

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 553.623+552.331+551.781.3

doi: 10.26907/2542-064X.2023.2.295-307

МИКРОСТРУКТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРЕН КВАРЦА И ПРОИСХОЖДЕНИЕ ПАЛЕОГЕНОВЫХ ПЕСКОВ УЛЬЯНОВСКО-СЫЗРАНСКОГО ПОВОЛЖЬЯ

С.О. Зорина, К.И. Никашин, Н.И. Афанасьева, Н. Хамада

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия

Аннотация

В статье приведены результаты изучения поверхностных микроструктур зерен кварца, слагающих пески верхней части сосновской толщи палеогена Ульяновско-Сызранского Поволжья. Изучение зерен кварца с применением оптического и электронного микроскопов показало, что они несут признаки многостадийной обработки в условиях субаквальной (зона пляжа), смешанной субаквально-эоловой (прибрежные дюны), инъектной и континентальной педологической обстановок. Впервые описан комплекс микроструктур, характерных для выдавливания зерен из глубоких горизонтов, свойственных инъектному механизму образования песков: ротационные микроструктуры, микротроги с зазубринами и деформированные флюидные включения. Учитывая достаточно свежий облик инъектных микроструктур, сделан вывод об их наложении на прибрежно-морской и эоловый этап эволюции песков. Заключительным этапом в геологической истории рассматриваемых песков следует считать этап обработки зерен в континентальных педологических условиях. По результатам исследования составлена интерпретационная схема, содержащая микроструктурные признаки реконструированных палеообстановок и стадии преобразования песчаного материала сосновской толщи.

Ключевые слова: микроструктуры, обломочные зерна, кварц, пески, сосновская толща, палеоген, Ульяновско-Сызранское Поволжье, Русская плита

Введение

Микроструктуры, встречающиеся на поверхности кварцевых зерен, дают представление об осадочной истории обломочных отложений и позволяют реконструировать разнообразные палеообстановки, в которых происходила обработка и транспортировка обломочного материала. Многочисленными исследованиями установлены микроструктуры кварцевых зерен самой разнообразной фациальной приуроченности и построены интерпретационные схемы, позволяющие дифференцировать речные, морские, эоловые, ледниковые, педологические и смешанные обстановки [1–4].

При изучении песчаного материала верхней части сосновской толщи палеогена Ульяновско-Сызранского Поволжья (УСП) (восток Русской плиты) на поверхности кварцевых зерен нами были обнаружены микроструктуры, свидетельствующие о прибрежно-морском, континентальном и, возможно, инъектном происхождении песчаного материала. Образование инъектитов, как

известно, происходит при выжимании флюидизированных песков под давлением из глубоких горизонтов на поверхность или внедрении в слоистую последовательность. В настоящем сообщении изложены первые результаты, содержащие описание диагностических признаков поверхностных микроструктур зерен кварца. Данные микроструктуры позволяют реконструировать прибрежно-морские, континентальные и инъектные обстановки, в которых происходила обработка и транспортировка песчаных зерен сосновской толщи УСП.

1. Геологическое строение и происхождение кварцевых песков сосновской толщи палеогена

Объектом настоящего исследования выбраны кварцевые пески верхней части сосновской толщи палеогена, вскрывающиеся в карьерах Кучуровского и Восточно-Ташлинского месторождений песков, расположенных в Сенгилеевском районе Ульяновской области (рис. 1, *а, б*).

Сосновская толща, мощностью до 180 м, распространена в УСП и представлена белыми, буровато-, розовато-белыми тонко-мелкозернистыми кварцевыми песками с неравномерными прослоями конкреционных песчаников (рис. 1, *в, г*). Участками пески залегают на маастрихтском мелу, но в основном подстилаются и перекрываются палеоценовыми нижнесызранскими опоками и диатомитами [5].

