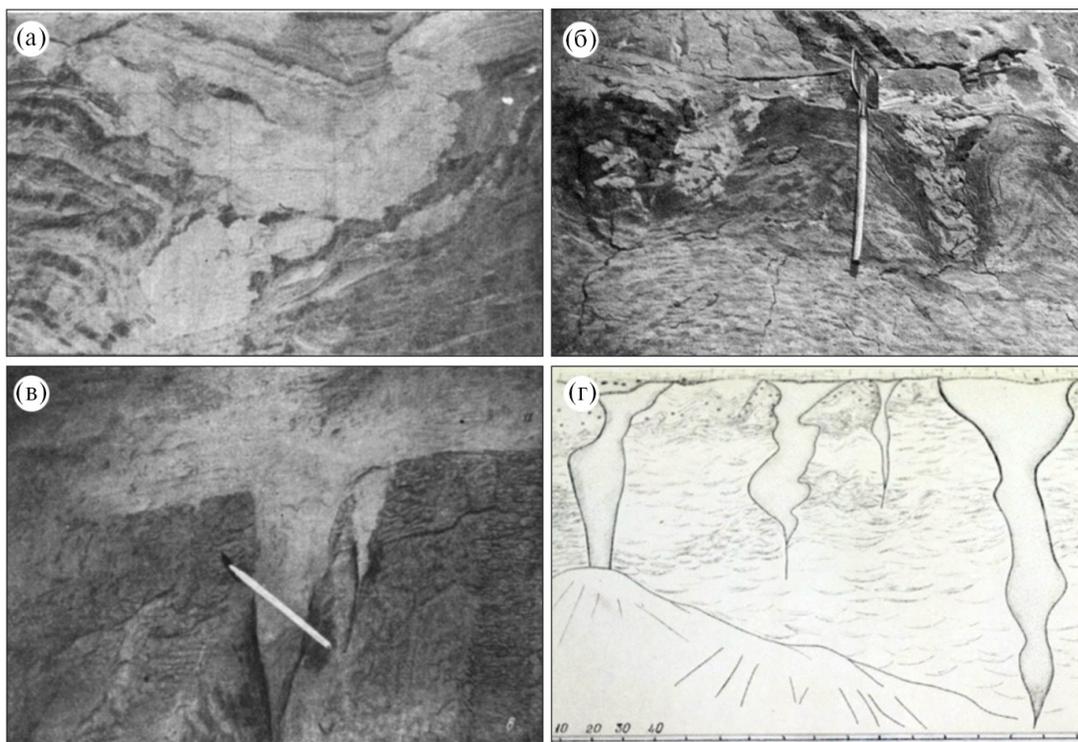


Рис. 1. Криогенные структуры Нижнего Поволжья (по данным литературных источников): (а) — мерзлотный котел в разрезе у с. Копановка (Васильев, 1961); (б) — псевдоморфозы ледяных клиньев у г. Волжского; заполнение ахтубинскими песками (Москвитин, 1962); (в) — преобразованные в котлы ледяные клинья на контакте ахтубинских песков и хазарских илов, с. Нижнее Займище (Москвитин, 1962); (г) — щельники в разрезе у с. Черный Яр (Шкатова, 1975).

Fig. 1. Cryogenic structures of the Lower Volga region (according to literary sources): (a) — permafrost “pot” in the section near the Kapanovka (Vasiliev, 1961); (б) — pseudomorphs of ice wedges near Volzhsky city, filling with Akhtuba sands (Moskvitin, 1962); (в) — ice wedges transformed into “pots” at the contact of Akhtuba sands and Khazar silts, Nizhneye Zaymishche (Moskvitin, 1962); (г) — cracks in the section near Chernyy Yar (Shkatova, 1975).

интерпретируются как связанные с процессами течения и смятия.

В 2018–2022 гг. в Нижнем Поволжье были развернуты специальные исследования, направленные на изучение палеокриогенных явлений. В ходе полевых работ изучены многочисленные естественные обнажения-обрывы, вскрывающие верхнеплейстоценовые отложения Нижнего Поволжья (рис. 2, 3). Здесь выделены два крупных геоморфологических района – южный и северный, граница между которыми проведена по уступу с абс. отм. ~ 0 м (Свиточ, 2014). В северном районе разрезами вскрыто строение раннехвалынской морской равнины (абс. отм. 0 – 45–50 м), отложения которой представлены глинами и суглинками (Янина, 2012). Южный район представляет собой поверхность более низкой позднехвалынской равнины, которая осложнена бэровскими буграми, чередующимися с понижениями, образуя грядовый рельеф.

3. ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

В основу работы положены результаты комплексного (полевого и лабораторного) изучения шести опорных разрезов Волго-Ахтубинской долины, где были обнаружены структуры предположительно криогенного генезиса (рис. 2): в северной части исследованы Средняя Ахтуба (Рогов и др., 2020; Янина и др., 2017; Makeev et al., 2021), Ленинск (Таратунина и др., 2023; Költringer et al., 2021; Kurbanov et al., 2022), Батаевка (Таратунина и др., 2023) и Райгород (Költringer et al., 2020; Taratunina et al., 2022); в южной – Черный Яр (Таратунина и др., 2024) и Косика (Таратунина и др., 2024; Butuzova et al., 2022). Описание методики полевых исследований и лабораторных анализов приведены в указанных для конкретных разрезов статьях.

Криогенный генезис структур на макроуровне интерпретирован по морфологии и особенностям соотношения вмещающих отложений и запол-

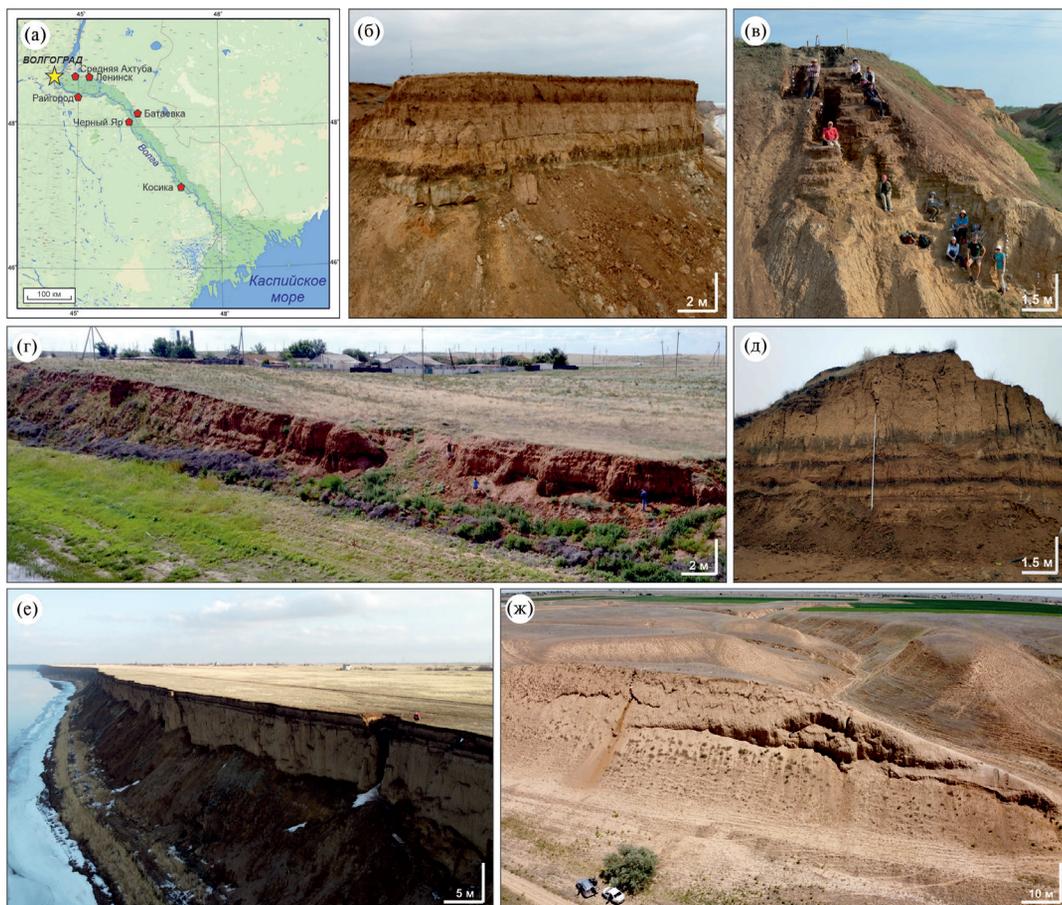


Рис. 2. Изученные разрезы северной части Прикаспийской низменности: (а) – схема расположения разрезов; (б) – Черный Яр; (в) – Ленинск; (г) – обнажение Косика; (д) – нижняя часть разреза Средняя Ахтуба; (е) – обнажение Райгород; (ж) – общий вид разреза Батаевка.

Fig. 2. Studied sections of the northern part of the Caspian Lowland: (а) – sections location; (б) – Chernyy Yar; (в) – Leninsk; (г) – outcrop of Kosika; (д) – lower part of the Srednyaya Akhtuba section; (е) – Raygorod section; (ж) – general view of the Bataevka section.

нителя (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). В “сухих” лёссах проявление криогенеза отражается в вертикальной отдельности лёссов и их блочной структуре (Feng et al., 2021). В работе (Таратунина, 2022) описаны представления о механизме образования структур Нижнего Поволжья, а в табл. 1 и 2 приведены типизация и диагностические признаки для интерпретации условий их формирования.

Известными криогенными микропризнаками в современных и плейстоценовых почвах являются: 1) специфические агрегаты – с “луковичным” микростроением – десквамация – с “отшелушиванием”; 2) сепарация ила и мелкого песка с его выдавливанием в межагрегатные поры; 3) смятие и фрагментация растительных остатков; 4) растрескивание мелкопесчаных зерен кварца; 5) ооидная ориентировка мелкодисперсных частиц на поверхности округлых агрегатов; 6) образование инфиллингов из материала вышележащих горизонтов, который заполнил образовавшиеся вертикальные трещины.

Морфологическими признаками криогенного воздействия на микроуровне (изучение в сканирующем электронном микроскопе) мы считаем шестигранные поры, наличие угловатых кварцевых зерен, зерен со свежими сколами, раковистыми изломами, высокую агрегированность материала.

В разрезе Средняя Ахтуба (СА) описано 5 уровней с КС (рис. 3), представленными псевдоморфозами и криотурбациями в виде тонких клиновидных структур до 2 м по вертикали в лёссово-палеопочвенных сериях, маломощных клиновидных форм и криотурбаций в аллювиальных отложениях. С учетом результатов датирования (Янина и др., 2017), структуры в разрезе сформировались в 4 этапа: ~95–90, ~70, ~45 и ~37–35 тыс. л. н. В разрезе Райгород (РГ) выделено 3 уровня КС, описанных в аллювиальных (пойменная фация) и лёссово-почвенных отложениях в виде маломощных клиньев и мешкообразных форм. Здесь выделено 3 этапа криогенеза, произошедшие ~90, ~75 и ~52–50 тыс. л. н. (Taratunina et al., 2022). Разрез Батаевка (БТ) охарактеризован 1 уровнем тонких (до 2.5 м по вертикали) структур в палеопочвенном горизонте. Здесь возраст криогенеза оценивается ~70 тыс. л. н. Разрез Ленинск (ЛН) характеризуется 3 уровнями с КС, которые выделены в лёссово-почвенных сериях и соответствуют трем этапам криогенеза: ~95, ~75 и ~37–35 тыс. л. н. (Kurbanov et al., 2022). Один

горизонт КС выделен в разрезе Черный Яр (ЧЯ) и представлен псевдоморфозами различного облика, заключенными в пойменных отложениях. Развитие структур происходило ~47–45 тыс. л. н. В разрезе Косика (КОС) по морфологическим признакам и заполнителю выделено 4 уровня КС. Они представлены клиновидными и мешкообразными псевдоморфозами, секущими морские осадки. Эти уровни КС объединены в 3 криогенных этапа: ~115–105, ~90–83 и ~23–22 тыс. л. н. (Butuzova et al., 2022).

4. ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ ОТЛОЖЕНИЙ С КРИОГЕННЫМИ СТРУКТУРАМИ

В Нижнем Поволжье отмеченные структуры встречаются в аллювиальных и лиманно-морских отложениях, в горизонтах палеопочв ЛПС, и в лёссовых слоях. В каждом из этих типов отложений проявление различается как масштабами, так и формами структур.

4.1. Криогенные структуры в аллювиальных отложениях

Первым типом отложений, включающим выделенные КС, является аллювий, представленный различными фациями (руслевой, пойменной, старичной). КС встречаются в разрезе Средняя Ахтуба и Райгород в виде клубнеобразных криотурбаций (рис. 4, (а)), клиновидных структур небольшой мощности (до 25 см) с горизонтальными отростками (рис. 4, (б)), а также маломощных псевдоморфоз в виде тонких клиньев до 30 см по вертикали. Структуры фиксируют этапы осушения поверхности, промерзания, затопления, преобразования изначального облика криогенной структуры после оттаивания. Таким образом, в разрезе может отразиться один или несколько этапов периодического осушения поверхности, которая подвергается промерзанию с формированием КС.

