

ЭВОЛЮЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

УДК 551.79, 551.34

В.В. Рогов^{1,2}, И.Д. Стрелецкая³, Н.А. Таратунина^{4,5}, А.Н. Курчатова⁶, Р.Н. Курбанов⁷, Т.А. Янина⁸

ПОЗДНЕПЛЕЙСТОЦЕНОВЫЙ КРИОГЕНЕЗ В НИЖНЕМ ПОВОЛЖЬЕ

В статье представлены результаты изучения следов криогенеза в аллювиальных и лёссово-почвенных отложениях Нижнего Поволжья. На примере опорного разреза Средняя Ахтуба впервые для региона установлены четыре этапа развития мерзлотных процессов в позднем плейстоцене. В условиях сезонного и многолетнего промерзания в позднем плейстоцене происходили процессы криогенного преобразования отложений, определявшие состав, структуру и свойства лёссов и палеопочв. Для каждого горизонта проведены криолитологический, гранулометрический и микроморфологический анализы минерального вещества и сделаны описания следов криогенных процессов для оценки палеогеографических условий их образования. Методом оптически-стимулированной люминесценции определен возраст основных этапов развития криогенных процессов в Нижнем Поволжье. Четвертый этап формирования в ходе промерзания происходил в МИС-4 в условиях ательской регрессии Каспия. Третий этап выражен в виде крупных клиновидных структур (псевдоморфоз) на границе лёсса и аллювиальной пачки, формирование которых связано с деградацией ледяных клиньев. В ходе первого и второго этапов промерзания происходили пластические деформации отложений.

Ключевые слова: лёссы, палеомерзлота, криогенное выветривание, коэффициент криогенной контрастности, люминесцентное датирование, клиновидные структуры, псевдоморфозы

Введение. Циклические колебания климата в плейстоцене по оценкам исследователей находят отражение в структуре лёссово-почвенных серий: в теплые межледниковые и межстадиальные эпохи возрастала роль биогенного осадконакопления и формировались почвы; в холодные эпохи, когда происходило значительное расширение площади вечной мерзлоты, накапливались горизонты лёссов и формировались морозобойные трещины [Velichko et al., 2010]. Эти суждения основаны на результатах анализа клиновидных структур, а также многочисленных данных спорово-пыльцевого, микрофаунистического и других видов анализа.

Существуют также представления, основанные, главным образом, на анализе гранулометрического состава лёссов, о весьма холодной обстановке в период их формирования и значительном развитии в это время криогенного выветривания [Попов, 1967; Лёссовые ..., 1986].

Впервые роль морозного выветривания в происхождении лёсса отметил еще в 1882–1889 гг. С. Вуд [Кригер, 1965]. По мнению С. Вуда, лёссовые поро-

ды формировались за пределами развития ледников в районах вечной мерзлоты при сезонном оттаивании, оползании и оплывании верхних слоев почвы. Впоследствии, в том числе и на основании экспериментальных исследований, это послужило основой представлений о криоаллювиальной природе лёссов и их свойств [Сергеев, Минервин, 1960; Попов, 1967; Лёссовые ..., 1986]. Для обоснования четкого критерия оценки влияния перигляциальных условий на формирование лёссов (наличия сезонного и многолетнего промерзания) был предложен конкретный показатель, характеризующий степень участия в формировании отложений процесса криогенного выветривания [Конищев, Рогов, 1994]. Данный показатель был назван коэффициентом криогенной контрастности (ККК): $KKK = Q_1/F_1 : Q_2/F_2$, где Q_1 и F_1 – содержание кварца и полевых шпатов во фракции 0,05–0,01 мм; Q_2 и F_2 – содержание кварца и полевых шпатов во фракции 0,1–0,05 мм. Величина коэффициента растет с активностью криогенного выветривания, при этом отложения, сформировавшиеся в условиях су-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра криолитологии и гляциологии, профессор, докт. геогр. н.; e-mail: rogovvic@mail.ru

² Институт криосферы Земли Тюменского научного центра, лаборатория криотрасологии, ст. науч. с.

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра криолитологии и гляциологии, доцент, канд. геогр. н.; e-mail: irinastrelets@gmail.com

⁴ Институт географии РАН, отдел палеогеографии четвертичного периода, мл. науч. с., без ученой степени; e-mail: taratuninana@gmail.com

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, НИЛ новейших отложений и палеогеографии плейстоцена, инженер, без ученой степени

⁶ Институт криосферы Земли Тюменского научного центра, лаборатория криотрасологии, ст. науч. с.; e-mail: kanni@mail.ru

⁷ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория новейших отложений и палеогеографии плейстоцена, ст. науч. с.; e-mail: roger.kurbanov@gmail.com

⁸ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, профессор, докт. геогр. н.; e-mail: paleo@inbox.ru

ществования вечной мерзлоты, имеют значения ККК более единицы.

Авторами в 2015–2019 гг. проведены полевые исследования в Нижнем Поволжье, которые позволили выявить разновозрастные посткриогенные структуры (псевдоморфозы, инволюции и др.) – следы реликтового сезонного и многолетнего промерзания. Реконструкция истории криогенных явлений на территории Нижнего Поволжья является важной научной задачей в понимании палеогеографических условий этого региона и причин колебаний уровня Каспийского моря, поскольку регрессивные этапы являются наименее изученными [Янина и др., 2017]. Лёссово-почвенные серии Нижнего Поволжья предоставляют уникальную возможность реконструировать этапы развития ландшафтов в период между хазарской и хвалынской трансгрессиями Каспийского моря. Целью данного исследования является реконструкция истории развития мерзлотных процессов в позднем плейстоцене на основании следов криогенеза в отложениях на территории Нижнего Поволжья.

Материалы и методы исследования. В основу работы положены результаты комплексного изучения разреза Средняя Ахтуба ($H_{\text{абс}}=14,89$ м), расположенного на левом борту Волго-Ахтубинской долины (рис. 1) в 3 км к югу от населенного пункта Средняя Ахтуба (координаты N 48°42'01"; E 44°53'37,1").

В разрезе высотой 18,5 м вскрывается строение нижнехвалынской равнины Северного Прикаспия: реперный горизонт шоколадных глин хвалынской трансгрессии, мощная полифациальная толща ательских континентальных осадков и комплекс отложений эпохи хазарского трансгрессивно-регрессивного этапа Каспия с тремя четко выраженными горизонтами палеопочв (рис. 2). Из континентальных осадков разреза отобрано и проанализировано

25 образцов. Комплексное изучение отложений включало гранулометрический, минералогический, микроморфологический анализы, расчет ККК, датирование методом оптически-стимулированной люминесценции (ОСЛ).

Гранулометрический, минералогический и микроморфологический анализы выполнены в лаборатории криотрасологии Института Криосферы Земли ТЮМНЦ СО РАН. Гранулометрический анализ образцов осуществлен на лазерном гранулометре Mastersizer 3000 (Malvern) с диспергацией в водной среде. Для образцов выполнена стандартная пробоподготовка [Константинов, Еременко, 2012], включающая обработку соляной кислотой; для дополнительной дезагрегации частиц применялась встроенная функция ультразвука.

Лазерные гранулометры и, в частности, используемый Mastersizer 3000, дают шкалу измерения частиц по 100 диапазонам их размера, благодаря чему указанная фракция крупной пыли была разделена на подфракции 0,01–0,025 и 0,025–0,05 мм, что дало возможность проследить, какая часть подфракции преобладает в том или ином образце породы.

Определение минералогического состава выполнено на рентгеновском дифрактометре D2Phaser (Bruker); здесь же получены данные для подсчета ККК. Для этого проведен минералогический анализ двух узких фракций – тонкого песка (0,05–0,1 мм) и крупной пыли (0,01–0,05 мм).

Микростроение лёссов и морфология частиц изучены в образцах ненарушенного сложения и нарушенного состояния при помощи растрового электронного микроскопа Hitachi TM 3000 в комплексе с энергодисперсионным спектрометром Swift 3000 по стандартной методике [Рогов, 2000]. Всего получено более 500 изображений.