Вопрос о происхождении сосновских песков вызывает многолетние дискуссии в связи с их востребованностью в качестве стекольного и строительного сырья и необходимостью расширения минерально-сырьевой базы. До последнего времени считалось, что пески и песчаники сосновской толщи сформировались во время регрессий морского бассейна [6]. Некоторые исследователи придерживаются точки зрения об образовании рассматриваемых песков в условиях авандельты [7]. Таким образом, сосновская песчаная толща всегда относилась к прибрежно-морской пляжевой или дельтовой фациям. Но при этом не обращалось внимания на отсутствие в сосновских песках основных признаков, присущих дельтовым комплексам. В них не выявлены признаки дифференциации обломочных зерен с характерной градационной слоистостью, а также проградационные серии.

И основное противоречие осадочного происхождения сосновской толщи, на наш взгляд, связано с неопределенностью ее возраста. Согласно Унифицированной стратиграфической схеме палеогеновых отложений Поволжско-Прикаспийского субрегиона [8], сосновская толща датируется второй половиной дания – концом танета. На схеме Ульяновско-Сызранской зоны она показана «прорывающей» четыре последовательно залегающих стратона, что подчеркивает «интрузивный» характер ее залегания. Наша точка зрения о возможном инъектном происхождении сосновской толщи и ее более молодом (посттанетском) возрасте отражена в действующем варианте Унифицированной стратиграфической схемы палеогеновых отложений Поволжско-Прикаспийского субрегиона [8].