В разрезе Средняя Ахтуба (СА-3) встречен ряд структур, залегающих на границе лёсса и аллювия (слои 13 и 12, соответственно). Структуры двухуровневые, с послонным заполнением материалом. Вероятно, изначально эти структуры имели меньшие размеры и были заложены в палеопочвенном горизонте, однако с подъемом уровня Волги и затоплением территории их форма существенно изменилась.

Во вмещающих КС отложениях на микроуровне отмечается окатанность частиц, серповидные борозды на поверхности кварцевых зерен (рис. 5, (а)), неоднородный состав и повышенное содержание тонкодисперсной фракции (по сравнению с заполняющим аллювием). Вмещающие породы также характеризуются наличием пор шестиугольной формы в сечении с плотными стенками

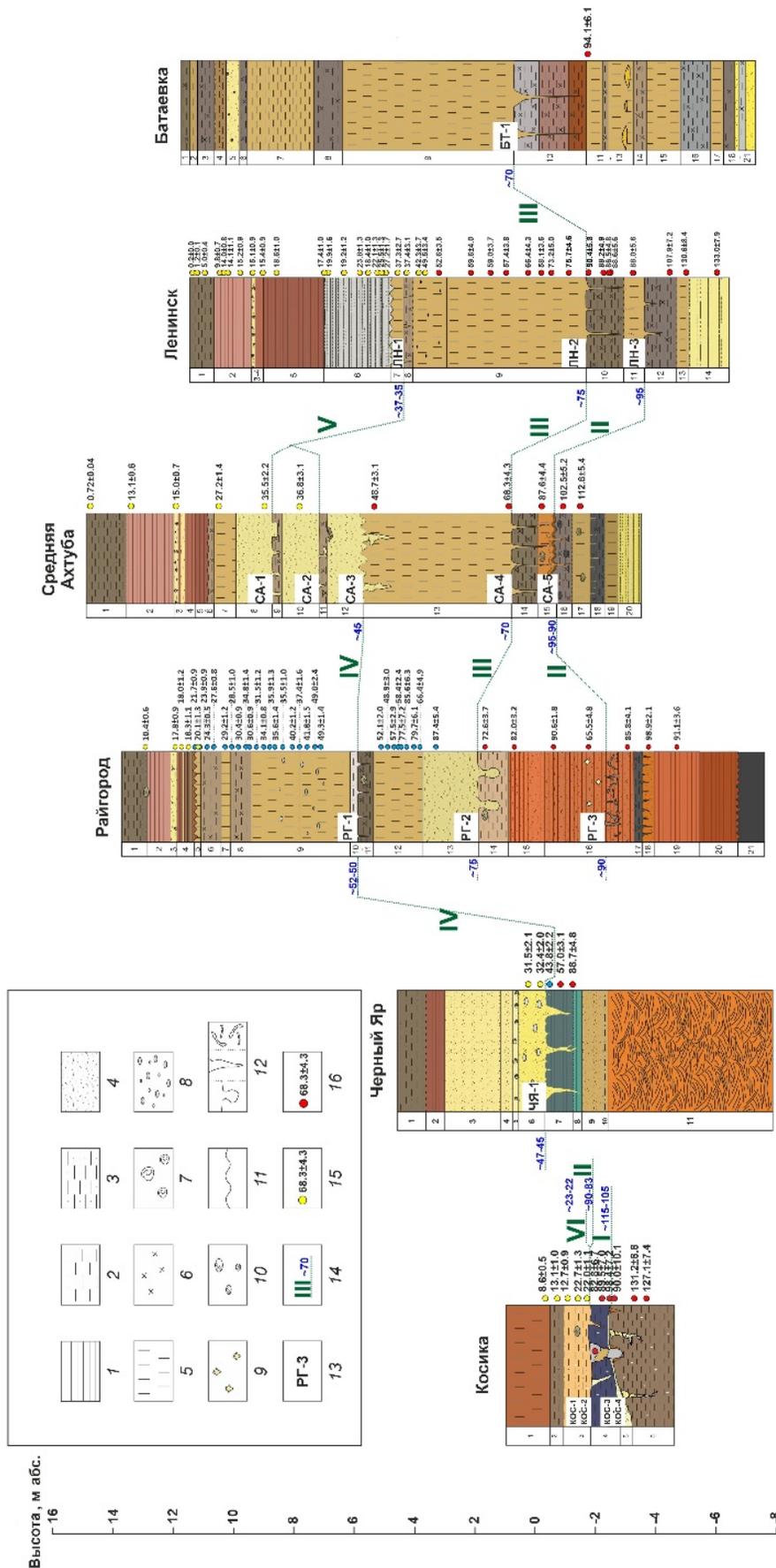


Рис. 3. Схемы изученных разрезов Нижнего Поволжья (цвет отложенный отражает естественный цвет осадка).

1 – глина; 2 – сулинок; 3 – супесь; 4 – песок; 5 – супесь; 6 – палеосолы; 7 – малакофауна; 8 – малакофауна; 9 – гипсовые розы; 10 – кротовина; 11 – эрозионные границы; 12 – структуры по типу криогенных горизонтов; 13 – структуры по типу криогенных горизонтов; 14 – криогенные этапы и их возраст; 15 – OSL возраст, тыс. л. (по кварцу); 16 – OSL возраст, тыс. л. (по калию). Цифрами слева от колонок обозначены литологические слои.

Fig. 3. Schemes of the studied sections of the Lower Volga region (the color of the deposits reflects the natural color of the sediment).
 1 – clay; 2 – loam; 3 – sandy loam; 4 – sand; 5 – silt; 6 – paleosols; 7 – malacofauna; 8 – malacofauna; 9 – gypsum “roses”; 10 – krotovinas; 11 – erosion boundaries; 12 – cryogenic structures; 13 – cryogenic structures; 14 – cryogenic stages and their age; 15 – OSL age, ka (Q); 16 – OSL age, ka (K). The numbers to the left of the columns indicate lithological layers.

Таблица 1. Типы криогенных структур Нижнего Поволжья в зависимости от генезиса вмещающих отложений
Table 1. Types of cryogenic structures in the Lower Volga region depending on the genesis of host deposits

Вмещающие отложения		Тип структур	Описание	Разрез
I	Лёссово-почвенные	Тонкие клиновидные псевдоморфозы	Структуры до 0.3 м, заполненные лёссовым материалом	Ленинск, Райгород
			Структуры 1.0–2.0 м, заполненные лёссовым материалом	Средняя Ахтуба, Ленинск, Батаевка
II	Морские/ лагунные	Клиновидные псевдоморфозы	Маломощные псевдоморфозы 15–30 см по вертикали до 10 см в ширину; с песчаным заполнителем	Косика
		Мешкообразные псевдоморфозы	Структуры 40–60 см по вертикали, заполненные песчаным материалом	Косика
		Клиновидные псевдоморфозы	Клиновидные псевдоморфозы 40–70 см по вертикали, заполненные песчаным материалом	Косика
		Клиновидные псевдоморфозы	Структуры до 1.3 м по вертикали с многочисленными хвостами	Черный Яр
III	Аллювий	Клиновидные псевдоморфозы	Маломощные псевдоморфозы 15–30 см по вертикали, до 10 см в ширину; с песчаным заполнителем, с горизонтальными отростками	Средняя Ахтуба
		Псевдоморфозы с неровными границами, заполненные аллювиальным материалом	Структуры до 1.5 м по вертикали, с прослойкой карбонатов на границе с вмещающими отложениями	Средняя Ахтуба
		Мешкообразные псевдоморфозы	Структуры 40–60 см, заполненные песчаным материалом	Райгород

(рис. 5, (б)) и остроугольных частиц. Для отложений характерны включения кальцита в виде друз и “иголочек” карбоната кальция на поверхности минеральных частиц (рис. 5, (в)).

Изучение структур второго КГ в разрезе Райгород показало, что значения ККК для вмещающих отложений и заполнителя различаются: первые характеризуются значениями коэффициента 0.80–0.83, а заполнитель и вышележащий аллювий – значениями 0.82–0.92.

4.2. Криогенные структуры в лиманно-морских отложениях

Малые уклоны поверхности в пределах Прикаспийской низменности при флуктуациях уровня Каспия способствуют развитию лагун (Бадюкова, 2021). Осадконакопление здесь происходило при интенсивном влиянии Каспийского моря, и, следовательно, в условиях большей увлажненности отложений. В связи с этим структуры, получившие развитие в данном типе отложений в разрезах КОС и ЧЯ, отличаются большими размерами (по сравнению с теми, что зафиксированы в лёссово-почвенных), и представлены заключенными в глинистых отложениях клиновидными (рис. 4, (в)) и мешкообразными псевдоморфозами вертикальной протяженностью 30–130 см (рис. 4, (г)),

а также псевдоморфозами мощностью до 65 см с горизонтальными отростками (рис. 4, (д)).

Для разреза Косика проведено детальное определение ККК для вмещающих КС отложений: значения убывают от 1.13 до 0.89 с глубиной, что говорит о многократных циклах промерзания-протаивания, более частых в верхней части слоя.

Микростроение вмещающих КС отложений характеризуется наличием пор диаметром 0.3–0.4 мм с уплотненными стенками, большим количеством агрегатов. Агрегаты представлены друзами и кристаллами карбоната кальция (рис. 5, (г)). Морфология кварцевых зерен разнообразна: встречаются угловатые частицы с раковистыми сколами (рис. 5, (д)), параллельными бороздами (рис. 5, (е)), свежими и сглаженными поверхностями (рис. 5, (д, е)); в то же время присутствуют как изометричные зерна со следами эоловой обработки (рис. 5, (ж)), так и вытянутые со следами водной обработки (рис. 5, (з)).

В песчаных лиманно-морских отложениях, формирующих тело структур, морфология кварцевых частиц представлена преимущественно хорошо окатанными (рис. 5, (и)) и изометричными зернами, иногда с ямчатым рельефом, в плотной глинистой рубашке. В разрезе Черный Яр кварце-

Таблица 2. Диагностические признаки для интерпретации условий формирования криогенных структур Нижнего Поволжья (НП)
Table 2. Diagnostic features for interpreting the conditions for the formation of syogenic structures in the Lower Volga region

Генезис отложений	Горизонт в разрезе НП*	ККК	Микроморфология	Морфоскопия	Описание процесса	Тип промерзания**
Лёссово-почвенный	ЛН-1 ЛН-2 ЛН-3 СА-4 СА-5 РГ-1 БТ-1	0.87–1.12	Цилиндрические поры, высокая агрегированность, друзы кристаллов CaCO ₃ , включения гипса; “луковые” агрегаты в палеопочвенных горизонтах – сликенсаиды	Хорошо окатанные изометричные/продолговатые зёрна со следами водной или эоловой обработки; угловатые зёрна со свежими сколами, раковистыми изломами и острыми краями; глинистая “рубашка”	Тонкие клиновидные псевдоморфозы: вертикальные ледяные шпильки (жилки) сформировались в палеопочвенных (глинистых) горизонтах с наступлением ледниковой эпохи, при переходе от почвообразования к лёссовоаккумуляции; процесс включал усадку при обезвоживании толщи в результате миграции влаги к фронту промерзания. Деградация структур происходила при изменении климатических условий	Многолетняя криолитозона
	СА-3	0.79–0.86			Структуры в лёссах с неровными границами: механизм формирования изначальной структуры аналогичен вышеописанному, разница заключается в процессе деградации структуры	Многолетняя криолитозона
	РГ-2	0.87			Мешкообразные структуры: размыв по уже заложённым ослабленным зонам, расширение структур и формирование мешкообразного сечения	Многолетняя криолитозона
Аллювиальный	СА-1				Маломощные клиновидные псевдоморфозы: возможно, являются конечными более крупных клиньев, вытаявших вследствие воздействия флювиальных вод	Многолетняя криолитозона
	СА-2	0.81	Поры шестиугольной формы, CaCO ₃ в виде друз и “иглочек” на поверхности минеральных частиц	Окатанность частиц, серповидные борозды на поверхности зерен	Криотурбации: необходимым условием при криотурбационных процессах является существование двух водоупоров. Поскольку в Средней Ахтубе ниже криотурбированного горизонта залегает хорошо дренируемый аллювиальный песок, то водоупором в этом случае могла быть только мерзлая толща. Мощностью перемятой толщи до 60 см	
	РГ-3				Мелкополигональные (5–20 см) клинышки: сильноувлажнённый пойменный аллювий, периодически осушаемая поверхность растрескивания. Глинистые отложения с большим количеством органики	

Таблица 2. Окончание

Морской / лагунно-морской	КОС-1	0.83–1.13	Угловатые частицы с раковинными сколами, параллельными бороздами, свежими и сглаженными поверхностями; хорошо окатанные, изометричные и вытянутые зерна со следами водной обработки; следы травления; серповидные борозды; свежие сколы	Клиновидные структуры: формирование в субаэральных условиях, деградация и заполнение в МИС 2	Мало мощная редкоостровная мерзлота / глукое сезонное промерзание
	КОС-2	0.83–1.13			
	КОС-3 КОС-4	0.90–1.07			
	ЧЯ-1	0.77–0.87			
<p><i>Примечание.</i> *Обозначения разрезов: БТ – Батаевка, КОС – Косика, ЛН – Ленинск, РГ – Райгород, СА – Средняя Ахтуба, ЧЯ – Черный Яр. **Дополнительные критерии выделения типа мерзлоты приведены в описании соответствующих этапов в разделе 8.</p>					

вые зерна заполнителя характеризуются также многочисленными серповидными бороздками и свежими сколами на поверхности.