Абсолютное датирование отложений выполнено ОСЛ-методом в Скандинавской лаборатории



Рис. 1. Местоположение разреза Средняя Ахтуба

Fig. 1. Location of the Srednyaya Akhtuba section

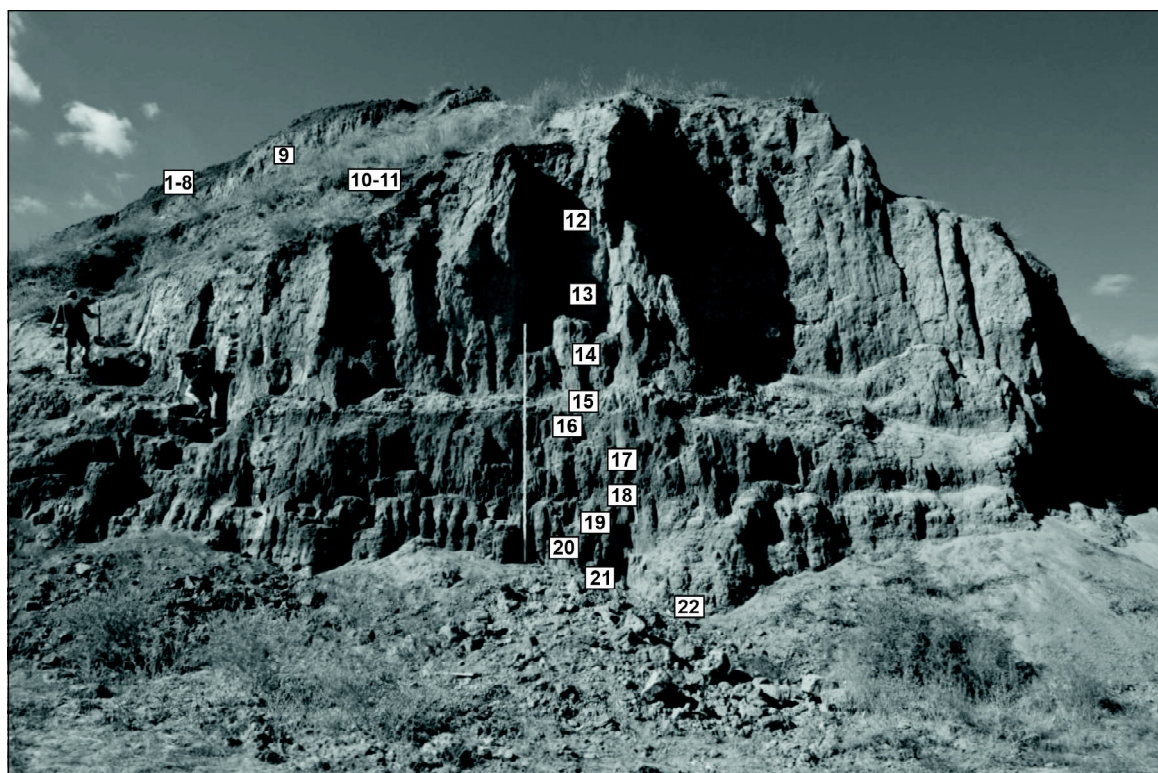


Рис. 2. Общий вид разреза Средняя Ахтуба. Цифры – слои разреза. Описание приведено в тексте

Fig. 2. General view of the Srednyaya Akhtuba section. The numbers mark the layers of the section. Description is given in the text

люминесцентного датирования (Орхусский университет, Дания); детальная характеристика лабораторных измерений и результаты приведены в статье [Янина и др., 2017].

Результаты исследований. Строение разреза. Краткое описание разреза (слои 22–1), его стратификация и результаты абсолютной геохронометрии приведены согласно работе [Янина и др., 2017] (рис. 3). Нижняя часть разреза (слои 22–19) представлена однородными отложениями озерно-лиманного типа, которые подстилаются горизонтом суглинков с прослоями песка. Выше залегает хорошо выраженный горизонт палеопочвы плотной комковатой структуры мощностью 0,4 м (слой 18). Почва перекрывается первым горизонтом лессовидных суглинков (слой 17) мощностью 0,75 м; по ним получена ОСЛ-дата $112,6 \pm 5,4$ тыс. лет (№ 150829). Выше залегающая почва слоя 16 (второй почвенный горизонт) разбита тонкими посткриогенными трещинами, а также включает слабо выраженные криотурбации и датируется $102,5 \pm 5,2$ тыс. лет (№ 150827). Слой 15 – второй горизонт лессовидных суглинков мощностью 0,7 м пестрой серо-коричневой окраски с ржавыми пятнами и затеками, с марганцовистыми и известковыми включениями; датирован в $87,6 \pm 4,1$ тыс. лет (№ 150824). Выше в разрезе (слой 14) залегает хорошо выраженная погребенная почва с псевдоморфозами по вытаявшим ледяным жилам; псевдоморфозы заполнены вышележащим палево-желтым лёссом. Ширина псевдоморфоз клинообразной формы в верхней части 7–18 см, в ниж-

ней – 2–3 мм, в плане они образуют сетку со стороной 45–50 см. На границе почвы и вышележащего лёсса получена дата $68,3 \pm 4,2$ тыс. лет (№ 150822), что позволяет определить время формирования жил началом морской изотопной стадии (МИС) 4.

Выше (слои 13–8) с резкой границей в разрезе залегают разнофациальные (водного и субаэрального генезиса) супесчано-песчаные отложения, представляющие ательскую свиту в стратиграфической схеме Прикаспия [Янина и др., 2017]. В них заключены два слоя (13 и 12) лессовидных суглинков общей мощностью 4,5 м, со столбчатой отдельностью, образующие в разрезе вертикальные стенки. Нижний (слой 13) – мощный (3,5 м) слой лессов равномерной светло-коричневой окраски с редкими марганцовистыми примазками и включениями гипса. Верхний (слой 12) изобилует марганцовистыми примазками и гипсовыми включениями с редкими темными пятнами органики. Возраст горизонта (в верхней части) датирован в $48,7 \pm 3,1$ тыс. лет (№ 150814). Выше залегают слои 11 и 10, представленные песком мелко- и среднезернистым, косослоистым, с прослоями лёсса, признаками почвообразования, известковыми включениями и марганцовистыми примазками. Для верхней части горизонта получена дата в $36,8 \pm 3,0$ тыс. лет (№ 150812). Перекрывают эти отложения слоем песка (слой 9), для нижней части которого получена дата $35,5 \pm 2,8$ тыс. лет (№ 150810). Верхняя часть ательской свиты (слой 8) представлена слоем (0,5 м) плотных неслоистых лессовидных суглин-