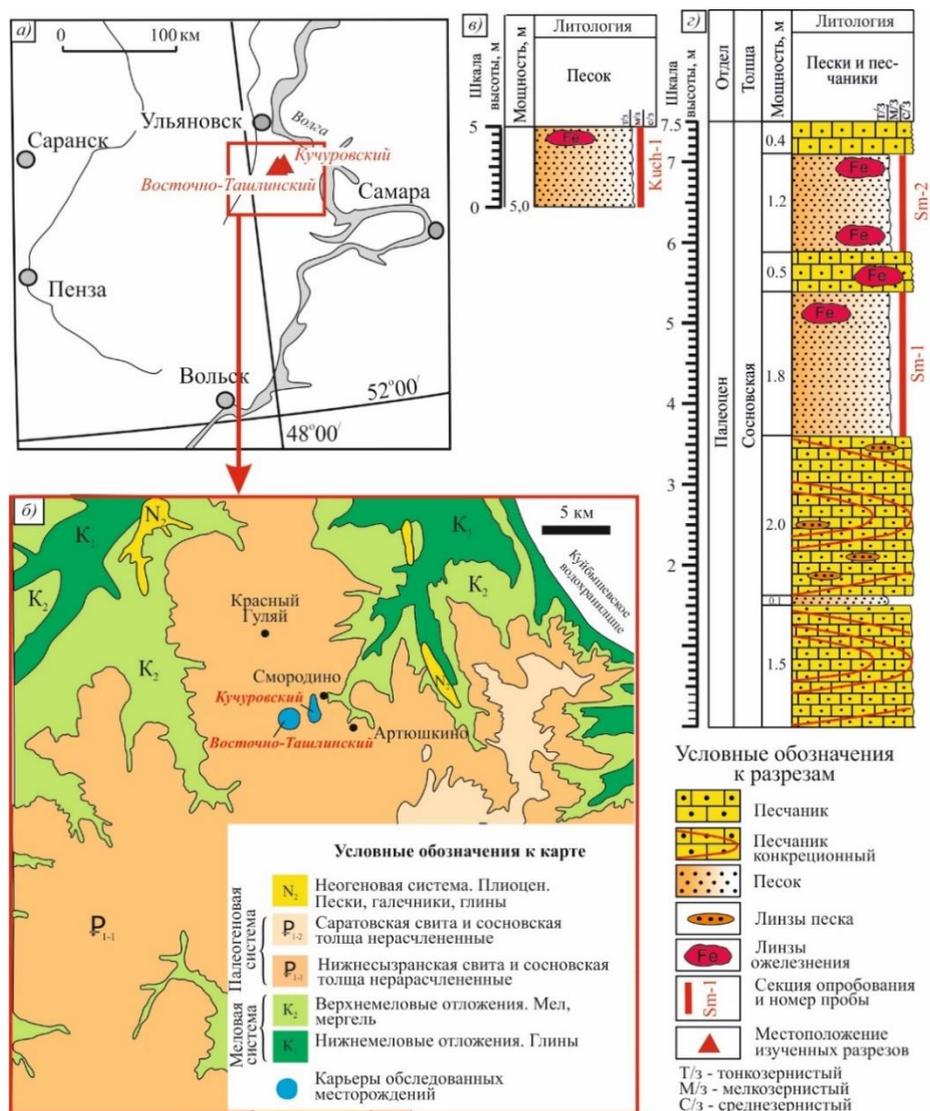


Рис. 1. Местоположение Восточно-Ташлинского и Кучуровского карьеров на географической схеме (а), обзорной геологической карте (по Личман, 1968ф) (б); литологическое строение верхней части сосновской толщи в Восточно-Ташлинском (в) и Кучуровском (г) карьерах и места отбора проб

2. Материалы и методы

В настоящем исследовании рассмотрена верхняя (приповерхностная) часть сосновской толщи, вскрытая Восточно-Ташлинским и Кучуровским карьерами на глубину 5 и 7.5 м соответственно. Валовые пробы песков из Кучуровского (Sm-1 и Sm-2) и Восточно-Ташлинского (Kuch-1) карьеров (рис. 1, в, г) были рассеяны на ситах со стандартным размером ячеек, принятым для определения качества строительных песков. Затем из каждой фракции были отквартованы навески массой 5–20 г, которые просматривались под оптическим микроско-

пом Carl Zeiss AxioLab (Carl Zeiss, Германия) с цифровой камерой AxioCam 506 color в отраженном и проходящем свете, что позволяет изучать поверхностные микроструктуры и особенности внутреннего строения зерен. Из тысячи зерен, изученных под оптическим микроскопом, порядка пятидесяти зерен были исследованы методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с применением растрового электронного микроскопа Philips XL-30 ESEM-FEG (Philips, Нидерланды) (ИГиНГТ КФУ). Фациальная диагностика обстановок, в которых проходила обработка и транспортировка песчаного материала сосновской толщи, проведена на основе интерпретационных схем и обобщений поверхностных микроструктур, которые позволяют реконструировать палеообстановки [1–4].

3. Микроструктуры на поверхности зерен кварца сосновских песков как индикаторы палеообстановок

В исследованных фракциях сосновских песков численно доминируют хорошо и среднеокатанные зерна кварца с микроструктурами, характерными одновременно для морского пляжевого побережья (60–80%) и прибрежных дюн (20–30%) (рис. 2, *a–z*). В самых мелких фракциях (0.16–0.315 мм, < 0.16 мм) преобладают слабо окатанные и угловатые зерна со свежими следами сколов, их количество в общей массе песка составляет 30–45%. Вероятнее всего, они представляют собой обломки более крупных зерен.