4.3. Криогенные структуры в лёссово-почвенных сериях

В изученном районе криогенезом затронуты также горизонты палеопочв лёссово-почвенных серий, расположенные на разных участках долины реки Волги, различных высотных отметках и геоморфологических уровнях. Структуры залегают в почвенных горизонтах, перекрытых лёссами, и представлены в разрезах СА, РГ, БТ, ЛН клиновидными формами разной мощности (от 0.6 до 2.0 м), с четкими границами и заполнителем из вышележащего лёсса (рис. 4, (е)). Формирование таких структур связано с изменением условий при переходе от почвообразования к лёссонакоплению, с аридизацией климата, похолоданием и формированием глубокой сезонной и многолетней мерзлоты. Это подтверждают значения коэффициента криогенной контрастности, которые в почвенных горизонтах составляют 0.97–1.12 в Средней Ахтубе, 0.95–1.03 в Ленинске, 0.87–0.97 в Батаевке.

Для палеопочвенных горизонтов ККК максимален на границе “лёсс/палеопочва”. Результаты расчета ККК в пределах криогенных горизонтов

показывают убывание значений, что говорит о снижении с глубиной интенсивности криогенного преобразования, об уменьшении количества циклов промерзания-протаивания. ККК в лёссах ниже, чем в палеопочвах, что может быть связано с меньшей увлажненностью этих горизонтов, аридностью в период осадконакопления и пылеватым составом отложений. Минимальные значения ККК отмечаются в лёссах ЛН и РГ (0.82–0.94), подобные же определены в БТ (0.90–0.95), а в СА они варьируется в широком диапазоне 0.85–1.06.

Изученное с использованием сканирующей электронной микроскопии микростроение отложений, вмещающих КС, характеризуется высокой пористостью, значительным содержанием кальцита, агрегированностью, высокие значения которой некоторыми исследователями трактуются как результат циклического промерзания-протаивания отложений (Сергеев, Минервин, 1960). Микростроение представлено в основном крупными агрегатами до 3 мм, сложенными частицами разной размерности и степени слитности: от остроугольных частиц кварца тонкопесчаной размерности до фрагментированных кутан различного состава (железо, кремний, кальций). Особенностью микростроения являются цилиндрические поры (рис. 5, (к)), диаметр которых составляет

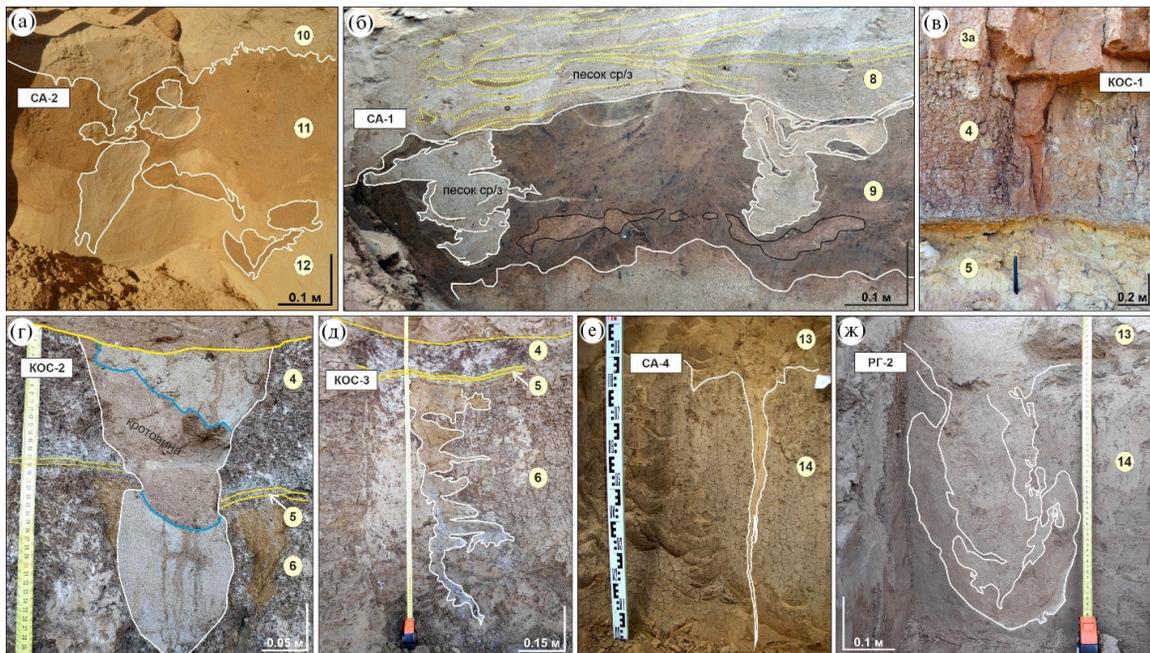


Рис. 4. Структуры в разрезах Нижнего Поволжья: (а) – криотурбации в аллювиальных отложениях (СА-2); (б) – структура СА-1 с горизонтальными отрезками; (в) – клиновидная структура горизонта КОС-1; (г) – мешкообразная структура КОС-2; (д) – структура КОС-3 с горизонтальными отрезками; (е) – клиновидная структура горизонта СА-4; (ж) – мешкообразная структура РГ-2.

Fig. 4. Structures in sections of the Lower Volga region: (а) – cryoturbations in alluvial deposits (SA-2); (б) – structure of SA-1 with horizontal lenses; (в) – wedge-shaped structure of KOS-1 horizon; (г) – bag-like structure of KOS-2; (д) – structure of KOS-3 with horizontal lenses; (е) – wedge-shaped structure of SA-4 horizon; (ж) – bag-like structure of RG-2 horizon.

до 0.6 мм, а на стенках наблюдается уплотнение грунтовой массы с участием пылеватых частиц силикатов. Аутигенные минералы в образцах лёсса представлены многочисленными друзами кристаллов карбоната кальция (рис. 5, л)).

Морфология кварцевых частиц из лёссовых горизонтов отражает формирование отложений в различных условиях, и представлена как хорошо окатанными изометричными (рис. 5, м)) или продолговатыми зёрнами со следами водной или эоловой обработки, так и угловатыми зёрнами со свежими сколами, раковистыми изломами и острыми краями – признаками циклического криогенного воздействия. В РГ кварцевые зёрна со свежими сколами и поверхностями минимальны; здесь преобладают частицы, покрытые “шубой”. В морфологическом отношении эти горизонты характеризуются наличием зерен со следами травле-

ния (рис. 5, н)). Также фиксируются остроугольные кварцевые частицы (рис. 5, о, п)), частицы со сглаженной поверхностью. В целом форма зерен кварца из вмещающих отложений отражает активную динамику осадконакопления в Нижнем Поволжье, где доминировали четыре процесса обработки поверхности зерен: криогенная, почвенная, перемещение в водных и воздушных потоках. Наличие разнообразных по форме зерен в ЛПС региона указывает на аллювиальные и морские отложения как основной источник материала, которые в Прикаспийской низменности сложно разделяемы (Költringer et al., 2022). Уже на этапе активного лёссонакопления материал подвергался криогенному растрескиванию. В изученных палеопочвах трех разрезов (Райгород, Средняя Ахтуба и Ленинск) на микроуровне отмечены одни и те же особенности уникальной агрегации – формирова-

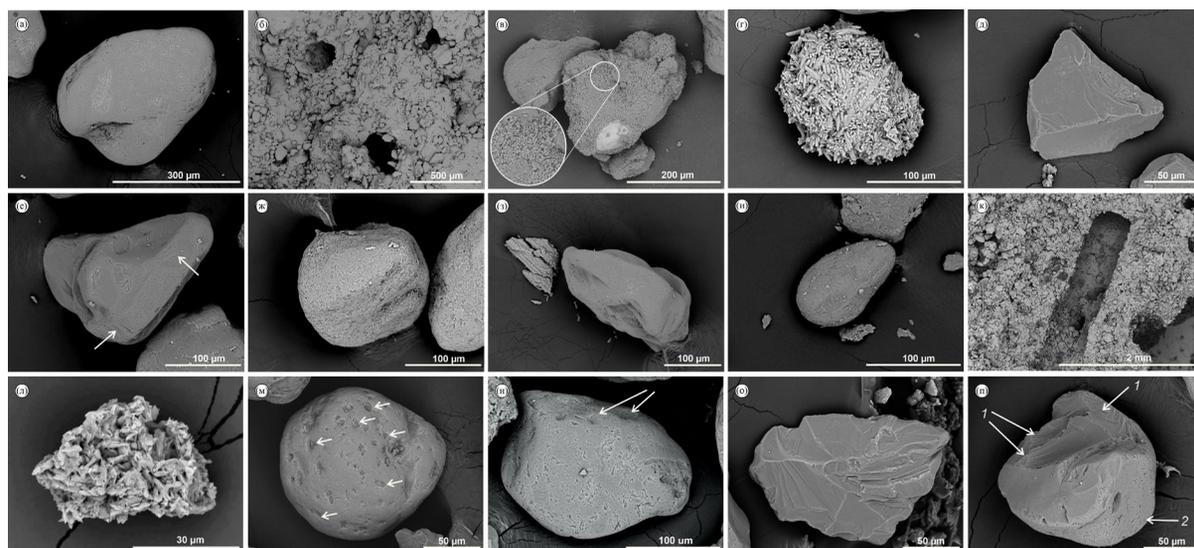


Рис. 5. Микростроение и морфология кварцевых зерен в отложениях Нижнего Поволжья: (а) – серповидные борозды на поверхности кварцевых частиц (СА-2); (б) – поры с плотными стенками (РГ-2); (в) – кальцитовая шуба на поверхности зерна (РГ-2); (г–з) – морфология зерен разреза Черный Яр (КГ ЧЯ-1): (г) – агрегат, сложенный кальцитом (вмещающие отложения, слой 7); (д) – угловатое зерно с раковистыми сколами; (е) – угловатое зерно со сглаженными углами и параллельными бороздами (белые стрелки); (ж) – изометричное зерно с поверхностью, покрытой мелкими ямками; (з) – вытянутое зерно со сглаженными углами, ямками на поверхности; (и) – окатанное зерно из материала псевдоморфозы КГ КОС-4; (к) – трубчатая пора в микростроении лёссов, разрез Средняя Ахтуба; (л) – кальцит (CaCO₃), разрез Средняя Ахтуба; (м) – изометричное зерно с неравномерно распределенными углублениями на поверхности (белые стрелки) (заполнитель хвостовой части псевдоморфозы, ЛН-2); (н) – углубления и ямки на поверхности зерна (горизонт ЛН-2); (о) – угловатое зерно с многочисленными сколами на поверхности (КГ ЛН-2); (п) – зерно со свежими раковистыми изломами (1) и поверхностью, сохранившей изначальную окатанность (2) (КГ ЛН-2).

Fig. 5. Microstructure and morphology of quartz grains in the deposits of the Lower Volga region: (a) – crescent-shaped grooves on the surface of quartz particles (SA-2); (б) – pores with dense walls (RG-2); (в) – calcite coat on the grain surface (RG-2); (г–з) – grain morphology of the Cherny Yar section (CY-1): (г) – aggregate composed of calcite (inclosing sediments, layer 7); (д) – angular grain with conchoidal chips; (е) – angular grain with smoothed angles and parallel grooves (white arrows); (ж) – isometric grain with a surface covered with small pits; (з) – elongated grain with smoothed angles, pits on the surface; (и) – rounded grain from the material of pseudomorphosis (KOS-4); (к) – tubular pore in loess microstructure, Srednyaya Akhtuba section; (л) – calcite (CaCO₃), Srednyaya Akhtuba section; (м) – isometric grain with unevenly distributed pits on the surface (white arrows) (filler of the tail part of ice wedge cast, LN-2); (н) – depressions and pits on the surface of the grain (horizon LN-2); (о) – angular grain with numerous chips on the surface (LN-2); (п) – grain with fresh conchoidal fractures (1) and a surface that has retained its original roundness (2) (LN-2).

ние агрегатов с десквамацией их поверхностного материала (“луковое микростроение”) (рис. 6), что позволяет говорить о существовании на данной территории одинаковых региональных, а не локальных почвенно-экологических условий. Такие микропризнаки были описаны И.В. Ковдой для почв с вертикальными и криогенными признаками в Бурятии (Ковда, 2022), что может являться дополнительным аргументом в пользу криогенного генезиса структур в палеопочвах МИС 5а и МИС 5с для данных разрезов, которые так же сопровождались и проявлением вертикальных признаков в виде сликенсайдов (Makeev et al., 2021).

Информация о КС в различных разрезах Нижнего Поволжья обобщена в табл. 1. Для ЛПС (СА, ЛН, РГ, БТ) характерны тонкие клиновидные структуры 0.6–2.0 м (по вертикали) с четкими границами, преимущественно выдержанной по вертикали толщиной тела (2–3 см), с заполнителем из вышележащего слоя лёсса. Морские/лагунные отложения (КОС, ЧЯ) характеризуются наличием разнообразных по форме и размерам КС – маломощных и протяженных по вертикали, заполненных окисленным песком и материалом с голубоватым оттенком (рис. 4, (д)), горизонтальными отростками, неровными границами, блоками вмещающего материала внутри структур. Криогенным структурам в аллювиальных толщах (разрез СА) свойственны неровные, скругленные границы, наличие карбонатных прослоек по границе с вмещающими отложениями, слоистость в заполнителе. По нашим представлениям такие структуры сформировались по аналогии со структурами в морских отложениях, когда мерзлая толща была перекрыта водой и лед вытаял, а образовавшиеся пустоты заполнились аллювиальным материалом.