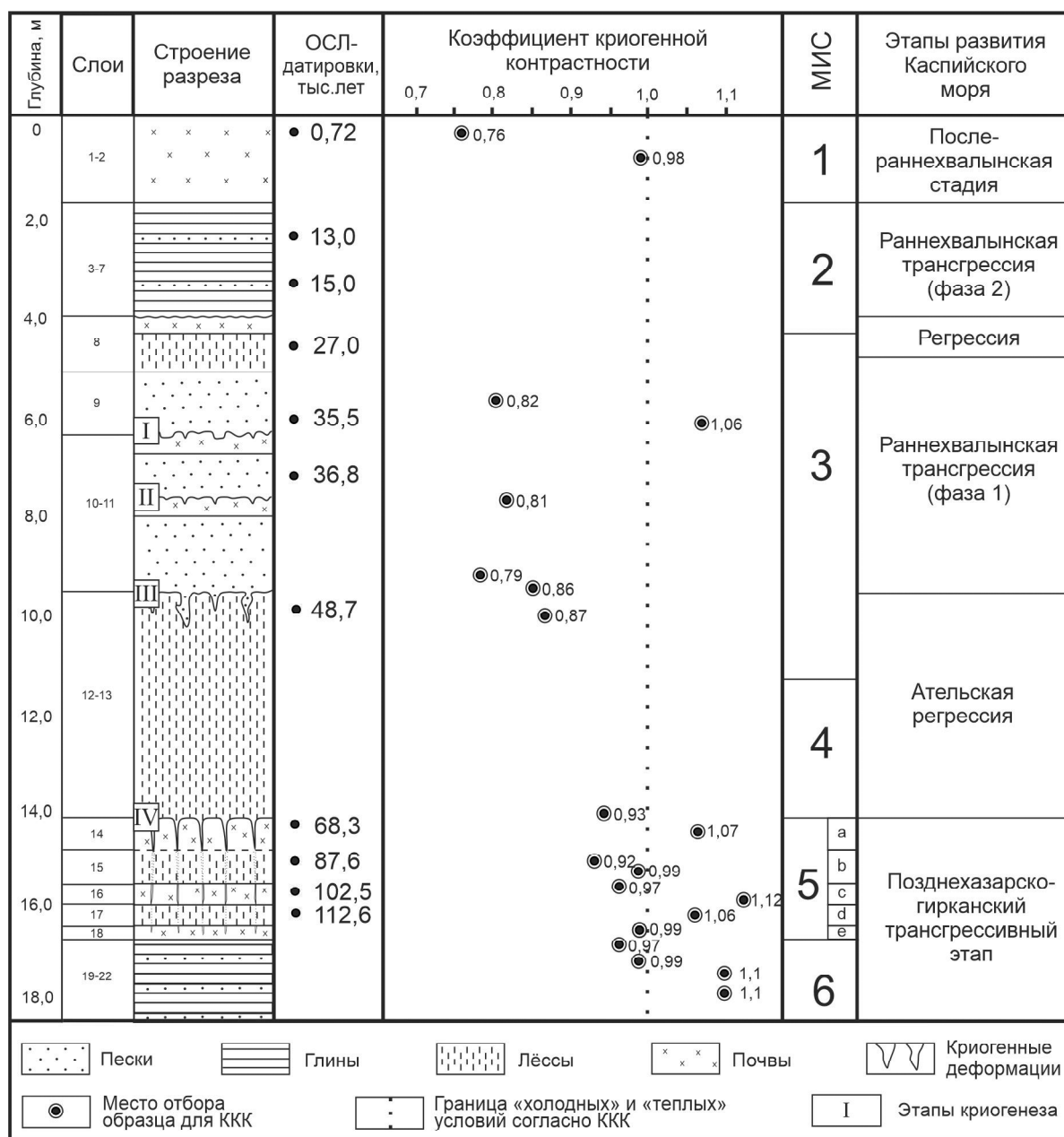


Рис. 3. Схема разреза Средняя Ахтуба со значениями ККК, данными ОСЛ-датирования

Fig. 3. The scheme of the Srednyaya Akhtuba section (with CCC values, OSL data)

ков равномерной светло-бежевой окраски, образующих в разрезе вертикальные стенки, и маломощной палеопочвой. Верхняя часть горизонта лёсса датируется в $27,0 \pm 1,6$ тыс. лет (№ 150809). С резким несогласием и характерными элементами размыва над палеопочвой выделяется горизонт морских шоколадных глин.

Выше располагается мощная толща (слои 7–3) каспийских нижнехвалынских осадков, включающая: прослой суглинков и глин с крупной оскольчатой призматической отдельностью и прослой песка (слои 5 и 6); два слоя шоколадной глины (слой 4) с тонкими прослойками (от 0,5 до 3 см) тонкозернистого песка (здесь получена дата $13,0 \pm 0,5$ тыс. лет, № 150806); слой супеси темно-бежевого цвета с редкими прослойками тонкозернистого песка

(слой 3). В своей верхней части разрез представлен современной почвой, развитой по субэвральным голоценовым супесчаным отложениям (слои 1–2), по которой получена датировка в 720 ± 70 лет (№ 150801).

Уникальной особенностью разреза Средняя Ахтуба является наличие реликтовых мерзлотных образований – криотурбаций, полигональных клиновидных структур (как псевдоморфоз по полигонально-жильным льдам, так и изначально грунтовыми жил), мелкополигональных трещинных образований. В разрезе установлены следы четырех этапов криогенеза.

Первый и второй этапы приурочены к горизонтам слабо развитых палеопочв внутри аллювиальной пачки (МИС-3). В разрезе они представляют

собой нарушения пластичного характера (криотурбации и инволюции). В этих двух горизонтах интенсивность проявления криогенных процессов различна, однако носит схожий характер. Это преимущественно нарушения в виде мелких грунтовых клиньев глубокого сезонного протаивания и последующего промерзания. Верхние, вертикальной протяженностью до 30 см, заполнены вышележащим слоистым аллювиальным материалом с высолами по границам, слоистая структура которых частично сохраняется внутри деформаций; форма конусовидная, корытообразная; границы неровные, волнообразные. Нижние деформации представлены инволюциями, турбирующими подстилающую почву; заполнены они вышележащим аллювиальным материалом. Вертикальная протяженность 30 см, горизонтальная – до 20 см. Формы последних схожи с теми, что наблюдаются в структуре «пятен-медальонов» в современной криолитозоне. Нехватка данных абсолютного датирования не позволяет точно определить время образования инволюций нижнего уровня в интервале 40–28 тыс. л. н., верхний горизонт был затронут криогенными явлениями около 30 тыс. л. н.

Третий этап формирования криогенных явлений приурочен к верхней части лессового горизонта (слой 12, МИС-3). В нем обнаружены довольно крупные псевдоморфозы шириной до 40 см, вертикальной протяженностью 1,0–1,2 м, с неровными краями, «плечиками», «перематым» материалом. Жилы заполнены вышележащим аллювиальным песком, отвечающим второй половине МИС-3 (слой 11). Полученные датировки указывают на то, что формирование этих криогенных форм происходило в подстадию МИС-3b (около 45–42 тыс. л. н.).

Следы четвертого этапа выражены в почвенном горизонте слоя 14, отвечающем МИС-5a. Он представляет собой клиновидные структуры, наиболее ярко выраженные в этой почве, пронизывающие и два нижележащих уровня погребенных почв (слои 16–18). Их ширина в верхней части – 12–20 см, высота – от 0,8 до 2,5 м; расстояние между грунтовыми клиньями 40–60 см. Заполнены клиновидные структуры более светлым вышележащим материалом лёсса. Клинья имеют относительно широкий раструб по верху, быстро сужаются и продолжают в виде ветвящихся хвостов, иногда распадающихся на два–три отдельных. Очевидно, выражены только нижние части клиньев; основное растрескивание и рост жил происходили при формировании вышележащих лёссов, при однородности материала и его цвете следы криогенной трансформации отложений выявить трудно.

Гранулометрический состав. Изучение гранулометрии лёссов ведется уже длительное время, и имеется ряд обобщающих работ, констатирующих основные характеристики крупности частиц и распределения их по размеру. В них отмечается, что характерным отличием гранулометрического состава лёссов является высокая доля частиц пылеватой размерности [Лёссовые ..., 1986]. Отложения в

разрезах Средняя Ахтуба представлены чередованием горизонтов глин, лёссов, лессовидных опесчаненных пород, прослоев среднезернистых хорошо сортированных песков и почв (рис. 4).

Результаты гранулометрического анализа в целом показывают типичное для лёссов распределение фракций. Однако для более подробной характеристики размера частиц анализ тонкопесчаной (0,1–0,05 мм) и крупнопылеватой (0,05–0,01 мм) части лёссов сделан более подробно: обычный диапазон этих фракций был поделен надвое – на более тонкую и более грубую. В горизонтах лёссов наблюдалось преобладание фракции крупной пыли (до 60%), незначительное присутствие частиц размером более 0,25 мм и небольшое содержание глинистой фракции (<0,001 мм) – не более 1,5–2,5%. При этом в лёссовых пачках максимум содержания частиц принадлежит большеразмерной части (0,025–0,05 мм) фракции крупной пыли. Некоторыми авторами такая особенность трактуется как показатель формирования лёссовой толщи в холодных и сухих условиях [Deng et al., 2010]. Гранулометрический состав почвенных горизонтов, разделяющих лёссовые толщи, с одной стороны, более песчанистый, но и глинистой составляющей в них больше, чем в лёссах.

Минералогический состав отложений. Чтобы более точно оценить влияние криогенеза на изучаемые породы, их минералогия была детально проанализирована для основных гранулометрических фракций лёссов – тонкого песка и крупной пыли, и был рассчитан коэффициент криогенной контрастности (ККК). Минералогический состав песчаной и пылеватой фракций для горизонтов расчетов ККК весьма разнообразен – основную часть составляют кварц (50–70%), альбит (10–16%), микроклин (10–17%), ортоклаз (6–8%), мусковит (4–12%), авгит (2–5%), каолинит (2–4%) и др.