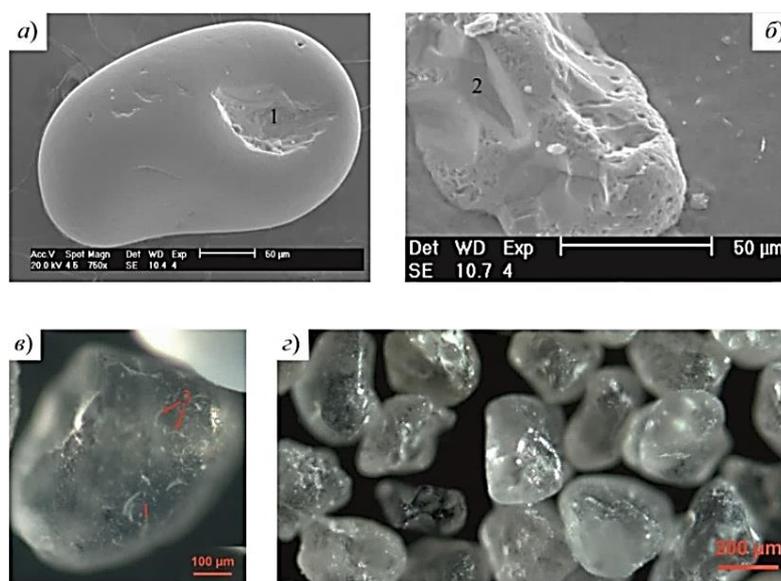


Рис. 2. СЭМ-изображения зерен пробы Sm-1, фракция < 0.16 мм: *a*) хорошо окатанное зерно с гладкой поверхностью и свежей серповидной вмятиной (1); *б*) зерно средней окатанности с шероховатой поверхностью и V-образными следами ударов (2). Микрофотографии зерен пробы Sm-2; *в*) полуокатанное зерно с шероховатой поверхностью, многочисленными серповидными выбоинами (1) и ударными трещинами (3). Фракция 0.315–0.63 мм; *z*) слабо окатанные зерна со слабо шероховатой поверхностью, выпуклыми краями, со сглаженными вмятинами и сглаженными мелкими раковистыми сколами. Фракция 0.16–0.315 мм

Весьма характерным и распространенным типом поверхностных микро-структур являются вторичные кремнеземистые образования – глобулы, их скопления (рис. 3, *а*) и оболочки вокруг зерен, скрепляющие их между собой. Так, в самой крупной фракции песков (0.63–1.25 мм) встречаются скопления мелких кварцевых зерен, спаянных опаловым цементом (рис. 3, *б*).

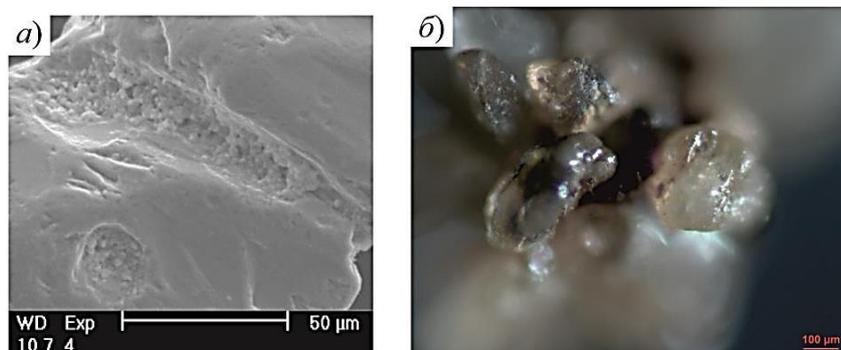


Рис. 3. *а*) СЭМ-изображение фрагмента среднеокатанного зерна со скоплениями глобуль кремнезема во вмятинах и трогах. Проба Sm-2, фракция 0.63–1.25 мм; *б*) микрофотография мелких кварцевых зерен, спаянных вторичным кремнеземом. Проба Kuch-1, фракция 0.63–1.25 мм

Данные микроструктуры являются признаком обработки кварцевого материала в низкоэнергетических континентальных обстановках [9], и, вероятно, скрепление зерен кремнеземом произошло уже после излияния песчаного материала на дневную поверхность или внедрения в слоистую толщу.