В каждом из генетических типов КС различаются размерами и формой. Разнообразие морфологии мы связываем с различной влажностью отложений как на момент формирования осадка и последующего промораживания, так и на момент вытаявания льда. 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.

Разнообразие криогенных структур как по отдельным разрезам, так и по простиранию позволяет предположить, что в их образовании климатический фактор был в большей степени фоном, а разнообразие структур определялось местными факторами, в частности – генезисом и составом отложений, геоморфологической позицией, определявшей влажность (льдиность) отложений.

5. ТИПОЛОГИЯ КРИОГЕННЫХ СТРУКТУР

В Нижнем Поволжье можно выделить два типа криогенных структур: псевдоморфозы и криотурбации.

5.1. Псевдоморфозы

Под псевдоморфозами понимаются вторичные структуры, возникшие в результате замещения одной породы другой с сохранением внешних форм исходного материала. На исследуемой территории выделено три подтипа:

5.1.1. Клиновидные псевдоморфозы

Структуры, встречающиеся чаще всего в палеопочвенных и лёссовых горизонтах, аллювии и морских осадках. Структуры имеют четкие, относительно ровные границы с вмещающими отложениями. КС в ЛПС заполнены вышележащим лёссовым материалом (рис. 4, (е)), в плане имеют полигональное строение, а в расчистке стенки расположены с шагом 40–60 см; в некоторых случаях хвостовая часть структур переходит в волосяные жилки либо теряется. КС различаются размерами по вертикали от 0.3 до 2.0 м, регулярным расположением в стенке и зафиксированы в разрезах Средняя Ахтуба (СА-4, СА-5), Ленинск (ЛН-2, ЛН-3), Батаевка (БТ-1), Райгород (РГ-1, РГ-3). Структуры в аллювии маломощные (до 0.3 м) с округлыми хвостами, по внешней границе – карбонатная кайма; заполнителем является аллювиальный песок (СА-1). В разрезе Косика (КОС-1) клиновидные структуры берут начало в эоловых отложениях и секут толщу нижележащих морских осадков (рис. 4, (в)).

5.1.2. Псевдоморфозы с неровными, измятыми границами и горизонтальными отростками

Встречены в разрезах Средняя Ахтуба (рис. 4, (б)), Черный Яр и Косика (рис. 4, (д)). Вертикальная протяженность структур варьируется в пределах 0.2–1.2 м. Формирование нынешней формы таких структур связано с обводненными условиями в период деградации ледяного тела – ввиду затопления территории (ЧЯ-1, КОС-2 – КОС-4), повышения водности реки или изменения положения русла (СА-3).

5.1.3. Мешкообразные псевдоморфозы

Представляют собой структуры U-образной формы с четкими, иногда неровными границами. Вертикальная протяженность структур 40–60 см, ширина 20–45 см. КС встречены в разрезах Косика, горизонт КОС-2 (рис. 4, (г)) и Райгород, горизонт РГ-2 (рис. 4, (ж)).

5.2. Криотурбации

Это различные нарушения в залегании грунтов в виде округлых структур, перемятия слоев, которые развиваются в сезонно-талом слое многолетней мерзлоты под влиянием, в большей степени, криогенного пучения и плотностной конвекции.

Такие структуры встречены в разрезе Средняя Ахтуба (СА-2) и представляют собой клубнеобразные образования, секущие слой палеопочвы и внедряющиеся в нижележащий аллювиальный горизонт (рис. 4, (а)). Центральные части слабо ожелезнены, границы округлые.

6. ХРОНОЛОГИЯ ЭТАПОВ КРИОГЕНЕЗА

Для обоснования возраста различных этапов криогенеза в Нижнем Поволжье выполнено абсолютное датирование методом OSL и ИКСЛ. Проведены необходимые тесты (тест чистоты кварца, предварительная оценка эквивалентной дозы, тест восстановления дозы, предварительная оценка температуры нагрева и др.), которые позволяют оценить надежность результатов измерений. Измерения эквивалентной дозы кварца проведены по стандартному протоколу SAR, а оценка дозы К-полевого шпата выполнена по протоколу IRSL SAR, что позволило провести сравнение итоговых возрастов по кварцу и калиевым полевым шпатам и оценить степень обнуления люминесцентного сигнала до момента захоронения материала. Концентрация радионуклидов рассчитана с помощью гамма-спектрометров высокого разрешения (Murray et al., 1987).

В рамках люминесцентного датирования четвертичных отложений Нижнего Поволжья получено большое количество дат, опубликованных ранее в серии работ (Янина и др., 2017; Kurbanov et al., 2021; Butuzova et al., 2022; Kurbanov et al., 2022; Taratunina et al., 2022). По результатам анализа материалов датирования с применением байесовской статистики построена хронология развития криогенеза на данной территории в позднем плейстоцене и выделены криогенные этапы для южного и северного районов (Таратунина и др., 2023, 2024). Некоторые этапы в изученных разрезах коррелируют по времени друг с другом, что позволяет проследить региональную агградацию/деградацию мерзлоты. В то же время частные события, отраженные в разрезах, говорят об условиях, способствовавших формированию локальных островов мерзлоты или глубокого сезонного промерзания. Выделенные этапы криогенеза для двух районов объединены в табл. 3 и показаны на рис. 2.

Таким образом, для территории севера Прикаспийской низменности выделено 6 этапов развития криогенеза в позднем плейстоцене. Хронология указывает на то, что КГ, отражающие региональное распространение мерзлых пород, выделяются для этапов II и IV (МИС 5b, МИС 3c). Остальные этапы нашли отражения либо лишь в отдельных разрезах, т.е. являются локальными

эпизодами похолодания или кратковременного продвижения островной мерзлоты на юг, что часто связано либо с особенностями пород, либо с геоморфологической позицией участка.

Обобщение данных полевых и аналитических исследований представлено в табл. 2.

7. ТИПЫ МЕРЗЛОТНЫХ СТРУКТУР И ИХ ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

При интерпретации палеогеографических условий в зонах распространения палеокриогенеза необходимо учитывать процесс деградации льда и связанный с этим процесс преобразования толщи отложений. Мы придерживаемся определения криогенеза, которое включает “совокупность процессов физического, химического и биологического преобразования толщи, происходящих вследствие влияния отрицательных температур, т.е. при их промерзании, пребывании в промерзшем состоянии и при их протаивании” (Макеев, 2019). Интерпретация палеогеографической обстановки развития криогенеза на территории Нижнего Поволжья осложнена трансгрессивно-регрессивными событиями в Каспийском регионе, особенно для районов двух южных разрезов (Черный Яр, Косика), которые находились в зоне непосредственного влияния моря, в прибрежно-морских (сильно увлажненных) условиях.

Таким образом, в Нижнем Поволжье облик структур обусловлен двумя параметрами: 1) степенью обеспеченности отложений влагой (количество осадков, величина миграции влаги в отложениях); 2) влиянием моря/реки на процесс деградации структур. В табл. 2 представлен наш взгляд на события, которые привели к формированию криогенных структур в Нижнем Поволжье.

Обобщая данные табл. 2 можно сделать следующие выводы. Структуры, сформированные в лёссово-почвенных отложениях, отражают наиболее холодные и продолжительные периоды: влажность этих пород при формировании структур была минимальна, и формирование КС происходило медленно. Поэтому криогенные горизонты, представленные структурами в ЛПС, интерпретируются как сформировавшиеся в условиях многолетней криолитозоны. Конечная форма структур зависит от условий протаивания. При протаивании льда в шлирах и клиньях структуры заполнились вышележащим лёссовым материалом, при этом форма клиньев не нарушена. Такие примеры можно наблюдать в Средней Ахтубе (СА-4, СА-5), или в Ленинске (ЛН-1, ЛН-2, ЛН-3). Те же ледяные клинья в лёссах, которые испытали воздействие воды после своего формирования, выглядят как СА-3 — наличие эрозионной границы в кровле

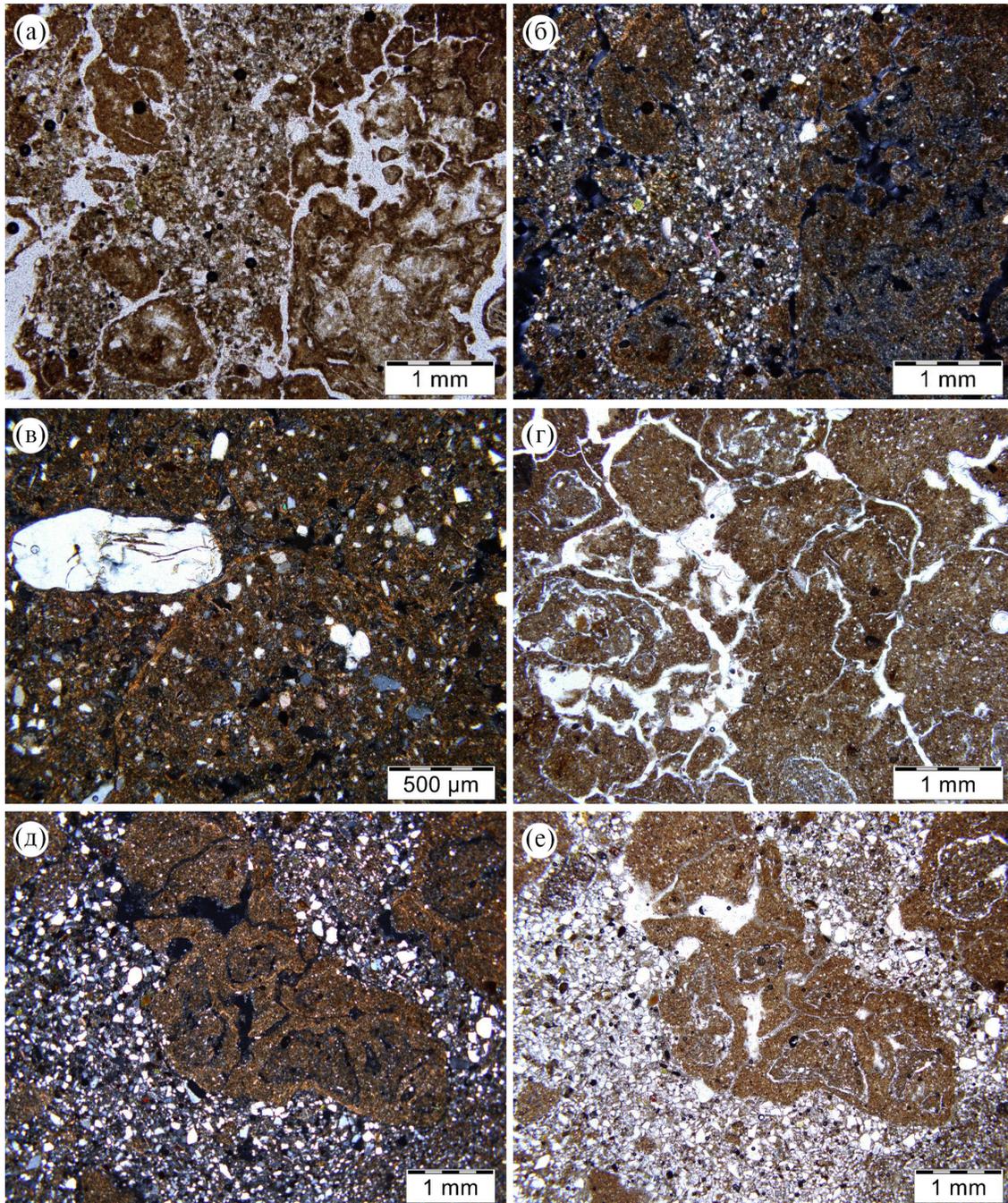


Рис. 6. Микростроение отложений в шлифах: (а–б) – микростроение поверхностных горизонтов палеопочв МИС 5с, сформированных на пойменных отложениях: трещины, заполненные пылеватым ательским материалом среди гумусово-глинистого материала (СА-5, глубина 15.57–15.62 м); (в) – ооид-округлый агрегат с кольцевой глинистой пленкой на поверхности, трещиноватый кварц (СА-1, глубина 6.20 м отн.); (г) – “луковые” агрегаты в магистральной поре, палеопочва МИС 5а (ЛН-2, глубина 13.73–13.78 м отн.); (д) – заполнение трещины разным по составу материалом: в нижней части – слоистый глинисто-пылеватый (водный генезис), сверху – мелкопесчаная засыпка (ЛН-1, глубина 7.28–7.38 м отн.); (е) – сочетание разных агрегатов: угловатые с острыми носами, комковатые, эллипсоидные с карбонатными нодулями (СА-5, глубина 15.58–15.63 м отн.)

Fig. 6. Microstructure of deposits in thin sections: (a–b) – microstructure of surface horizons of MIS 5s paleosols formed on floodplain deposits: cracks filled with silty Atelian material among humus-clay material (SA-5, depth 15.57–15.62 m); (c) – ooid-rounded aggregate with an annular clay film on the surface, fractured quartz (SA-1, depth 6.20 m rel.); (d) – “onion-like” aggregates in the main pore, palaeosol MIS 5a (LN-2, depth 13.73–13.78 m rel.); (e) – filling the crack with material of different composition: in the lower part – layered clayey-silty (water genesis), on the top – fine sand filler (LN-1, depth 7.28–7.38 m rel.); (f) – a combination of different aggregates: angular with sharp noses, lumpy, ellipsoid-like with carbonate nodules (SA-5, depth 15.58–15.63 m rel.).