Значения ККК по разрезу Средняя Ахтуба (см. рис. 3) колеблются в достаточно широком диапазоне, они фиксируют как затронутые криогенезом горизонты, так и не несущие его видимых следов. Величина ККК в отложениях голоценового этапа (МИС-1, слои 2 и 1) уменьшается от 0,98 до 0,76, соответствуя переходу от холодных фаз валдайского оледенения к более теплomu периоду голоцена. Этап накопления аллювиальной толщи, отвечающий второй половине стадии МИС-3 и ранней фазе раннехвалынской трансгрессии Каспия (слои 11–8), характеризуется в его начале и завершении невысокими значениями ККК (0,82), достигая на границе 9 и 10 слоев максимума ККК (1,06) в песках, накопившихся в середине этапа. Такое значение позволяет говорить о коротком, но весьма холодном времени с наличием вечной мерзлоты, о полигональном растрескивании грунтов, поскольку в указанном слое были встречены псевдоморфозы по мерзлотным клиньям.

Этап ательской регрессии характеризуется невысокими значениями ККК: слой 12 имеет значения 0,86–0,87, слой 13 отражает более холодные условия накопления. Эти значения не предполагают

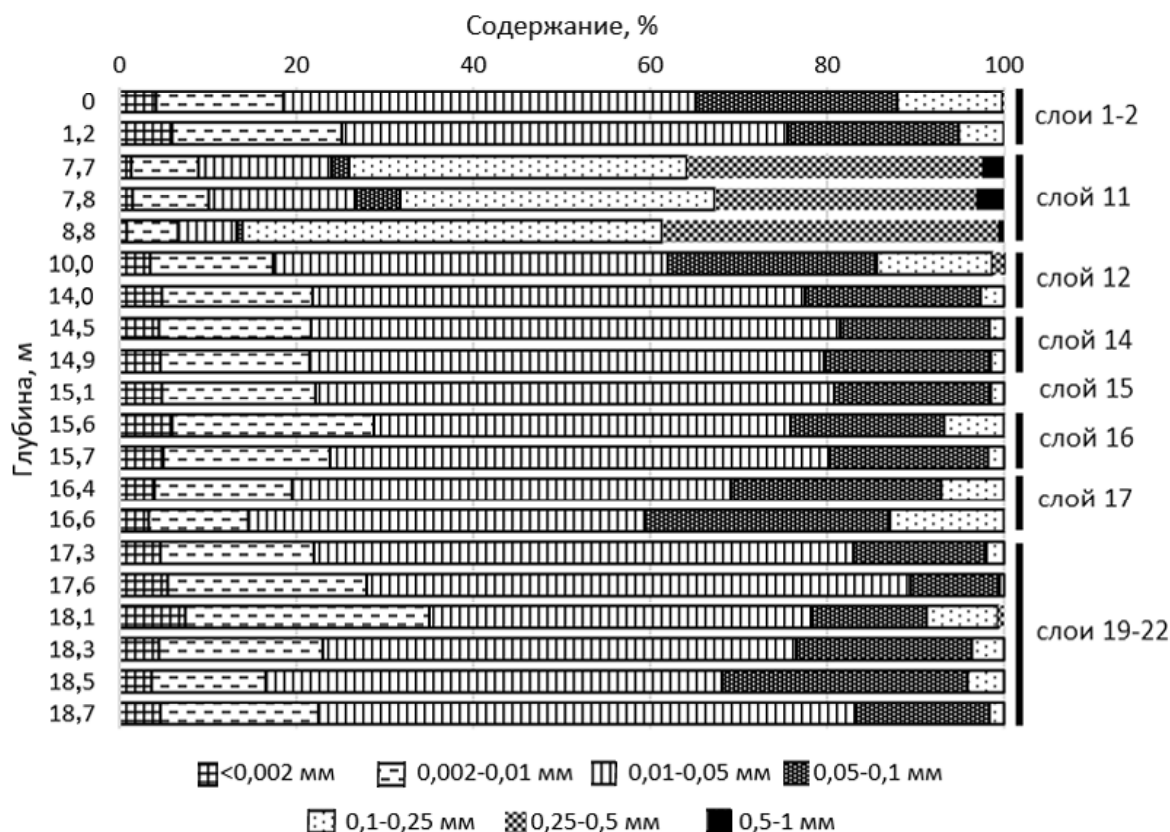


Рис. 4. Гранулометрический состав отложений Средней Ахтубы

Fig. 4. Particle size distribution for the Srednyaya Akhtuba sediments

наличие вечной мерзлоты, они свидетельствуют о глубоком сезонном промерзании отложений.

В серии осадков, отвечающей позднехазарскому трансгрессивно-регрессивному этапу в Каспии (МИС-5), в составе и строении отложений четко прослеживается влияние криогенеза на фоне существования вечной мерзлоты с процессами полигонального морозного растрескивания. Наиболее преобразованными пачками оказались слои 4 (МИС-5а, ККК=1,07) и 16 и 17 (МИС-5с, -5д) со значениями ККК 1,06 и 1,12. Эти горизонты оказались подвержены криогенному изменению в достаточно холодных условиях МИС-4 во время существования на изучаемой территории вечной мерзлоты.

ККК отражает, прежде всего, не низкие отрицательные температуры, а развитие криогенного разрушения при образовании льда в микротрещинах частиц скелета в условиях достаточной влажности грунта. В сухие этапы лёссонакопления (ательский лёсс) более низкие значения ККК можно объяснить существованием морозных (сухих) пород в условиях недостаточного увлажнения.

Наиболее холодная палеомерзлота реконструируется в то время, когда почва МИС-5а закончила свое формирование. При достаточном увлажнении в МИС-4 произошло значительное растрескивание горизонтов с образованием ледяных жил, замещенных в дальнейшем (МИС-3) псевдоморфозами. Далее следует МИС-3 с короткими фазами потепле-

ния и, вероятно, увлажнения в периоды формирования горизонтов палеопочв вследствие поднятия уровня Каспия [Янина и др., 2017]. Увеличившееся влагосодержание в толще отложений позволило в условиях высокотемпературной мерзлоты (либо непродолжительного низкотемпературного похолодания) сформироваться полупокровной слабообразованной островной мерзлоте.

Микростроение лессово-почвенной толщи. Изучение микростроения лёссов также имеет давнюю историю, и в ряде работ дано освещение развития этого направления в изучении лёссов [Ларионов, Штерн, 1971; Коломенский, 1988; Григорьева, 2001]. Однако следует отметить, что большинство исследований микростроения направлено на изучение его инженерно-геологических свойств и, прежде всего, просадочности, при этом исследований микростроения, направленных на оценку условий седиментации и генезиса отложений, крайне мало.

В разрезе Средняя Ахтуба микростроение лёссов ненарушенного состояния изучалось по сколам небольших образцов ($1,0 \times 2,0 \times 0,5 \text{ см}^3$). Микростроение лёссов и почв практически по всей толще, согласно классификации И.Ю. Григорьевой [2001], следует отнести к агрегативному типу (рис. 5). Такое микростроение обусловлено не только наличием глинистой фракции, которая, конечно, способствует агрегации частиц, но и, прежде всего, значительным участием таких мощных структурообразователей,