Кроме вышеописанных были обнаружены микроструктуры, характерные для обстановок, при которых зерна вдавливались, вкручивались и дробились под давлением других зерен. Общее количество зерен, на поверхности которых они обнаружены, составляет 30–40%. Так, на рис. 4 (*а*, *б*) приведены изображения зерен с ротационными микроструктурами, проявленными в виде серии ступенчатых вмятин от вдавливания мелкого зерна в поверхность более крупного. Под воздействием давления в направлении, примерно перпендикулярном поверхности большого зерна, оно прокручивалось и вдавливалось, оставляя ступенчатый след и постепенно смещаясь в направлении, обратном движению большого зерна. Примечательно наличие следов вдавливания нескольких зерен, которые ориентированы в одном направлении (рис. 4, *б*).

Важные признаки вдавленного трения зерен, сопровождавшего образование инъектитов, выявлены на поверхности полуокатанного кварцевого зерна из фракции 0.315–0.63 мм пробы Kuch-1 (рис. 5). На гладкой бугристо-ямчатой поверхности зерен выявлены параллельные трогообразные борозды свежего облика (рис. 5, *а*, *б*), оставленные при трении крупных зерен друг о друга, при этом между зернами, вероятно, оказались «зажаты» мелкие острые осколки, образовавшиеся при раздавливании более крупного зерна. По бортам микро-трогов отмечаются мелкие зазубрины – следы ступенчатого вдавленного движения мелких острых зерен под давлением справа налево – вниз (рис. 5, *в*).

Одним из наиболее индикативных признаков движения песчаных масс под давлением, несомненно, является наличие внутренних деформаций кварцевых

зерен. На рис. 6 приведен пример деформации флюидного включения, которое из-за сдавливания потеряло округлую форму. При микроскопическом изучении установлено, что примерно половина зерен имеет следы внутренних деформаций от внешнего сдавливания.

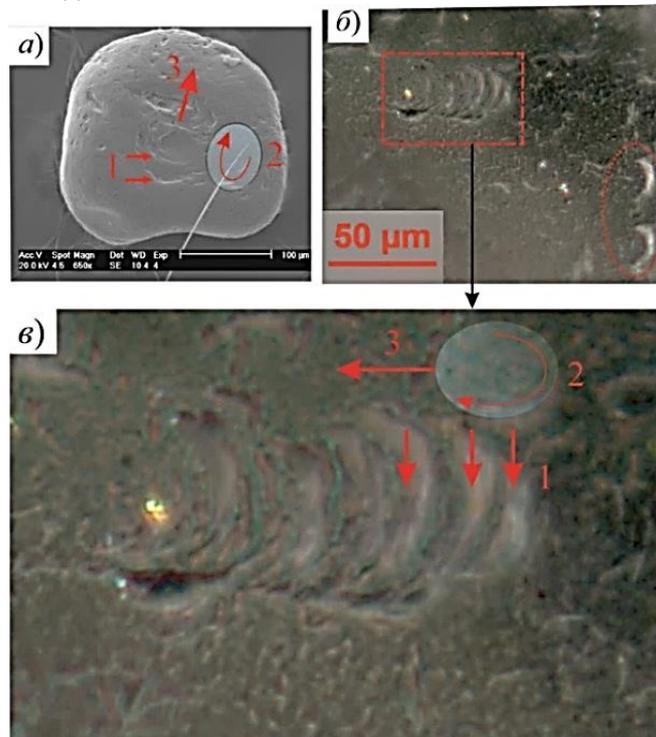


Рис. 4. Ротационные микроструктуры, характерные для инъектитов. Проба Kuch-1: *а)* СЭМ-изображение зерна со следами ступенчатого вдавливания и вращения более мелкого зерна; *б)* микрофотография матовой поверхности зерна с параллельными серповидными ударными вмятинами (пунктирный овал) и ротационной микроструктурой (пунктирный прямоугольник); *в)* увеличенный фрагмент поверхности зерна с ротационной микроструктурой. Стрелками показано направление вдавливания (1), вращения (2) и движения (3) мелкого зерна

4. Обсуждение результатов

В основу инъектного происхождения сосновских песков положена фундаментальная концепция образования песчаных интрузий, разработанная и апробированная в многочисленных публикациях [10–17]. Для образования песчаных интрузий необходимо наличие нескольких обязательных факторов: песчаного слоя-источника, залегающего на значительной глубине от песчаного интрузива; слабо проницаемых вмещающих пород (например, глин); зон трещиноватости, связанных с фазами растяжения; избыточного литостатического давления, воздействующего на песчаный слой-источник; тектонического триггера.