Таблица 3. Криогенные этапы и типы криогенных структур в изученных разрезах Нижнего Поволжья
Table 3. Cryogenic stages and types of cryogenic structures in the studied sections of the Lower Volga region

Этап	Разрез (горизонт)	Генетический тип из табл. 1	Тип криогенных структур	Абс. отм. кровли КГ, м	Возраст этапа, тыс. л. н.
I МИС 5d	Косика (КОС-4)	II	Псевдоморфозы 15–30 см по вертикали, до 10 см в ширину; с песчаным заполнителем, с горизонтальными отростками	–3.05	~115–105
	Косика (КОС-3)		Псевдоморфозы 60–65 см по вертикали, до 25 см в ширину; заполнены в верхней части рыхлым бежевым песком, в хвостовой – серо-голубым сцементированным песком		
II МИС 5b	Средняя Ахтуба (СА-5)	I	Тонкие клиновидные структуры до 1.5 м	–0.64	~95–90
	Ленинск (ЛН-3)			–1.73	~95
	Райгород (РГ-3)	III	Маломощные (до 30 см) тонкие структуры	–2.35	~90
	Косика (КОС-2)	II	Мешкообразные и клинообразные структуры 40–60 см, заполненные песчаным материалом	–1.90	~90–83
III МИС 5a/ МИС 4	Ленинск (ЛН-2)	I	Тонкие клиновидные структуры до 1.0 м по вертикали	–2.10	~75
	Райгород (РГ-2)	III	Мешкообразные псевдоморфозы	1.87	~75
	Средняя Ахтуба (СА-4)	I	Тонкие клиновидные структуры до 1.0 м по вертикали	0.74	~70
	Батаевка (БТ-1)		Тонкие клиновидные структуры до 2.5 м по вертикали	0.72	~70
IV МИС 3c/ МИС 3b	Райгород (РГ-1)	I	Тонкие клиновидные структуры до 30 см	6.12	~52–50
	Средняя Ахтуба (СА-3)	III	Двухуровневые псевдоморфозы до 1.5 м с послонным заполнением	5.74	~45
	Черный Яр (ЧЯ-1)	II	Псевдоморфозы мощностью до 1.3 м	4.94	~47–45
V МИС 3a	Ленинск (ЛН-1)	I	Тонкие клиновидные структуры до 30 см по вертикали	4.32	~37–35
	Средняя Ахтуба (СА-2)	III	Криотурбации	7.16	~37
	Средняя Ахтуба (СА-1)		Клиновидные псевдоморфозы до 25 см по вертикали	8.36	~35
VI МИС 2	Косика (КОС-1)	II	Клиновидные псевдоморфозы 40–70 см по вертикали, заполненные переработанными осадками раннехвалынской трансгрессии	–1.90	~23–22

криогенного горизонта свидетельствует о затоплении территории и влиянии флювиальных процессов на формирование конечной формы структуры.

Ледяные клинья в морских/лагунных отложениях, при оттаивании испытывавшие воздействие воды (затопление, размыв, подтопление), выглядят как структуры горизонтов КОС-2, КОС-3 или КОС-4 (рис. 4, г, д)). Протаивание и формирование нынешнего облика структур криогенных горизонтов КОС-3 и КОС-4 происходило быстро, вероятно, при флуктуациях уровня каспийского бассейна и затоплении структур водой: поступающая вода способствовала вытаиванию льда; вмещающие отложения вытаивали медленнее ледяной жилы; тепловое воздействие воды сглаживало границы структур; сверху в полость оттаявшего ледяного клина с водой поступал песчаный материал. Цвет отложений (сизый/рыжий) позволяет судить об окислительно-восстановительных условиях, о существовании поверхности или ее отсутствии после заполнения псевдоморфозы. Разница в вертикальных размерах структур, имеющих разный заполнитель, но берущих начало на одном уровне, отражает высокую скорость формирования структур, а также разную глубину промерзания/существования ММП.

Если структуры зафиксированы как в северной, так и южной частях региона – мы реконструируем региональное распространение криолитозоны. В нашем случае это этапы II и IV (см. раздел 8). Единичные проявления (криогенные горизонты в отдельных разрезах) являются следствием локальных условий – температурных, влажностных, геоморфологической позиции – и генезиса осадка.

Таким образом, одни и те же условия среды в разных генетических типах отложений приводят к формированию структур разного облика, а решающее значение имеют процессы их деградации. При реконструкции истории криогенеза важно применять комплексный анализ: детальную характеристику соотношения вмещающих/перекрывающих отложений и заполнителя, их микростроение, морфологии кварцевых зерен, оценивать цикличность криогенеза с использованием ККК. Эти материалы в идеале должны дополняться данными палеопочвенного, палеоботанического и палеонтологического анализов, результатов абсолютного датирования.

При палеогеографических реконструкциях также важно учитывать похожие по морфологии трещины, возникающие за счет иссушения как при аридизации, так и при промерзании отложений. Они различаются составом (гранулометрическим и минералогическим) заполняющего материала, его микроструктурой и особыми контактами с вмещающей почвенной массой. Поэтому для более

обоснованных заключений о характере проявления палеокриогенеза применение микроморфологического метода для диагностики генезиса должно сопровождаться подробными макро-, мезо- и субмикроморфологическими исследованиями и оценкой ККК.

8. ПЕРИОДИЗАЦИЯ РАЗВИТИЯ КРИОГЕНЕЗА В НИЖНЕМ ПОВОЛЖЬЕ

Анализ диагностических признаков условий формирования отложений с криогенными структурами (табл. 1, 2), корреляция криогенных горизонтов на основе определения возраста отложений (табл. 3), позволили выявить в Нижнем Поволжье в позднем плейстоцене шесть этапов криогенеза – КНП (рис. 3).

8.1. Этап КНП-I, МИС 5d (~115–105 тыс. л. н.)

Для первого этапа описаны структуры в морских позднечазарских отложениях разреза Косика (КОС-4, КОС-3). Для КОС-4 выделены псевдоморфозы вертикальной протяженностью до 30 см, заполненные рыхлым рыжим песком, с расстоянием между клиньями 30–150 см; для КОС-3 выделены псевдоморфозы с расстоянием между клиньями 150–300 см, мощностью до 65 см с горизонтальными отростками, заполненных в верхней части также рыжим песком, а в хвостовой – сцементированным серо-синим песком. Заполнитель структур отсутствует выше в разрезе. Ввиду различий в облике структур и заполнителя мы предполагаем, что их формирование происходило в разные этапы, и более детальное подразделение будет возможно при выполнении подробного датирования. ККК для верхней части позднечазарских осадков составляет 0.93–1.13, что соответствует представлениям о многократном циклическом промерзании-протаивании отложений либо существовании маломощной многолетней мерзлоты. ККК для нижней части позднечазарской толщи характеризуется меньшими значениями (0.89), что свидетельствует о меньших количествах циклов промерзания-оттаивания для этого уровня отложений. Степень увлажнения осадков в разрезе Косика была выше по сравнению с лёссовыми разрезами северной части изученного района, однако глубина промерзания меньше, что согласуется с более южным положением разреза.

Формирование структур этапа КНП-I происходило в южной части Нижнего Поволжья в условиях колебаний уровня Каспия, вероятно, было быстрым и кратковременным: отсутствуют породы заполнителя выше в разрезе (возможно, денудирован), ККК уменьшается с глубиной (снижается степень криогенной переработки), железистые пески (свидетельство аэробных процессов).

На ВЕР в это время фиксируют первую стадию смоленского криогенного этапа, которая отражает самое раннее похолодание валдайской эпохи, наступившее после микулинского межледниковья.

8.2. Этап КНП-II, МИС 5с-а (~95–82 тыс. л. н.)

Начало этапа КНП-II (95–90 тыс. л. н.) соответствует концу МИС 5с – первой половине МИС 5b. В это время в субаэральных ЛПС (Средняя Ахтуба, Ленинск) сформировались псевдоморфозы клиновидной формы протяженностью до 2.0 м, расстояние между ними 40–60 см (СА-5, ЛН-3). Структуры секут горизонт палеопочвы МИС 5с, хвостами внедряются в микулинскую межледниковую палеопочву (МИС 5е); заполнитель структур – вышележащий лёссовый материал МИС 5b. ККК для вмещающих отложений (палеопочв) составляет 1.09–1.12 (разрез Средняя Ахтуба). Таким образом, в период формирования структур этого криогенного этапа для разрезов Средняя Ахтуба и Ленинск реконструируются схожие условия – субаэральное осадконакопление, присутствие маломощной многолетней мерзлоты, слабое увлажнение отложений.

В продолжение этапа КНП-II, в конце МИС 5b – начале МИС 5а (~90–82 тыс. л. н.) формируются структуры в разрезах Райгород и Косика. Для разреза Райгород (РГ-3), расположенного на широте разреза Средняя Ахтуба, но на противоположном (правом) берегу р. Волги, характерны псевдоморфозы в виде тонких клиньев мощностью до 30 см, заполненные вышележащей палеопочвой. Размер полигонов в плане 5–15 см. В строении разреза Косика (КОС-2) зафиксированы мешкообразные псевдоморфозы с однородным песчаным заполнителем, отсутствующим выше в разрезе (рис. 4, (г)). Структуры вертикальной протяженностью до 40 см внедряются в толщу плотных супесей (слои 4–6). Для нижней части супесей слоя 3 получена датировка 22.7 ± 1.3 тыс. л., а по материалу криогенной структуры (заполнитель), берущей начало на границе слоев 3 и 4, получена дата 82.8 ± 6.7 тыс. л., что свидетельствует о заполнении структуры не позднее ~82 тыс. л. н. Таким образом, криогенный этап соответствует возрасту ~85 тыс. л. н. Данные также говорят о большом перерыве в осадконакоплении, который можно объяснить флуктуациями уровня Каспийского моря в этом районе. Осушение поверхности приводило к формированию вертикальных ледяных шпиров в водонасыщенных суглинистых отложениях. При подъеме уровня Каспийского моря произошло оттаивание льда с заполнением структур песчаным материалом. Последующий подъем уровня моря в хвалынскую трансгрессию

уничтожил песчаный горизонт, оставив лишь заполнитель криогенных структур.

Этапу КНП-II на территории Восточно-Европейской равнины соответствует начало валдайского оледенения: в МИС 5b здесь выделяют II фазу смоленского криогенного этапа (Величко, 2012), сформировались пластические и разрывные деформации (рост ПЖЛ), солифлюкция ($57–55^{\circ}\text{C.ш.}$). В Каспийском регионе в это время реконструируется завершающая гирканская стадия позднехазарской трансгрессии. По современным представлениям (Янина, 2012), условия характеризовались обильными осадками и повышенным стоком рек. Уровень моря несколько превышал современный, воды гирканского бассейна проникали по долине Волги, формируя широкий эстуарий.

8.3. Этап КНП-III, начало МИС 4 (~75–70 тыс. л. н.)

В это время сформировались ледяные клинья ~1.0–2.0 м на расстоянии 40–60 см друг от друга, псевдоморфозы по которым мы можем наблюдать в разрезах Средняя Ахтуба (СА-4), Ленинск (ЛН-2) и Батаевка (БТ-1). Структуры секут горизонт палеопочвы МИС 5а, заполнителем является вышележащий лёсс (МИС 4). Границы структур с вмещающими отложениями четкие, хвосты жил ломаные. Значение ККК для почвенного горизонта (МИС 5а) составляет 1.07 (Средняя Ахтуба), 0.97 (Батаевка), 0.95 (Ленинск) что отвечает условиям циклического криогенеза, существованию редкоостровной, маломощной криолитозоны. Эти структуры формируют характерный стратиграфический репер, отделяющий МИС 5 от МИС 4 в лёссово-почвенных сериях региона.

В разрезе Райгород (РГ-2) описаны мешкообразные псевдоморфозы 55–60 см по вертикали, 20–50 см в ширину, с послойным заполнением вышележащим аллювиальным материалом, корочкой карбонатов по границам структур. Форма псевдоморфоз обусловлена вытаиванием ледяных клиньев, частичным размывом и последующим послойным заполнением (возможно, в режиме пойменного осадконакопления).

Криогенные структуры этого этапа, вскрытые в разрезах Средняя Ахтуба, Ленинск и Батаевка, заключены в субаэральных лёссово-почвенных отложениях, хотя и расположены на разных широтах, имеют схожее строение и параметры. В то же время разрез Райгород, расположенный на одной широте с разрезами Средняя Ахтуба и Ленинск, фиксирует структуры другого строения, заключенные в тонкодисперсных фациях аллювия. Все это свидетельствует о том, что характер структур зависит в большей степени от генезиса отложений,

чем от широтного положения (в пределах одного региона). КС этого этапа отмечались многими исследователями Нижнего Поволжья (Москвитин, 1962; Шкатова, 1975; Свиточ, Янина, 1997), он наиболее широко выражен в регионе и имеет региональное стратиграфическое значение для ательской свиты (Янина и др., 2017).