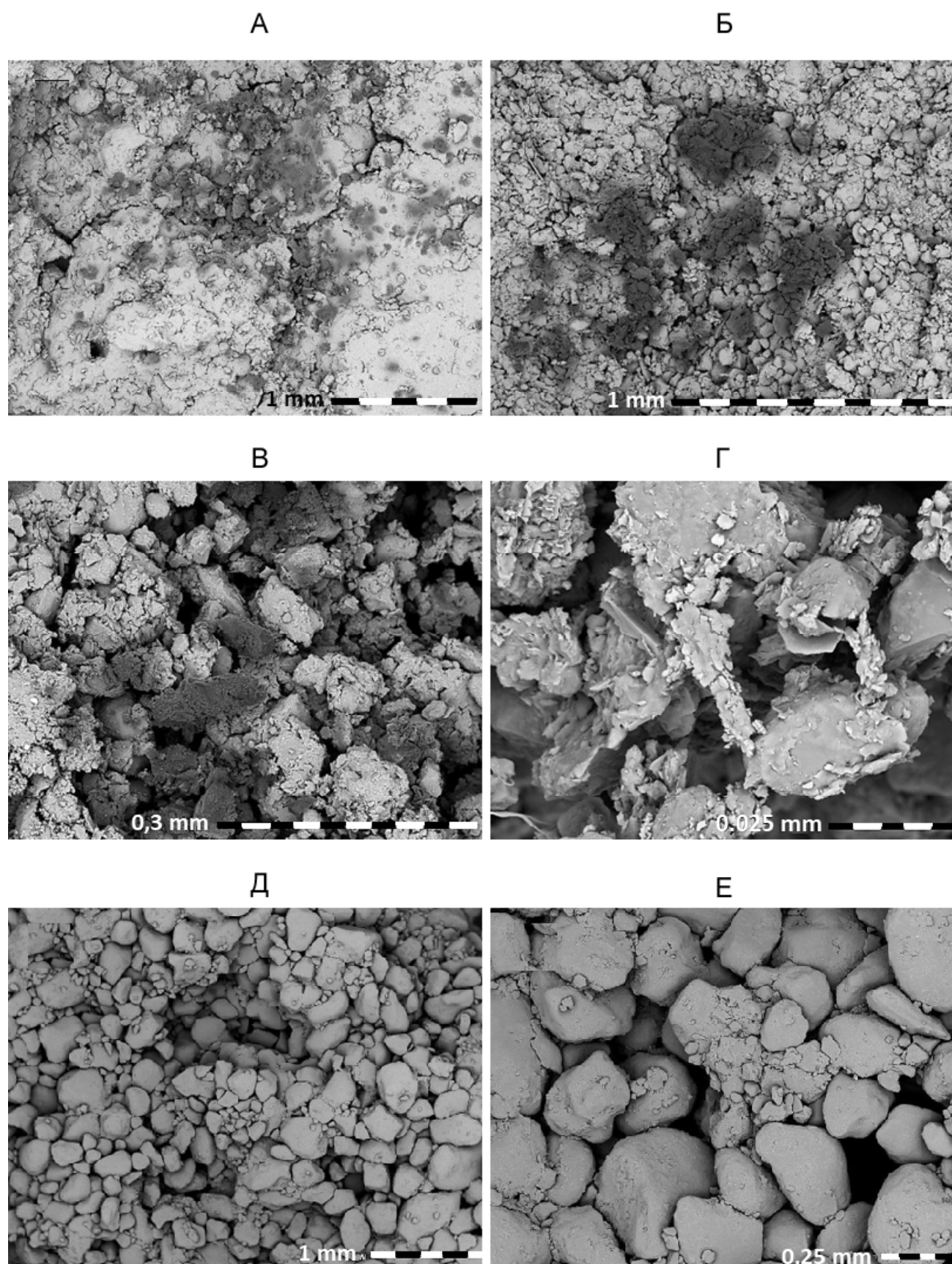


Рис. 5. Микростроение лёссов и почв в разрезе Средняя Ахтуба: А–Г – микростроение лёссов при разных увеличениях; Д, Е – микростроение песчаного горизонта (глубина 7,7 м)

Fig. 5. Microstructure of loess and soils in the Srednyaya Akhtuba section: А–Г – microstructure of loess under different magnifications; Д–Е – microstructure of sand horizon (at the depth of 7,7 m)

как гипс и карбонат кальция. Основу составляют крупные агрегаты (1–3 мм) разной степени слитности. Эти агрегаты разделяются трещинами извилистой конфигурации и изометричными порами неправильной формы размером 0,1–0,3 мм и составлены частицами разной крупности и состава – от остроугольных частиц кварца тонкопесчаной размерности до слитной массы включений («примазок») сложного состава, содержащих железо, кальций и кремний. Кроме этого, внутри агрегатов встречаются сгустки окристаллизованного кальция.

Интересную особенность микростроения лёссов, отмечаемую многими исследователями, составляют трубчатые поры почти идеально круглой формы в сечении (рис. 6А, Б, глубина 10,5 м). Диаметр таких пор в образцах лёссов составляет 0,4–0,6 мм, на стенках наблюдается уплотнение грунтовой массы, в котором участвуют пылеватые частицы силикатов, распределение которых часто образует заметное «кольцо». Вокруг каналов заметны радиальные трещины. В ряде случаев, как на рис. 6А, распределение частиц ближе к шестиугольнику, а не к окружности. Обращая внимание на такие особенности морфологии пор, можно предположить, что их формирование могло быть связано с образованием включений льда в период промерзания толщи.

Морфология частиц песчаной фракции. Во многих работах, посвященных генезису рыхлых отложений, появляется все больше информации о размере, форме и характере поверхности частиц кварца песчаной составляющей. Считается, [Woronko, Pisarska-Jamrozy, 2015], что эти показатели позволяют судить о генезисе отложений. Морфология песчаных кварцевых частиц (см. рис. 5Д, Е, глубина 7,7 м; см. рис. 6В, Г, глубина 17,3 м) в исследуемом разрезе весьма разнообразна и отражает условия формирования отложений в разных слоях лёссов. Хорошо окатанные, с гладкой и слабоэродированной поверхностью, частицы характерны для песчаного заполнения клиньев в почвах, что говорит о преобладании эолового переноса в период их формирования, но, в целом, в образцах лёсса по всему разрезу более половины частиц представлены угловатыми зернами с многочисленными сколами и острыми краями, что указывает на криогенный механизм их разрушения (см. рис. 6В–Г).

Морфология агрегатов пылеватой фракции (0,05–0,005 мм). Как известно, лёссы обладают структурной связностью и состоят из структурных отдельностей различного размера, составляющих сложную иерархическую систему – от столбчатых отдельностей, хорошо отражающихся в стенках разрезов, до агрегатов микроскопических размеров. Особое внимание было уделено агрегатам пылеватой фракции, составляющим главную особенность состава лёссов и привлекающим наибольшее внимание исследователей лёссов, – микроагрегатам, поскольку ряд исследователей предполагает их криогенный генезис [Сергеев, Минервин, 1960; Попов, 1967; Конищев, 1981].

В лёссах рассматриваемого разреза встречаются агрегаты различного типа – как по размеру, так и по структуре. Крупные агрегаты рыхлого строения размером 0,5–0,1 мм обычно составлены десятком или более частиц пылеватой фракции, контактирующих между собой через глинистые «мостики», формируя внутриагрегатные поры 0,005–0,01 мм. Форма их изометричная или слегка вытянутая. В агрегатах меньшего размера преобладают тонкопылеватые и глинистые частицы; внутриагрегатные поры в них меньше и имеют уплощенную форму. Большая часть агрегатов образована объединением пылеватых и глинистых частиц цементом железо-карбонатного состава (см. рис. 6В–Г). Встречаются агрегаты, образованные исключительно кристаллами карбоната кальция (см. рис. 6Д–Е, глубина 17,6 м). Агрегаты достаточно прочны, не разрушаются при промывке водой и воздействию ультразвука.

Аутигенные минералы в образцах лёссов представлены многочисленными друзами кристаллов карбоната кальция (рис. 7А, глубина 8,5 м), включениями гипса (см. рис. 7В, глубина 5,4 м). Железо представлено аморфными пленками на поверхности частиц, конкрециями сидерита и редкими новообразованиями магнетита и титано-магнетита (см. рис. 7Г). На глубине 14 м встречены кристаллы витерита (см. рис. 7Б). Состав аутигенных минералов свидетельствует о криоаридных условиях формирования горизонтов лёссов в разрезе Средняя Ахтуба.