При нарастании литостатического давления рыхлые пески слоя-источника приобретают текучесть и мигрируют по трещинам в более высокие горизонты. Если трещина достигает поверхности седиментации, а выталкивающая сила

достаточна для излияния песчаного флюида, пески изливаются на поверхность дна бассейна или суши. В противном случае процесс ограничивается образованием песчаных силлов и даек. Мощность и протяженность силлов находятся в прямой зависимости от глубины залегания исходного песчаного пласта и градиента избыточного литостатического давления [15].

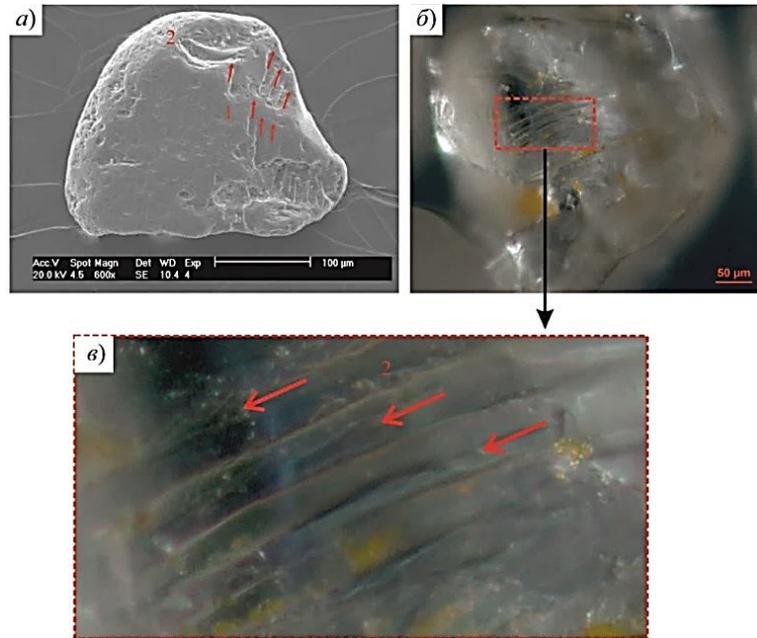


Рис. 5. Микротроги – индикаторы инъектного механизма: а) СЭМ-изображение хорошо окатанного зерна с однонаправленно ориентированными микротрогами (1) и ступенчатыми серповидными вмятинами (2); б) микрофотография полуокатанного зерна с параллельными трогообразными бороздами на гладкой бугристо-ямчатой поверхности. Проба Kuch-1, фракция 0.315–0.63 мм; в) увеличенный фрагмент микротрогов с мелкими зубринами по бортам (2). Стрелками показано направление перемещения «царапающих» зерен

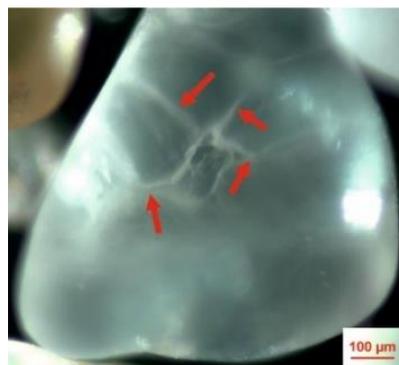


Рис. 6. Внутренние деформации флюидного включения. Проба Kuch-1, фракция 0.63–1.25 мм. Стрелками показаны трещины вокруг включения, совпадающие с направлением сдавливания зерна