Палеогеографические условия развития этапа КНП-III характеризовались развитием валдайского оледенения на Восточно-Европейской равнине. В Каспии этот период также знаменуется существенными изменениями – началом глубокой ательской регрессии бассейна, сменой климатических параметров с влажных и относительно теплых (завершение формирования почвы МИС 5а) на холодные, сухие и ветренные (начало формирования лёссовых отложений МИС 4, агградация криолитозоны). Для этого времени мы реконструируем существование сплошной многолетней криолитозоны.

8.4. Этап КНП-IV, конец МИС 3с – начало МИС 3b (~52–45 тыс. л. н.)

В отложениях этого этапа в Нижнем Поволжье зафиксированы:

1) криогенные структуры в разрезе Средняя Ахтуба (СА-3): выражены в виде псевдоморфоз до 1.5 м, с двухуровневым строением. Структуры нарушают верхнюю часть лёссовой толщи, заполнены супесчано-песчаным материалом, а выше перекрыты аллювиальной толщей. Внешние границы структур неровные, с прослойкой карбонатов на контакте с вмещающими отложениями; внутренняя часть клиньев перемята. Для верхней части лёссов (глубина ~9.7 м) получена дата 48.7 ± 3.1 тыс. л. Поскольку структуры заполнены материалом (опесчаненным лёссом), отличным от вышележащего аллювия и вмещающих лёссовых отложений, а верхняя часть срезана последующей эрозией, формирование этих структур связано с подъемом уровня Волги, неоднократными эпизодами влияния реки на этот участок долины в виде периодического затопления и осушения. Воздействие воды привело к деградации льдистых структур, превращению клиновидной формы в мешкообразную, с оплывшими стенками, послойному заполнению. ККК здесь менее 1 (лёссовые отложения), что может быть связано как с более теплыми условиями, так и со смывом верхней части лёссовых отложений, которые отвечали наибольшему числу циклов промерзания-протаивания, а значит – более высокому значению ККК;

2) в разрезе Черный Яр (ЧЯ-1) описаны псевдоморфозы с песчаным наполнителем вертикальной протяженностью до 1.3 м, расположенные на расстоянии 50–150 см. Структуры нарушают верхнюю

часть горизонта с признаками почвообразования (слой 7). Датировка верхней части слоя 7 (57.0 ± 3.1 тыс. л. н.) и заполнителя структур (43.8 ± 2.2 тыс. л. н.) позволяют оценить возраст формирования структур ~43 тыс. л. н., т.е. в период похолодания МИС 3b, когда на низких геоморфологических уровнях, на участках с повышенным увлажнением существовали условия для формирования локальных участков мерзлых пород. Отложения выше (нижняя часть слоя 6, над структурой) датируются 32.4 ± 2.0 тыс. л. Здесь, в пойменных или лагуновых условиях, происходило интенсивное промерзание-протаивание, что привело к формированию вертикальных и горизонтальных шпиров льда. Это отражено в виде сетчатой текстуры вмещающих глинистых отложений. Далее, с повышением уровня Каспия и продвижением морских вод произошло протаивание отложений;

3) в разрезе Райгород (РГ-1) на глубине ~7.7 м описаны грунтовые клинья до 30 см по вертикали, расположенные на расстоянии 30–50 см друг от друга; ширина структур выдержана по вертикали. Они секут слабо развитую почву, и заполнены вышележащим лёссовым материалом, хвосты структур проникают на всю глубину вмещающей палеопочвы. Структуры развиты в лёссово-почвенных субаэральных отложениях, сформировавшихся на более дренированных водоразделах, по сравнению со структурами Средней Ахтубы.

В Каспийском море, по-видимому, отмечается некоторое повышение уровня, что способствовало проникновению вод в долину Волги и протаиванию мерзлых отложений. На Восточно-Европейской равнине в это время и начинается брянский мега-интерстадиал – теплый период внутри валдайского оледенения (Динамика ..., 2002). В Нижнем Поволжье в этот период реконструируется существование сплошной многолетней криолитозоны для северной части (разрезы Средняя Ахтуба, Райгород) и маломощной редкоостровной мерзлоты либо глубокого сезонного промерзания – для южной части региона (разрез Черный Яр).

8.5. Этап КНП-V, начало МИС 3a (37–35 тыс. л. н.)

В Нижнем Поволжье этот этап выражен в разрезе Ленинск (ЛН-1), а также в виде двух уровней в разрезе Средняя Ахтуба (СА-2 и СА-1):

1) в разрезе Ленинск (ЛН-1) для этого этапа зафиксированы клиновидные псевдоморфозы малой мощности (до 30 см), выраженные на всю мощность слабо развитой палеопочвы и заполненные вышележащим лёссовым материалом. Эти структуры сформировались в субаэральных водораздельных условиях, и по облику подобны структурам разреза Райгород (РГ-1);

2) нижний горизонт этого этапа в разрезе Средняя Ахтуба (СА-2, глубина 7.7–8.0 м) представлен клубнеобразными криотурбациями различного состава (песчаными, супесчаными), которые нарушают однородность отложений пойменных почв и аллювиальной толщи. Границы структур четкие; верхняя граница горизонта неровная. Подобные криотурбации в настоящее время характерны для тундры, где фиксируются в структуре пятен-медальонов в пределах слоя сезонного оттаивания. Структуры сформировались, когда поверхность находилась в мерзлом состоянии, а летом оттаивала на небольшую глубину. Криотурбации отвечают сильно увлажненным условиям, когда водонасыщенный слой перемешивается в результате процессов пучения и плотностной конвекции;

3) верхний горизонт (СА-1, ~6.2 м) представлен псевдоморфозами различного строения: клиновидными структурами, формами с горизонтальными отрезками, слоистыми структурами, описанными ранее как “мерзлотные структуры облекания”, которые образуются в условиях как постоянно существующего, так и периодически существующего бассейна при наличии вечной мерзлоты. Для всех структур этого горизонта характерна небольшая мощность (до 25 см) в пределах почвенного горизонта, четкие границы с вмещающими.

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 на разных участках долины отразилось в стабилизации рельефа и появлении палеопочвенных горизонтов в толще аллювия (Средняя Ахтуба). В регионе реконструируется маломощная сплошная или редкоостровная криолитозона. На Восточно-Европейской равнине в это время фиксируется завершающий этап формирования брянской палеопочвы.

8.6. Этап КНП-VI, середина МИС 2 (~23–22 тыс. л. н.)

Этап несколько предшествует максимальной фазе поздневалдайского оледенения на северо-западе ВЕР (Astakhov et al., 2016; Zaretskaya et al., 2024). В Нижнем Поволжье структуры этого этапа зафиксированы только в разрезе Косика (КОС-1) в виде клиновидных форм до 50 см по вертикали, с четкими границами и заполнителем из рыжего сцементированного материала вышележащего горизонта (раннехвалынских осадков), для нижней части которого получены даты 22.7 ± 1.3 и 22.0 ± 1.1 тыс. л. На ВЕР для этого времени фиксируется начало развития ярославского криогенного горизонта, для которого характерны клиновидные

образования до 5 м по вертикали и шириной по верху до 3 м; линейный размер полигонов до 20 м. В Каспийском море отмечается подъем уровня моря и развитие хвалынской трансгрессии (Курбанов и др., 2023). Для региона реконструируется маломощная редкоостровная мерзлота либо глубокое сезонное промерзание, а яркая выраженность структур обусловлена высокой льдистостью отложений и последующей трансформацией структур в процессе оттаивания.

На рис. 7 приведена корреляция с МИС и криогенными этапами на Восточно-Европейской равнине.

Неустойчивость геотермического режима на территории Восточно-Европейской равнины в позднем плейстоцене обусловила многократные колебания с фазами отрицательных и положительных температур в верхней части литосферы (Динамика ..., 2002). В отложениях позднего плейстоцена на Восточно-Европейской равнине выделяется смоленский криогенный горизонт (МИС 4), для которого характерны криотурбации и клиновидные структуры размером до 3 м (Динамика..., 2002). Поверхность брянской ископаемой почвы (МИС 3) деформирована клиновидными структурами (размером более 3 м) владимирского криогенного горизонта. Периоду максимум развития последнего валдайского ледникового покрова (МИС 2) отвечает ярославский криогенный горизонт с псевдоморфозами по ПЖЛ, многочисленными криотурбациями и следами солифлюкции. Для этого времени характерны наиболее крупные псевдоморфозы с размером по вертикали 3–4 м и более. Условия соответствовали области сплошной мерзлоты и низких отрицательных температур пород. В целом было установлено, что суровость мерзлотных условий возрастала от среднего плейстоцена к позднему, а в климатические экстремумы происходило глубокое выхолаживание по сравнению величинами потепления в оптимумы (Динамика ..., 2002).

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований в 2018–2022 гг. впервые для территории Нижнего Поволжья (НП) детально описаны и изучены псевдоморфозы, грунтовые клинья и криотурбации, доказано их криогенное происхождение, получены данные об абсолютном возрасте отложений, вмещающих криогенные структуры, что позволило выделить временные интервалы их формирования.

Комплексное изучение криогенных структур (КС) в НП с применением криолитологических, седиментологических, палеогеографических, геоморфологических, палеопедологических методов

и абсолютного датирования позволило выявить следующие закономерности:

1. На основе анализа формы, расчета ККК, изучения микростроения, морфоскопии кварцевых зерен вмещающих и заполняющих псевдоморфозы отложений сделан вывод о криогенном происхождении описанных структур.

2. В НП выделены различные структуры в трех генетических группах осадков: лёссово-почвенных сериях, аллювиальных и лиманно-морских отложениях. Различие между структурами обусловлено литологическим составом отложений и их обеспеченностью влагой как на момент формирования осадка, так и на момент деградации криогенной структуры (вытаивания льда). Влажность отложений, в свою очередь, напрямую зависела от геоморфологической позиции и изменений уровня Каспийского моря. В НП не все геологические свидетельства криогенных событий получили повсеместное распространение: их выраженность в разрезах и сохранность в геологической летописи связаны со множеством факторов (трансгрессивно-регрессивные события Каспийского моря, влажность отложений, скорости осадконакопления и др.). Частично это связано с расположением доступных для изучения обнажений исключительно в современной долине Волги.

3. Среди КС выделяются две группы: 1) тонкие, глубокие псевдоморфозы в палеопочвах, перекрытых лёссами; отражают продолжительные суровые

климатические условия – низкие температуры, существование многолетней криолитозоны; 2) псевдоморфозы в морских/лагунных отложениях, до 60 см по вертикали, с неровными границами – отражают короткие события с глубоким сезонным промерзанием/существованием редкоостровной криолитозоны.

4. Наиболее ярко криогенез проявился в тонкодисперсных, более влагоемких отложениях – палеопочвенных горизонтах, пойменных и морских осадках. На макроуровне криогенным признаком в лёссах является их блоковая отдельность, связанная с низким коэффициентом расширения/сжатия этих пород.

5. По результатам люминесцентного датирования определен возраст криогенных событий. На основе ~100 дат в НП выделено шесть этапов развития криогенеза. Два из них (КНП-II и КНП-IV) являются общими для южной и северной частей, что свидетельствует о масштабности (региональности) распространения криогенеза. На севере региона криолитозона была сплошной, а на юге – редкоостровной либо сезонной с глубоким промерзанием. Для четырех этапов криогенез имел локальное распространение, т.е. существовали местные условия охлаждения/глубокого сезонного промерзания для формирования КС (например, ввиду особенностей геоморфологического положения или положения берега моря),

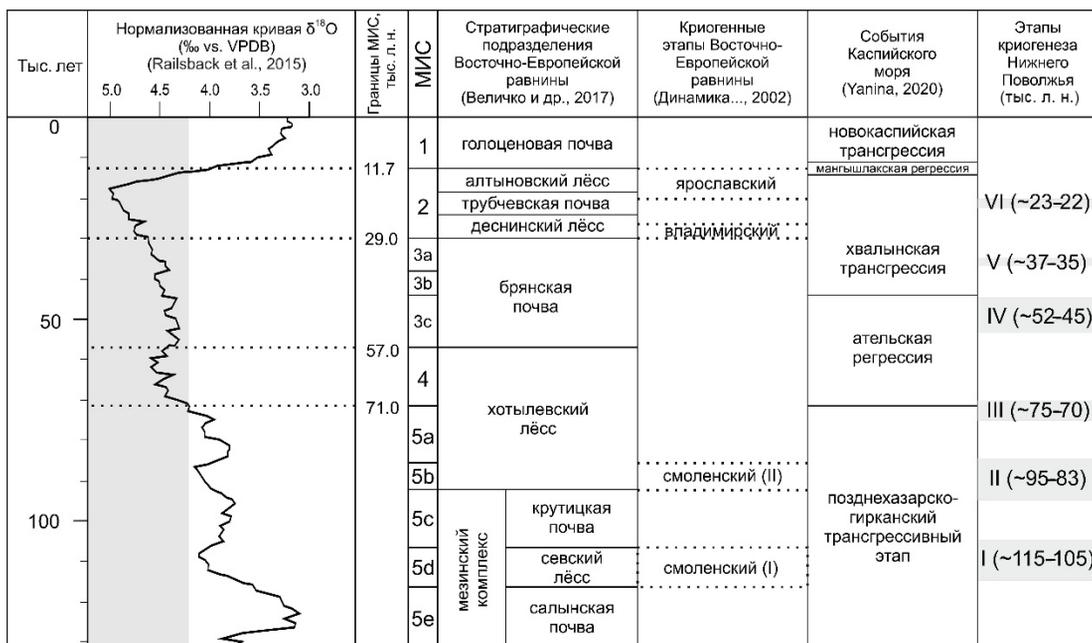


Рис. 7. Корреляция криогенных событий Восточно-Европейской равнины и Нижнего Поволжья с глобальными и каспийскими событиями.