По современным представлениям лёссово-почвенные серии формируются в условиях динамики климата, причем горизонты лёссов образуются в этапы похолодания [Величко и др., 2015]. При этом эоловый фактор стал общепризнанным главным источником материала. Наиболее изученные регионы лёссонакопления – долины рек Дуная, Рейна, Хуанхэ – свидетельствуют о том, что формирование мощных толщ лёссово-почвенных серий связано с поступлением материала из крупных аллювиальных систем [Stevens et al., 2016]. Отмечается, что доминирующим является именно локальный перенос материала (в пределах десятков километров), иными словами, ветер переносит затронутые мерзлотными процессами отложения, формируя мощные толщ лёссов. При этом криогенное преобразование материала продолжается, окончательно формируя типичные особенности лёссов (пылеватый состав, строение и микроморфология минерального скелета). Такое предположение согласуется с полученными данными по Нижней Волге, где в холодный и относительно сухой этап ательской регрессии Каспия формировались мощные горизонты лёссов (в разрезе Средняя Ахтуба мощность составляет более 7 м).

Изучение микроморфологии лёссовых толщ показывает значительную роль их криогенного преобразования, особенно это заметно по морфологии частиц песчаной фракции, представленной угловатыми формами с многочисленными сколами и острыми краями, раковистыми изломами.

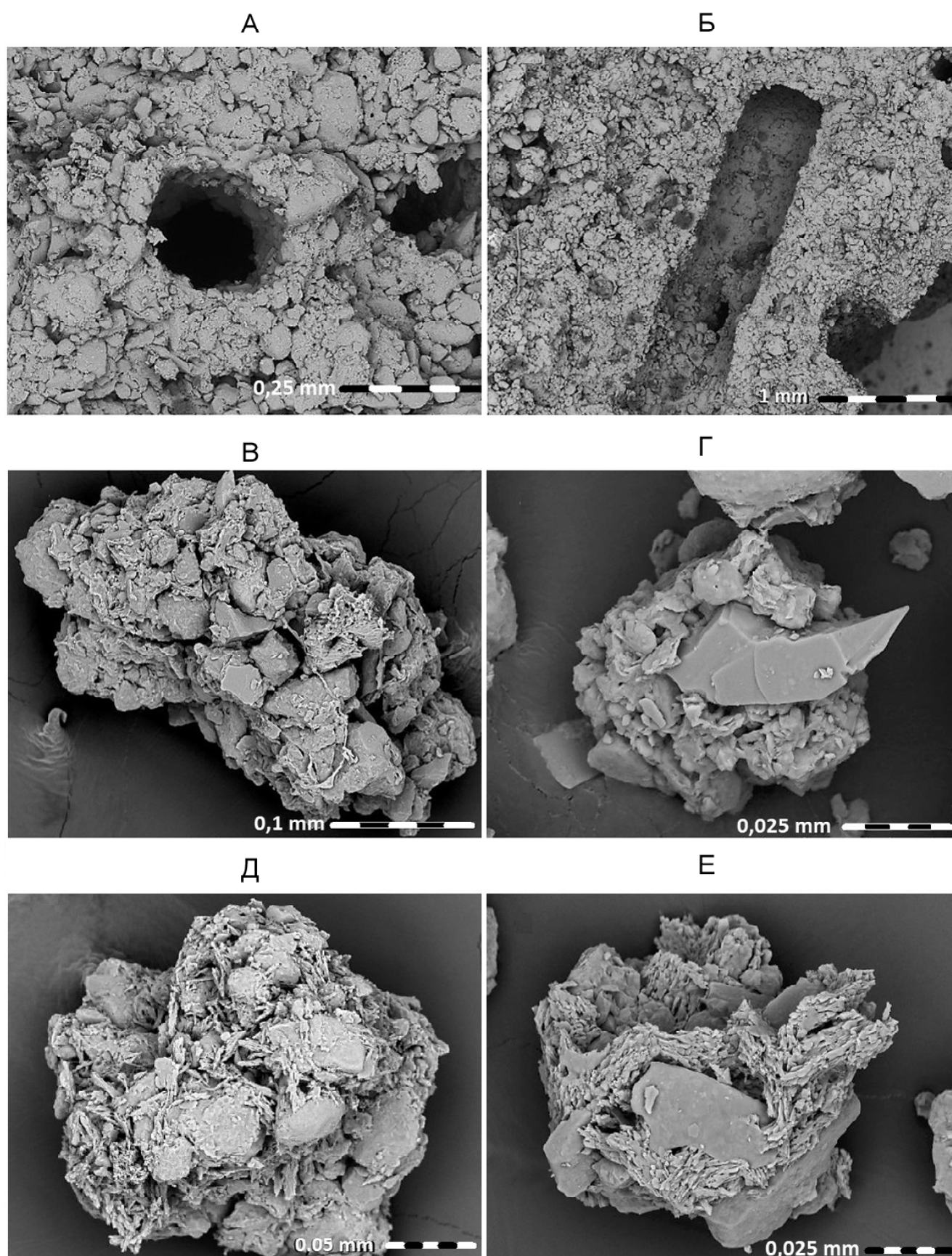


Рис. 6. Микростроение лёссов в разрезе Средняя Ахтуба: А, Б – трубчатые поры в микростроении лёссов; В, Г – агрегаты с железо-карбонатным цементом; Д, Е – сложные агрегаты с кальцитовым цементом

Fig. 6. Microstructure of loess in the Srednyaya Akhtuba section: А–Б – tubular pores in loess microstructure; В–Г – aggregates with iron-carbonate cement; Д–Е – complex aggregates with calcite cement

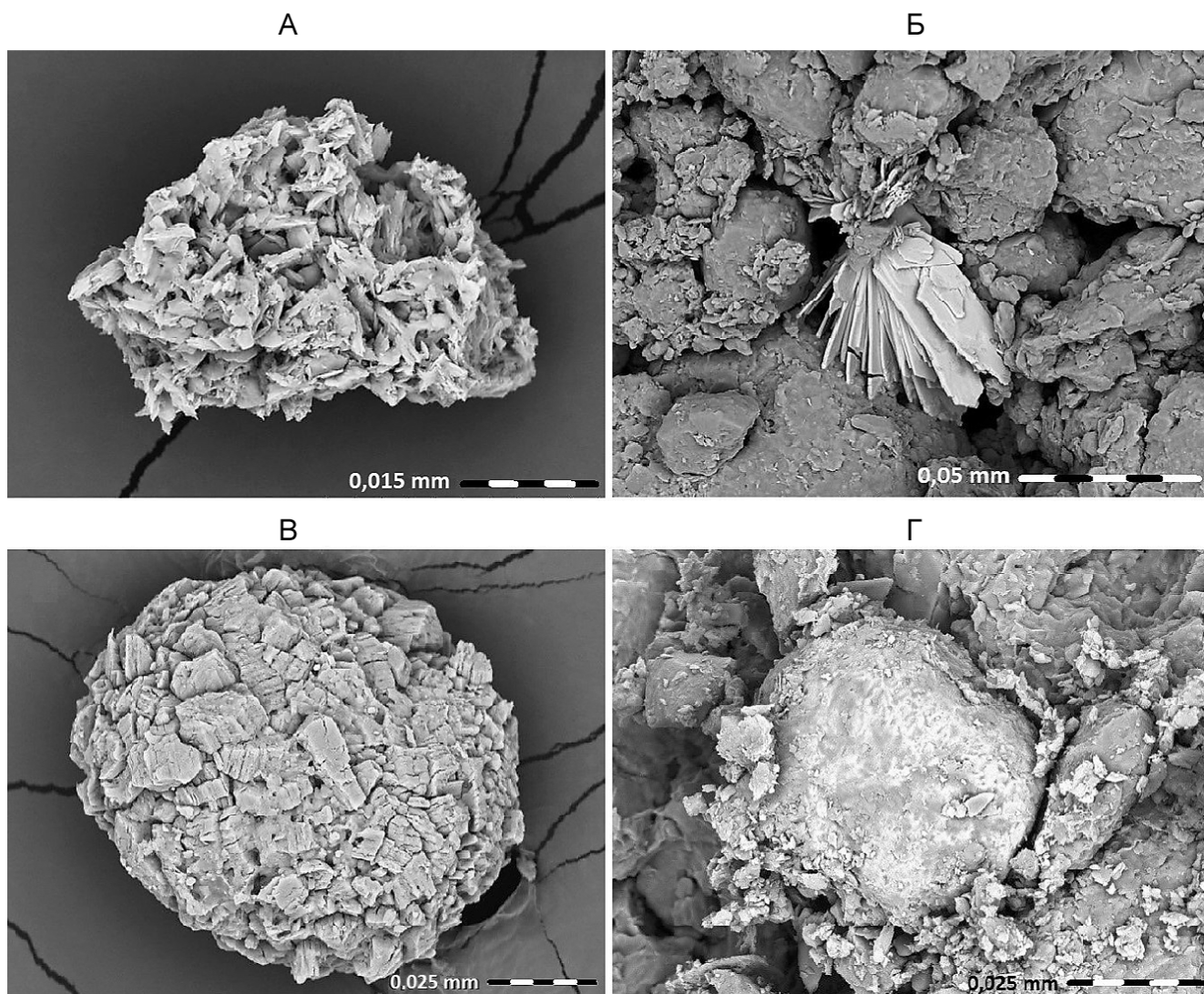


Рис. 7. Аутигенные минералы: А – агрегат кальцита (CaCO_3); Б – новообразования витерита (BaCO_3); В – агрегат гипса (CaSO_4); Г – титано-железистые конкреции