Примечательно, что вышеперечисленные обязательные факторы присутствуют в рассматриваемом геологическом разрезе УСП [5]. Ниже приведены выявленные признаки возможного инжектного происхождения палеогеновых песков, распространенных в УСП, установленные по результатам изучения поверхностных микроструктур кварцевых зерен. Известно, что субаквальная обстановка определяется по хорошей окатанности зерен, сглаженному микро рельефу поверхности, наличию V-образных ударных трещин, прямых и изогнутых борозд [2–4]. Основным признаком воздействия эолового переноса являются шероховатая и матовая поверхность зерен, многочисленные выпуклости и сколы, формирующиеся при ударах зерен друг о друга. Континентальные аридные условия диагностируются по следам растворения и выщелачивания на поверхности, которые придают зернам «испещренный» облик. Другим признаком педологической обстановки являются вторичные образования кремнезема. Глобулы кремнезема в составе цемента песчаников формируются, когда относительно неподвижные зерна кварца подвергаются воздействию насыщенных кремнеземом флюидов [16].

В результате микроскопического и электронно-микроскопического изучения кварцевых зерен сосновских песков выявлены разнообразные внутренние и поверхностные микроструктуры, позволившие диагностировать фациальные условия, в которых происходила обработка песчаного материала. По степени сглаженности поверхности или угловатости рельефа оказалось возможным определить последовательность этапов такой обработки. Некоторые микроструктуры характерны для различных фациальных обстановок, и по ним невозможно дать однозначный ответ о конкретных условиях формирования песка [4]. Такие микроструктуры, как V-образные ударные трещины, серповидные следы ударов, сглаженность рельефа, мелкие раковистые сколы и некоторые другие, позволили определить, что сосновские пески изначально формировались в условиях субаквальной морской (зона пляжа) и смешанной субаквально-эоловой (дюны морского побережья) обстановок.

Важнейшим выводом проведенного исследования является выявление микроструктур, характерных для инжектного механизма воздействия на зерна. Впервые описаны ротационные микроструктуры и микротроги с зазубринами, которые в совокупности с деформированными флюидными включениями представляют собой диагностический комплекс для выявления инжективов. Учитывая достаточно свежий облик перечисленных микроструктур, сделан вывод об их наложении на прибрежно-морской и эоловый этап эволюции.

Заключительным этапом в геологической истории рассматриваемых песков следует считать этап обработки зерен в континентальных педологических условиях. Вторичный кремнезем в виде глобул и их скоплений цементирует кварцевые зерна, на поверхности которых отмечаются все признаки предыдущих этапов.

По результатам исследования составлена интерпретационная схема, содержащая разнообразные микроструктурные признаки реконструированных палеообстановок и стадии обработки песчаного материала сосновской толщи (табл. 1). При составлении схемы в значительной мере были учтены обобщения микроструктур, приведенные в работах [1–4].

Табл. 1

Интерпретационная схема палеообстановок образования песков сосновской толщи по микроструктурам на поверхности кварцевых зерен (по [1–4])

Этапы	Обстановка		Микроструктурные признаки
Накопление слоя- источника	Субаквальная	Морская пля- жевая	Хорошая окатанность Низкий выровненный микрорельеф (гладкая поверхность) Небольшие раковистые сколы V-образные ударные трещины
	Смешанная суб- аквально-эоловая	Прибрежные дюны	Окатанные и слабоокатанные зерна Слабая и средняя шероховатость Многочисленные серповидные следы ударов Раковистый характер скола от ударов V-образные ударные трещины
Инжективный	Внедрение песчаных интрузий и экструзий (инжектитообразова- ние)		Ротационные микроструктуры в виде ступенчатых вмятин Микротроги с зазубринами по бортам Деформации флюидных включений
Постин- жективный	Континентальная, педологиче- ская		Образование вторичного кремнезе- ма – скопления глобуль и пленки

Заключение

Микроскопическое и электронно-микроскопическое изучение поверхностных микроструктур показало, что зерна кварца сосновских песков несут признаки многостадийной обработки в условиях субаквальной (зона пляжа), смешанной субаквально-эоловой (прибрежные дюны), инжективной и континентальной педологической обстановок.