Fig. 7. Correlation of cryogenic events in the East European Plain and the Lower Volga region with global and Caspian events.

либо существовала редкоостровная многолетняя криолитозона.

6. Выделенные этапы развития криогенеза в Прикаспийской низменности не всегда соответствуют криогенным горизонтам ВЕР, выделенным А.А. Величко (рис. 7): 1) смоленскому криогенному горизонту соответствуют два этапа в НП (МИС 5d и 5b); 2) криогенный этап выделен в НП на границе МИС 5a / МИС 4, в то время как на территории ВЕР сформировался хотылевский лёсс без признаков криогенных деформаций; 3) во время формирования брянской ископаемой почвы в НП вскрыты два горизонта с криогенными деформациями (IV и V этапы, 52–45 и 37–35 тыс. л. соответственно); 4) VI криогенный этап в НП частично коррелируется с ярославским криогенным горизонтом на ВЕР. Кратковременность синхронизации в последнем случае можно объяснить трансгрессивным циклом в Каспии, который, вероятно, уничтожил следы самого холодного периода позднего плейстоцена. Расхождения также могут быть связаны с более детальным геохронологическим обеспечением для отложений Нижнего Поволжья.

7. Одни и те же условия среды в разных генетических типах отложений приводят к формированию структур разного облика, что напрямую зависит от влажности и состава отложений, однако решающее значение в конечном облике структур имеют условия оттаивания и сопутствующие изменения морфологии структур.

8. Палеогеографические реконструкции, связанные с историей криогенеза, должны основываться на комплексном анализе, включающем детальное полевое описание структур с характеристикой соотношения с вмещающими отложениями, расчет ККК для оценки цикличности криогенеза, изучение морфоскопии кварцевых зерен, микроморфологии, седиментологические характеристики, геохронологию, типизацию структур. Более обоснованная характеристика истории криогенеза должна базироваться на связи палеоструктур с современными аналогами.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за полезные советы и рекомендации, и также А.В. Панину, Д.А. Солодовникову, Е.Н. Бадюковой и А.О. Макееву за обсуждение результатов. Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 19-77-10077 (абсолютное датирование), гранта РФФИ 20-55-56046 (полевые работы), в рамках госзадания ИГ РАН № FMWS-2024-0005 (обзор литературы), географического факультета МГУ № 121051100135-0 (криолитоло-

гические анализы) и № 121051100164 (палеопочвенные 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>
- Бердников В.В. (1976). Палеокриогенный микрорельеф центра Русской равнины. М.: Наука. 126 с.
- Васильев Ю.М. (1961). Антропоген Южного Заволжья. М.: Изд-во АН СССР. 128 с.
- Величко А.А. (1965). Криогенный рельеф перигляциальной зоны (криолитозоны) Русской равнины. В сб.: *Четвертичный период и его история*. М.: Наука. С. 104–120.
- Величко А.А. (1973). Природный процесс в плейстоцене. М.: Наука. 256 с.
- Величко А.А. (2012). Эволюционная география: проблемы и решения. М.: ГЕОС. 564 с.
- Величко А.А., Борисова О.К., Кононов Ю.М. и др. (2017). Реконструкция событий позднего плейстоцена в перигляциальной зоне юга Восточно-Европейской равнины. *Доклады Академии наук*. Т. 475. № 4. С. 448–452. <https://doi.org/10.7868/S0869565217220194>
- Гельфан А.Н., Калугин А.С. (2021). Многолетняя мерзлота в бассейне Каспия как возможный триггер поздней Хвалынской трансгрессии: проверка гипотезы с помощью модели формирования речного стока. *Водные ресурсы*. Т. 48. № 6. С. 609–621. <https://doi.org/10.31857/S0321059621060067>
- Динамика ландшафтных компонентов и внутренних морских бассейнов Северной Евразии за последние 130 000 лет. (2002). Под ред. А.А. Величко. М.: ГЕОС. 296 с.
- Изменение климата и ландшафтов за последние 65 миллионов лет (кайнозой: от палеоцена до голоцена). (1999). Под ред. А.А. Величко. М.: ГЕОС. 260 с.
- Ковда И.В. (2022). Общие признаки в мерзлотных и слитых почвах на макро- и микроуровнях. *Почвоведение*. Вып. 55. № 10. С. 1201–1214. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22100082>
- Конищев В.Н. (1998). Взаимосвязь состава и температуры криогенных почв и грунтов. *Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География*. № 3. С. 9–14.
- Курбанов Р.Н., Беляев В.Р., Свистунов М.И. и др. (2023). Новые данные о возрасте раннехвалынской трансгрессии каспийского моря. *Известия РАН. Серия географическая*. Т. 87. № 3. С. 403–419. <https://doi.org/10.31857/S2587556623030081>
- Макеев О.В. (2019). Криология почв. М.: Наука. 464 с.
- Москвитин А.И. (1962). Плейстоцен Нижнего Поволжья. М.: Изд-во АН СССР. 263 с.
- Наугольных С.В. (2018). Палеопочвы верхнего плейстоцена из окрестностей г. Раменское (Московская обл.), их строение и возможная интерпретация. *Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода*. № 76. С. 86–98.
- Рогов В.В., Стрелецкая И.Д., Таратунина Н.А. и др.

- (2020). Позднеплейстоценовый криогенез в Нижнем Поволжье. *Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География*. № 6. С. 73–85.
- Розенбаум Г.Э. (1985). Покровный палеокриогенный комплекс на севере валдайской перигляциальной зоны. В сб.: *Развитие криолитозоны Евразии в верхнем кайнозое*. М.: Наука. С. 4–15.
- Рябуха А.Г. (2015). Особенности морфологии и закономерности распространения позднеплейстоценовых эоловых форм рельефа Зауральско-Прикаспийского региона. *Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН*. № 4. С. 1–18.
- Рябуха А.Г. (2019). Наследие плейстоценовой криолитозоны в ландшафтах Заволжско-Уральского региона. *Успехи современного естествознания*. № 10. С. 164–170.
- Свиточ А.А. (2014). Большой Каспий: строение и история развития. М.: Изд-во Моск. ун-та. 272 с.
- Сергеев Е.М., Минервин А.В. (1960). Сущность процесса облессования в подзолистой зоне. *Вестник Моск. ун-та. Сер. 4. Геология*. № 3. С. 3–14.
- Серебряный Л.Р. (1960). Перигляциальные образования южной Скандинавии. В сб.: *Перигляциальные явления на территории СССР*. М.: Изд-во Моск. ун-та. С. 267–275.
- Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К. (2008). Климатические обусловленные изменения речного стока на равнинах Северной Евразии в позднеледниковье и голоцене. *Водные ресурсы*. Т. 35. № 4. С. 406–416.
- Сидорчук А.Ю., Украинцев В.Ю., Панин А.В. (2021). Оценка годового стока Волги в позднеледниковье по данным о размерах палеорусел. *Водные ресурсы*. Т. 48. № 6. С. 643–655.
<https://doi.org/10.31857/S0321059621060171>
- Стрелецкая И.Д. (2017). Клиновидные структуры на южном берегу Финского залива. *Криосфера Земли*. Т. 21. № 1. С. 3–12.
[https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-1\(3-12\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-1(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.
- Таратунина Н.А. (2022). Позднеплейстоценовый криогенез в Нижнем Поволжье: условия и хронология этапов развития. Дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ. 169 с.
- 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>
- 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>
- Тимофеев Д.А., Втюрина Е.А. (1983). Терминология перигляциальной геоморфологии. М.: Наука. 233 с.
- Чепалыга А.Л. (2006). Эпоха экстремальных затоплений в аридной зоне Северной Евразии. В сб.: *Позднекайнозойская геологическая история севера аридной зоны. Материалы международного симпозиума*. Ростов-на-Дону/Азов. 26–29 сентября 2006 г. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН. С. 166–171.
- 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.
- Янина Т.А., Свиточ А.А., Курбанов Р.Н. и др. (2017). Опыт датирования плейстоценовых отложений Нижнего Поволжья методом оптически стимулированной. *Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География*. № 1. С. 21–29.
- Astakhov V., Shkatova V., Zastrozhnov A., Chuyko M. (2016). Glaciomorphological Map of the Russian Federation. *Quat. Int.* V. 420. P. 4–14.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.09.024>
- 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>
- Buylaert J.P., Jain M., Murray A.S. et al. (2012). A robust feldspar luminescence dating method for Middle and Late Pleistocene sediments. *Boreas*. V. 41. Iss. 3. P. 435–451.
<https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2012.00248.x>
- Ewertowski M. (2009). Ice-wedge Pseudomorphs and Frost-cracking Structures in Weichselian Sediments, Central-West Poland. *Permafrost and Periglacial Processes*. V. 20. Iss. 4. P. 316–330.
<https://doi.org/10.1002/ppp.657>
- French H.M., Demitroff M., Forman S.L. (2003). Evidence for Late Pleistocene Permafrost in the New Jersey Pine Barrens (latitude 39° N), eastern USA. *Permafrost and Periglacial Processes*. V. 14. Iss. 3. P. 259–274.
<https://doi.org/10.1002/ppp.456>
- Garankina E.V., Lobkov V. A., Shorkunov I.G., Belyaev V.R. (2022). Identifying relict periglacial features in watershed landscape and deposits of Borisoglebsk Upland, Central European Russia. *J. Geol. Soc.* V. 179. № 5.
<https://doi.org/10.1144/jgs2021-135>
- Gelfan A., Panin A., Kalugin A. et al. (2024). Hydroclimatic processes as the primary drivers of the Early Khvalynian transgression of the Caspian Sea: new developments. *Hydrology and Earth System Sciences*. V. 28. P. 241–259.
<https://doi.org/10.5194/hess-28-241-2024>
- Guhl A., Bertran P., Zielhofer C., Fitzsimmons K.E. (2012). Optically Stimulated Luminescence (OSL) dating of sand-filled wedge structures and their fine-grained host sediment from Jonzac, SW France. *Boreas*. V. 42. Iss. 2. P. 317–332.
<https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2012.00270.x>
- Költringer C., Stevens T., Bradák B. et al. (2020). Envi-

- romagnetic study of Late Quaternary environmental evolution in Lower Volga loess sequences, Russia. *Quat. Res.* V. 103. P. 49–73.
<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>
- Költringer 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.* V. 209. № 2. 103736.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103736>
- 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. 101376.
<https://doi.org/10.1016/j.quageo.2022.101376>
- Leszczynski S., Nemeč W. (2020). Sedimentation in a synclinal shallow-marine embayment: Coniacian of the North Sudetic Synclinorium, SW Poland. *The Depositional Record.* № 6. Iss. 1. P. 44–171.
<https://doi.org/10.1002/dep2.92>
- Makeev A., Lebedeva M., Kaganova A. et al. (2021). Pedosedimentary environments in the Caspian Lowland during MIS 5 (Srednaya Akhtuba reference section, Russia). *Quat. Int.* V. 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. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* V. 115. № 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. *Quat. Sci. Rev.* V. 111. P. 94–106.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.01.012>
- Sidorchuk A., Panin A., Borisova O. (2024). Hydrological Regime of Rivers in the Periglacial Zone of the East European Plain in the Late MIS 2. *Quaternary.* 7. 32.
<https://doi.org/10.3390/quat7030032>
- Starkel L. (1988). Paleogeography of the periglacial zone in Poland during the maximum advance of the Vistulian ice sheet. *Geogr. Pol.* V. 55. P. 151–163.
- Taratunina N., Rogov V., Streletskaya 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.* V. 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. *Quat. Geochronology.* V. 72. 101369.
<https://doi.org/10.1016/j.quageo.2022.101369>
- 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. № 3. P. 652–666.
<https://doi.org/10.1111/bor.12070>
- Vandenberghe J., Pissart A. (1993). Permafrost changes in Europe during the last glacial. *Permafrost and Periglacial Processes.* № 4. Iss. 2. P. 121–135.
<https://doi.org/10.1002/ppp.3430040205>
- Yanina T. (2020). Environmental variability of the Ponto-Caspian and Mediterranean basins during the last climatic macrocycle. *Geography, Environment, Sustainability.* V. 13. № 4. P. 6–23.
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2020-120>
- Zaretskaya N., Panin A., Utkina A., Baranov D. (2024). Aeolian sedimentation in the Vychegda River valley, north-eastern Europe, during MIS 2–1. *Quat. Int.* V. 686–687. P. 83–98.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2023.05.022>

STRATIGRAPHY, CHRONOLOGY AND PALEO GEOGRAPHY OF LATE QUATERNARY CRYOGENESIS IN NORTHERN CASPIAN LOWLAND¹

N. A. Taratunina^{a,b,#}, V. V. Rogov^a, M. P. Lebedeva^c, I. D. Streletskaya^a,
T. A. Yanina^a, M. S. Lukyanycheva^b, F. Khormali^d, and R. N. Kurbanov^{a,b}

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

^b Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

^c Dokuchaev Soil Science Institute RAS, Moscow, Russia

^d Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

E-mail: taratuninana@gmail.com

¹ For citation: Taratunina N.A., Rogov V.V., Lebedeva M.P. et al. (2024). Stratigraphy, chronology and paleogeography of Late Quaternary cryogenesis in Northern Caspian Lowland. *Geomorfologiya i Paleogeografiya.* V. 55. № 3. P. 5–31.
<https://doi.org/10.31857/S2949178924030018>; <https://elibrary.ru/PMURUU>

The article presents a generalization of the results of field and analytical studies of cryogenic phenomena in the Lower Volga region. For the first time for this territory, pseudomorphs, soil wedges and cryoturbations were described and studied in detail. Their cryogenic genesis was substantiated. In the Lower Volga region, various structures have been identified in loess-soil series, alluvial and marine deposits. The development of cryogenesis in similar environmental conditions, but in different genetic types of sediments, leads to the formation of structures of different shapes, which directly depends on the humidity and composition of the sediments. The processes of ice degradation and accompanying changes in their morphology are of decisive importance in the final appearance of soil structures. Absolute dating of the deposits containing cryogenic structures made it possible to identify the time intervals of their formation. Six stages of cryogenesis in the Late Pleistocene were identified based on the structural features, their stratigraphic position, and the results of laboratory analyzes. Stage I is characterized by the spread of deep seasonal freezing in the region, recorded in coastal marine sediments in MIS 5d. For stages II-III (MIS 5b, MIS 4, respectively), the existence of a perennial permafrost zone is reconstructed, cryogenic forms are recorded in various genetic types of sediments. Stage IV (MIS 3c – MIS 3b) corresponds to the existence of a perennial permafrost zone only for the northern part of the region (Srednyaya Akhtuba and Raygorod sections) and thin sporadic permafrost or deep seasonal freezing for the southern part of the Volga River valley (Chernyy Yar section). Stages V (MIS 3a) and VI (MIS 2) are characterized by the spread of thin sporadic permafrost or deep seasonal freezing. The identified major stages of the development of permafrost in the Caspian Lowland significantly refine the available data on the cryogenic horizons of the East European Plain.