Fig. 7. Authigenic minerals: А – calcite aggregate (CaCO_3); Б – neo-aggregates of witherite (BaCO_3); В – gypsum aggregate (CaSO_4); Г – titanium-iron concretions

Обсуждение результатов. Полученные результаты позволили реконструировать этапы развития криогенеза в позднем плейстоцене на территории Нижнего Поволжья:

1. Четвертый этап формирования криогенных явлений происходил в завершающий этап ранневалдайской ледниковой эпохи (МИС-4) в условиях ательской регрессии Каспия. Произошло значительное растрескивание горизонтов с образованием ледяных жил. Тонкие жилы большой мощности (до 2,5 м) секут два горизонта палеопочв, отвечающих эпохам потепления (МИС-5а,с), и внедряются в микулинскую межледниковую почву (МИС-5е). Жилы расположены на расстоянии 40–45 см друг от друга, образуя регулярную сетку.

2. Третий этап выражен в виде псевдоморфоз, глубоко вдающихся в горизонт ательских лёссов. Формирование криогенных форм происходило в подстадию МИС-3b (около 45–42 тыс. л. н.) в услови-

ях, когда в результате начавшегося подъема уровня Каспийского моря в долине Волги образовался эстуарий и в районе разреза формировались аллювиальные отложения. Само формирование клиньев, по-видимому, связано с затоплением прилегающей равнины водами Волги, увлажнением лёссов и их растрескиванием в результате развития криогенных явлений.

3. Криогенез первого и второго этапов затронул осадконакопление в условиях усиливающегося похолодания и аридизации климата: второй этап отмечается около 40–28 тыс. л. н., первый – около 30 тыс. л. н. Такие образования характерны для современной тундры в структуре пятен-медальонов, которые, вероятно, активно развивались в указанные этапы формирования аллювиальной пачки.

В позднем плейстоцене развитие криогенеза в Нижнем Поволжье происходило в холодные периоды МИС-3 и 4, при этом основным фактором, опре-

делявшим характер многолетней мерзлоты, являлось увлажнение территории. Следы возможного криогенеза, отвечающего наиболее холодной, поздневалдайской фазе оледенения (МИС 2), в разрезе отсутствуют. По-видимому, они были уничтожены абразией хвалынского бассейна, как и верхняя часть палеопочвы (слой 8).

Выводы:

– в Нижнем Поволжье в лессовидных и аллювиальных отложениях встречаются многочисленные следы древнего криогенеза, выраженные в виде грунтовых клиньев, псевдоморфоз и инволюций.

– в позднем плейстоцене установлены четыре этапа криогенеза. Наиболее ярко выражен криогенез времени максимума калининского оледенения МИС-4 (~70–65 тыс. л. н.), развивавшийся в криоаридных условиях. В нестабильных климатических

условиях межстадиального потепления (МИС-3) в регионе отмечались три коротких криособытия (45–42, 40–35 и ~30 тыс. л. н.).

– в северной части Нижнего Поволжья тип и масштабы криогенеза контролировались преимущественно условиями увлажнения, в то время как температурный режим имел подчиненное значение.

– методика криолитологического анализа минерального вещества перспективна для оценки палеогеографических условий времени его накопления. На примере разреза Средняя Ахтуба показано, что как в пределах многолетней перигляциальной криолитозоны, так и в условиях сезонного промерзания, в плейстоцене происходили процессы криогенного преобразования отложений, которые участвовали в формировании состава и строения лёссов.

Благодарности. Полевые исследования и абсолютное датирование выполнено при поддержке гранта РНФ (проект № 16-17-10103), литологические исследования – при поддержке гранта РФФИ (проект № 18-05-00376), криолитологические – при поддержке гранта РФФИ (проект № 18-35-00619). Авторы выражают благодарность рецензентам этой статьи за ряд ценных замечаний и рекомендаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Величко А.А., Борисова О.К., Захаров А.Л., Карпухина Н.В., Кононов Ю.М., Константинов Е.А., Курбанов Р.Н., Морозова Т.Д., Панин П.Г., Семенов В.В., Тесаков А.С., Тимирева С.Н., Титов В.В. Лёссово-почвенная формация юга Восточно-Европейской равнины и ее соотношение с морскими азово-черноморскими отложениями // *Фундаментальные проблемы квартера, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований: материалы IX Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода* (Иркутск, 15–20 сентября 2015 г.) Иркутск: ин-тут географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2015, с. 86–87.
- Григорьева И.Ю. Микростроение лессовых пород. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. 148 с.
- Коломенский Е.Н. О формировании структурно-текстурных особенностей лессовых пород // *Инж. геология*. 1988. № 4. С. 3–17.
- Конищев В.Н. Формирование состава дисперсных пород в криолитосфере. Новосибирск: Наука, 1981. 197 с.
- Конищев В.Н., Рогов В.В. Методы криолитологических исследований. М.: Изд-во МГУ, 1994. 135 с.
- Константинов Е.А., Еременко Е.А. Значение метода лазерной дифракционной гранулометрии при изучении лёссов (на примере разреза Мелекино, Северное Приазовье) // *Отечественная геология*. 2012. № 3. С. 47–54.
- Кригер Н.И. Лесс, его свойства и связь с географической средой. М.: Наука, 1965. 254 с.
- Ларионов А.К., Штерн Л.Я. Результаты изучения тонкой структуры лессовых пород ненарушенного сложения на СЭС // *Вестник ЛГУ. Геология, география*. Вып. 1. 1971. № 5. С. 31–40.
- Лёссовые породы СССР. Том I. Инженерно-геологические особенности и проблемы рационального использования / Под ред. Е.М. Сергеева, А.К. Ларионова, Н.Н. Комиссаровой. М.: Недра, 1986. 232 с.
- Попов А.И. Лёссовые и лессовидные породы как продукт криолитогеогенеза // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр.* 1967. № 6. С. 43–48.
- Рогов В.В. Особенности морфологии частиц скелета криогенного элювия // *Криосфера Земли*. 2000. Т. 4. № 3. С. 67–74.
- Сергеев Е.М., Минервин А.В. Сущность процесса облессования в подзолистой зоне // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. геологическая*. 1960. № 3. С. 3–14.
- Янина Т.А., Свиточ А.А., Курбанов Р.Н., Мюррей А.С., Ткач Н.Т., Сычев Н.В. Опыт датирования плейстоценовых отложений Нижнего Поволжья методом оптически стимулированной люминесценции // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр.* 2017. № 1. С. 21–29.
- Deng J., Wang L., Zhang Z.Z., Bing H. Microstructure characteristics and forming environment of late Quaternary Period loess in the Loess Plateau of China. *Environ. Earth Sci.*, 2010, no. 59, p. 1807–1817.
- Stevens T., Buylaert J., Lu H., Thiel C., Murray A., Frechen M., Yi Sh., Zeng L. Mass accumulation rate and monsoon records from Xifeng, Chinese Loess Plateau, based on a luminescence age model. *Journal of Quaternary Science*, 2016, vol. 31, p. 391–405.
- Velichko A., Catto N., Tesakov A., Titov V., Morozova T., Semenov V., Timireva S. The structure of Pleistocene loess-paleosol formation in southern Russian plain based on data from eastern Azov sea region. *Abstract volume INQUA-SEQS 2010* (Rostov-on-Don, Russia, June 21–26, 2010). Rostov-on-Don, Russia, 2010, p. 184–187.
- Woronko B., Pisarska-Jamroz M. Micro-scale frost weathering of sand-sized quartz grains. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2015, no. 27, p. 109–122.