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

ACKNOWLEDGMENTS

The studies were supported by the Russian Science Foundation grant № 19-77-10077 (absolute dating), the RFBR grant № 20-55-56046 (palaeosoil research), and within the framework of the state assignment of the Faculty of Geography of Moscow State University № 121051100135-0 (cryolithological analyses).

REFERENCES

- Astakhov V., Shkatova V., Zastrozhnov A., Chuyko M. (2016) Glaciomorphological Map of the Russian Federation. *Quat. Int.* V. 420. P. 4–14.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.09.024>
- Badyukova E.N. (2021). Caspian Sea Level Fluctuations in the Neopleistocene (Was There an Atelian Regression?). *Oceanology.* V. 61. № 2. P. 283–291.
<https://doi.org/10.1134/S0001437021010021>
- Berdnikov V.V. (1976). Paleokriogennyi mikrorel'ef tsentra Russkoi ravniny (Paleo-cryogenic microrelief of the center of the Russian Plain). Moscow: Nauka (Publ.). 126 p. (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. 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>
- Buylaert J.P., Jain M., Murray A.S. et al. (2012). A robust feldspar luminescence dating method for Middle and Late Pleistocene sediments. *Boreas.* V. 41. Iss. 3. P. 435–451.
<https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2012.00248.x>
- Chepalyga A.L. (2006). The era of extreme flooding in the arid zone of Northern Eurasia. In: *Pozdněkainozoiskaya geologicheskaya istoriya severa aridnoi zony. Materialy mezhdunarodnogo simpoziuma. Rostov-na-Donu/Azov. 26–29 sentyabrya 2006 g.* Rostov-na-Donu: YuNTs RAN (Publ.). P. 166–171. (in Russ.)
- Ewertowski M. (2009). Ice-wedge Pseudomorphs and Frost-cracking Structures in Weichselian Sediments, Central-West Poland. *Permafrost and Periglacial Processes.* V. 20. Iss. 4. P. 316–330.
<https://doi.org/10.1002/ppp.657>
- French H.M., Demitroff M., Forman S.L. (2003). Evidence for Late Pleistocene Permafrost in the New Jersey Pine Barrens (latitude 39° N), eastern USA. *Permafrost and Periglacial Processes.* V. 14. Iss. 3. P. 259–274.
<https://doi.org/10.1002/ppp.456>
- Garankina E.V., Lobkov V. A., Shorkunov I.G., Belyaev V.R. (2022). Identifying relict periglacial features in watershed landscape and deposits of Borisoglebsk Upland, Central European Russia. *J. Geol. Soc.* V. 179. № 5.
<https://doi.org/10.1144/jgs2021-135>
- Gelfan A.N., Kalugin A.S. (2021). Permafrost in the Caspian Basin as a Possible Trigger of the Late Khvalynian Transgression: Testing Hypothesis Using a Hydrological Model. *Water Resources.* V. 48. № 6. P. 831–843.
<https://doi.org/10.1134/S0097807821060063>
- Gelfan A., Panin A., Kalugin A. et al. (2024). Hydroclimatic processes as the primary drivers of the Early Khvalynian transgression of the Caspian Sea: new developments. *Hydrology and Earth System Sciences.* V. 28. P. 241–259.
<https://doi.org/10.5194/hess-28-241-2024>
- Guhl A., Bertran P., Zielhofer C., Fitzsimmons K.E. (2012). Optically Stimulated Luminescence (OSL) dating of sand-filled wedge structures and their fine-grained host sediment from Jonzac, SW France. *Boreas.* V. 42. Iss. 2. P. 317–332.
<https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2012.00270.x>

- 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.* V. 103. P. 49–73. <https://doi.org/10.1017/qua.2020.73>
- Költringer 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.* V. 209. № 2. 103736. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103736>
- Kovda I.V. (2022). Common Macro- and Microfeatures of Vertisols and Cryosols. *Eurasian Soil Science.* V. 55. № 10. P. 1335–1347. <https://doi.org/10.1134/S1064229322100088>
- Konishchev V.N. (1998). Vzaimosvyaz' sostava i temperatury kriogennykh pochv i gruntov (Relationship between the composition and temperature of cryogenic soils). *Vestnik Mosk. Un-ta. Seriya 5. Geografiya.* № 3. P. 9–14. (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. (in Russ.). <https://doi.org/10.1111/bor.12478>
- Kurbanov R.N., Belyaev V.R., Svistunov M.I. et al. (2023). New data on the age of the Early Khvalynian transgression of the Caspian Sea. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya.* V. 87. № 3. P. 403–419. <https://doi.org/10.31857/S2587556623030081>
- 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. 101376. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2022.101376>.
- Leszczynski S., Nemeč W. (2020). Sedimentation in a synclinal shallow-marine embayment: Coniacian of the North Sudetic Synclinorium, SW Poland. *The Depositional Record.* № 6. Iss. 1. P. 44–171. <https://doi.org/10.1002/dep2.92>
- Makeev A., Lebedeva M., Kaganova A. et al. (2021). Pedosedimentary environments in the Caspian Lowland during MIS 5 (Srednaya Akhtuba reference section, Russia). *Quat. Int.* V. 590. P. 164–180.
- Makeev O.V. (2019). *Kriologiya pochv* (Soil cryology). Moscow: RAN (Publ.). 464 p. (in Russ.)
- Moskvitin A.I. (1962). Pleistotsen nizhnego Povolzh'ya (Pleistocene of the Lower Volga region). 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. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* V. 115. № 2. P. 263–288.
- Naugol'nykh S.V. (2018). Paleosols of the Upper Pleistocene from the vicinity of the city of Ramenskoye (Moscow region), their structure and possible interpretation. *Byulleten' Komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda.* № 76. P. 86–98. (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 climatostratigraphic nature of isotope stages and substages. *Quat. Sci. Rev.* V. 111. P. 94–106. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.01.012>
- Rogov V.V., Streletskaya I.D., Taratunina N.A. et al. (2020). Late Pleistocene cryogenesis in the Lower Volga River region. *Vestnik Mosk. Un-ta. Seriya 5. Geografiya.* № 6. P. 73–85. (in Russ.)
- Rozenbaum G.E. (1985). Cover paleocryogenic complex in the north of the Valdai periglacial zone. In.: *Razvitie kriolitozony Evrazii v verkhnem kainozoe.* Moscow: Nauka (Publ.). P. 4–15. (in Russ.)
- Ryabukha A.G. (2015). Peculiarities of morphology and patterns of distribution of late Pleistocene eolian landforms of the Trans-Ural-Caspian region. *Byulleten' Orenburgskogo nauchnogo tsentra UrO RAN.* № 4. P. 1–18. (in Russ.)
- Ryabukha A.G. (2019). Heritage of the Pleistocene cryolithozone in the landscapes of the Zavolzhsko-Ural region. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya.* № 10. P. 164–170. (in Russ.)
- Serebryanny L.R. (1960). Periglacial formations in southern Scandinavia. In.: *Periglyatsial'nye yavleniya na territorii SSSR.* P. 267–275. Moscow: MGU (Publ.). (in Russ.)
- Sergeev E.M., Minervin A.V. (1960). The essence of the process of loess formation in the podzolic zone. *Vestnik Mosk. Un-ta. Seriya 4. Geologiya.* № 3. P. 3–14. (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. 25 p. (in Russ.)
- Sidorchuk A.Yu., Panin A.V., Borisova O.K. (2008). Climate-induced changes in surface runoff on the North-Eurasian plains during the Late Glacial and Holocene. *Water Resources.* V. 35. P. 386–396. <https://doi.org/10.1134/S0097807808040027>
- Sidorchuk A.Yu., Ukrainsev V.Yu., Panin A.V. (2021). Estimating Annual Volga Runoff in the Late Glacial Epoch from the Size of River Paleochannels. *Water Resources.* V. 48. № 6. P. 864–876. <https://doi.org/10.1134/S0097807821060178>
- Sidorchuk A., Panin A., Borisova O. (2024). Hydrological Regime of Rivers in the Periglacial Zone of the East European Plain in the Late MIS 2. *Quaternary.* 7. 32. <https://doi.org/10.3390/quat7030032>
- Starkel L. (1988). Paleogeography of the periglacial zone in Poland during the maximum advance of the Vistulian ice sheet. *Geogr. Pol.* V. 55. P. 151–163.
- Streletskaya I.D. (2017). Soil wedge structures in the Southern coast of the Finland gulf. *Earth's Cryosphere.* V. 21. № 1. P. 3–10. (in Russ.) [https://doi.org/10.21782/EC2541-9994-2017-1\(3-10\)](https://doi.org/10.21782/EC2541-9994-2017-1(3-10))

- 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.)
- Sycheva S.A. (2012). Paleocryogenic events in periglacial area of the Central Russian Upland at the end of the Middle and Late Pleistocene. *Earth's Cryosphere*. V. 16. № 4. P. 45–56. (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: conditions and chronology of development stages). PhD. M.: MSU. 169 p. (in Russ.)
- Taratunina N., Rogov V., Streletskaya 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.* V. 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. *Quat. Geochronology*. V. 72. 101369. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2022.101369>
- 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*. V. 54. № 3. P. 49–66. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2949178923030118>
- 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>
- Timofeev D.A., Vtiurina E.A. (1983). Terminologiya periglatsial'noi geomorfologii (Terminology of periglacial geomorphology). Moscow: Nauka (Publ). 233 p.
- 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. № 3. P. 652–666. <https://doi.org/10.1111/bor.12070>
- Vandenberghe J., Pissart A. (1993). Permafrost changes in Europe during the last glacial. *Permafrost and Periglacial Processes*. Iss. 2. № 4. P. 121–135. <https://doi.org/10.1002/ppp.3430040205>
- Vasil'yev Yu.M. (1961). Antropogen Yuzhnogo Zavolzh'ya (Anthropogen of the Southern Trans-Volga region). Moscow: Izd-vo AN SSSR (Publ.). 128 p. (in Russ.)
- Velichko A.A. (1965). Cryogenic relief of the periglacial zone (cryolithozone) of the Russian Plain. In: *Chetvertichnyi period i ego istoriya*. Moscow: Nauka (Publ.). P. 104–120. (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. (2012). Evolyutsionnaya geografiya: problemy i resheniya (Evolutionary geography: problems and solutions). Moscow: GEOS (Publ.). 564 p. (in Russ.)
- Velichko A.A. (Ed.). (1999). Izmenenie klimata i landshaftov za poslednie 65 millionov let (kainozoi: ot paleotsena do golotsena) (Changes in climate and landscapes over the past 65 million years (Cenozoic: from the Paleocene to the Holocene)). Moscow: GEOS (Publ.). 260 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). Moscow: 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-Evropeiskoi ravniny (Reconstruction of Late Pleistocene events in the periglacial zone of the south of the East European Plain). *Doklady Akademii nauk*. V. 475. № 4. P. 448–452. (in Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0869565217220194>
- Yanina T. (2020). Environmental variability of the Ponto-Caspian and Mediterranean basins during the last climatic macrocycle. *Geography, Environment, Sustainability*. V. 13. № 4. P. 6–23. <https://DOI-10.24057/2071-9388-2020-120>
- Yanina T.A. (2012). Neopleistotsen 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 Mosk. Un-ta. Seriya 5. Geografiya*. № 1. P. 21–29. (in Russ.)
- Zaretskaya N., Panin A., Utkina A., Baranov D. (2024). Aeolian sedimentation in the Vychevda River valley, north-eastern Europe, during MIS 2–1. *Quat. Int.* V. 686–687. P. 83–98. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2023.05.022>