Поступила в редакцию 18.02.2020

После доработки 16.06.2020

Принята к публикации 06.08.2020

V.V. Rogov^{1,2}, I.D. Streletskaia³, N.A. Taratunina^{4,5},
A.N. Kurchatova⁶, R.N. Kurbanov⁷, T.A. Yanina⁸

LATE PLEISTOCENE CRYOGENESIS IN THE LOWER VOLGA RIVER REGION

The article presents the results of studying the evidences of cryogenesis in alluvial and loess-soil deposits of the Lower Volga River region. Four stages of the development of permafrost processes during the Late Pleistocene were newly recognized for the region through the example of the Srednyaya Akhtuba reference section. The processes of cryogenic transformation of sediments under seasonal freezing and the existence of perennial permafrost during the Late Pleistocene predetermined the composition, structure and properties of loess and paleosoils. Cryolithological, particle size and micromorphological analyzes of mineral matter were carried out for each horizon and the evidences of cryogenic processes were described to evaluate the paleogeographic conditions of their formation. The age of the main stages of cryogenic processes in the Lower Volga River region was determined by the optically stimulated luminescence method. The fourth stage of cryogenic processes took place during MIS-4 under the Atelian regression of the Caspian Sea. The third stage is expressed as large wedge-shaped structures (pseudomorphoses) on the border of loess and alluvial horizon; their formation relates to the degradation of ice wedges. During the first and second stages of freezing plastic deformations of sediments occurred.

Key words: loess, paleopermafrost, cryogenic weathering, coefficient of cryogenic contrast, luminescent dating, wedge-like structures, pseudomorphs

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 16-17-10103 – field works and absolute dating) and the Russian Foundation for Basic Research (projects no. 18-05-00376 – lithological studies, and 18-35-00619 – cryolithological studies). The authors are grateful to the reviewers of the paper for valuable comments and recommendations.

REFERENCES

Deng J., Wang L., Zhang Z.Z., Bing H. Microstructure characteristics and forming environment of late Quaternary Period loess in the Loess Plateau of China, *Environ. Earth Sci.*, 2010, no. 59, p. 1807–1817.

Grigoryeva I.Yu. *Mikrostroyeniye lessovykh porod* [Microstructure of loess soils]. Moscow, MAIK «Nauka / Interperiodika» Publ., 2001, 147 p. (in Russian)

Kolomenskiy E.N. O formirovaniy strukturno-teksturnykh osobennostey lessovykh porod [On the development of structural textural specifics of loess soils]. *Inzhenernaya geologiya*, 1988, no. 4, p. 3–17. (in Russian)

Konishchev V.N. *Formirovaniye sostava dispersnykh porod v kriolitosfere* [Formation of the composition of dispersed grounds in the cryolithosphere]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981, 197 p. (in Russian)

Konishchev V.N., Rogov V.V. *Metody kriolitologicheskikh issledovaniy* [Methods of cryolithological investigations]. Moscow, MSU Publ., 1994, 135 p. (in Russian)

Konstantinov E.A., Eremenko E.A. Znachenie metoda lazernoy difraktsionnoy granulometrii pri izuchenii lessov (na primere razreza Melekino, Severnoye Priazov'ye) [Significance of the laser diffraction grain size analysis in the study of loess (for example Melekino section, the Northern Azov Sea region)]. *Otechestvennaya geologiya*, 2012, no. 3, p. 47–54. (in Russian)

Kruger N.I. *Less, ego svoystva i svyaz' s geograficheskoy sredoy* [Loess, its properties and relation to the geographical environment]. Moscow, Nauka Publ., 196, 254 p. (in Russian)

Larionov A.K., Shtern L.Y. Rezultaty izucheniya tonkoi strukturi lessovykh porod nenarushennogo slozheniya na SEM [The results of fine structure analysis of undisturbed loess soils]. *Vestnik LGU. Geologiya, geografiya*, vol. 1, 1971, no. 5, p. 31–40. (in Russian)

Lessovye porody SSSR, Tom 1. Inzhenerno-geologicheskiye osobennosti i problemy ratsional'nogo ispol'zovaniya [Loess soils of the USSR, vol. 1. Engineering-geological features and the problems of sustainable use]. E.M. Sergeev, A.K. Larionov, N.N. Komissarova (Eds). Moscow, Nedra Publ., 1986, 232 p. (in Russian)

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Cryolithology and Glaciology, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: rogovvic@mail.ru

² Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre SB RAS, Laboratory of Cryotraceology, Senior Scientific Researcher

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Cryolithology and Glaciology, Associate Professor, PhD in Geography; e-mail: irinastrelets@gmail.com

⁴ Institute of Geography RAS, Department of Quaternary paleogeography, junior, researcher, no academic degree; e-mail: taratuninana@gmail.com

⁵ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Recent Deposits and Pleistocene Paleogeography; e-mail: taratuninana@gmail.com

⁶ Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre SB RAS, Laboratory of Cryotraceology, Senior Scientific Researcher; e-mail: kanni@mail.ru

⁷ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Recent Deposits and Pleistocene Paleogeography, Senior Scientific Researcher, PhD in Geography; e-mail: roger.kurbanov@gmail.com

⁸ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: paleo@inbox.ru

Popov A.I. Lessovye i lessovidnye porody kak produkt kriolitogeneza [Loess and loess-like rocks as products of cryolithogenesis]. *Vestnik MGU, seriya geograficheskaya*, 1967, no. 6, p. 43–48. (in Russian)

Rogov V.V. Osobennosti morfologii chastits skeleta kriogenogo elyuvia [Features of morphology of particles of a skeleton cryogenic eluvium]. *Kriosfera Zemli*, 2000, vol. 4, no. 3, p. 67–74. (in Russian)

Sergeev E.M., Minervin A.V. Sushhnost' processa oblessovaniya v podzolistoj zone [Nature of the process of loessivation in the podzol zone]. *Vestnik MGU. Seriya geologicheskaya*, 1960, no. 3, p. 3–14. (in Russian)

Stevens T., Buylaert J., Lu H., Thiel C., Murray A., Frechen M., Yi Sh., Zeng L. Mass accumulation rate and monsoon records from Xifeng, Chinese Loess Plateau, based on a luminescence age model. *Journal of Quaternary Science*, 2016, vol. 31, p. 391–405.

Velichko A., Catto N., Tesakov A., Titov V., Morozova T., Semenov V., Timireva S. The structure of Pleistocene loess-paleosol formation in southern Russian plain based on data from eastern Azov sea region. *Abstract volume INQUA-SEQS 2010* (Rostov-on-Don, Russia, June 21–26, 2010), Rostov-on-Don, Russia, 2010, p. 184–187.

Velichko A.A., Borisova O.K., Zakharov A.L., Karpukhina N.V., Kononov Yu.M., Konstantinov Ye.A., Kurbanov R.N., Morozova T.D., Panin P.G., Semenov V.V., Tesakov A.S., Timireva S.N., Titov V.V. [Loess-soil formation of the south East-European Plain and its relationship with marine Azov-Black Sea sediments] *Fundamentalnye problem kvartera, itogi izucheniya i osnovnye napravleniya dalnejshih issledovanij* [Fundamental problems of Quaternary, results and main trends of future studies] (Irkutsk, September 15–20, 2015). Irkutsk, V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS Publ., 2015, p. 86–87. (in Russian)

Woronko B., Pisarska-Jamroz M. Micro-scale frost weathering of sand-sized quartz grains. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2015, no. 27, p. 109–122.

Yanina T.A., Svitoch A.A., Kurbanov R.N., Murray A.S., Tkach N.T., Sychev N.V. Opyt datirovaniya pleystotsenovykh otlozheniy Nizhnego Povolzh'ya metodom opticheskii stimulirovannykh lyuminestsentsii [Paleogeographic analysis of the results of OSL dating of Pleistocene deposits of the Lower Volga area]. *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2017, no. 1, p. 21–29. (in Russian)

Received 18.02.2020

Revised 16.06.2020

Accepted 06.08.2020