В комплексе микроструктур выявлены и описаны поверхностные микроструктуры, характерные для выжимания песков под давлением из глубоких горизонтов в приповерхностные области с образованием песчаных интрузий и экструзий. Диагностический комплекс инжективной обстановки включает ротационные микроструктуры в виде ступенчатых вмятин, микротроги с зазубринами по бортам и деформации флюидных включений.

Предполагаемое инжективное происхождение сосновских песков имеет важное практическое значение, так как позволяет разработать новые подходы к прогнозированию песчаных залежей стекольных и строительных кварцевых песков, приуроченных к сосновской толще палеогена Ульяновско-Сызранского Поволжья.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00070, <https://rscf.ru/project/22-27-00070/>.

Литература

1. *Георгиев В.М.* Методика исследования микроструктур кластического кварца в осадках при помощи электронного микроскопа // Литология и полезные ископаемые. 1982. № 6. С. 37–48.

2. *Krinsley D.H., Doornkamp J.C.* Atlas of Quartz Sand Surface Textures. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1973. 91 p.
3. *Mahaney W.C.* Atlas of Sand Grain Surface Textures and Applications. N.Y.: Oxford Univ. Press, 2002. 237 p.
4. *Vos K., Vandenberhe N., Elsen J.* Surface textural analysis of quartz grains by scanning electron microscopy (SEM): From sample preparation to environmental interpretation // *Earth-Sci. Rev.* 2014. V. 128. P. 93–104. doi: 10.1016/j.earscirev.2013.10.013.
5. *Zorina S.O., Afanasyeva N.I.* The sand injectites in the Russian Platform`s Paleogene sediments // *Stratigr. Sedimentol. Oil-Gas Basins.* 2012. V. 2. P. 35–48.
6. *Леонов Г.П.* Основные вопросы региональной стратиграфии палеогеновых отложений Русской платформы. М.: Издательство Московского государственного университета, 1961. 552 с.
7. *Дистанов У.Г.* Кремнеаккумуляция в мезокайнозойских бассейнах платформенных областей // *Кремнистые породы СССР.* Казань, 1976. С. 255–262.
8. *Ахметьев М.А., Шук С.М., Алексеев А.С.* Унифицированная стратиграфическая схема палеогеновых отложений Поволжско-Прикаспийского субрегиона. Объяснительная записка. М.: ВНИГНИ, 2014. 96 с.
9. *Higgs R.* Quartz-grain surface features of Mesozoic–Cenozoic sands from the Labrador and western Greenland continental margins // *J. Sediment. Petrol.* 1979. V. 49, No 2. P. 599–610. doi: 10.1306/212F779D-2B24-11D7-8648000102C1865D.
10. *Браччини Э., де Бур В., Херст Э., Хуус М., Вигорито М., Темплтон Г.* Песчаные кластические интрузии // *Нефтегазовое обозрение.* 2008. Т. 20, Вып. 2. С. 38–57.
11. *Hurst A., Scott A., Vigorito M.* Physical characteristics of sand injectites // *Earth-Sci. Rev.* 2011. V. 106, No 3–4. P. 215–246. doi: 10.1016/j.earscirev.2011.02.004.
12. *Dixon R.J., Schofield K., Anderton R., Reynolds A.D., Alexander R.W.S., Williams M.C., Davies K.G.* Sandstone diapirism and clastic intrusion in the Tertiary submarine fans of the Bruce–Beryl Embayment, Quadrant 9, UKCS // *Hartley A.J., Prosser D.J. (Eds.) Characterization of Deep Marine Clastic Systems.* V. 94. Book Ser.: Geological Society, London, Special Publications. London: Geol. Soc., 1995. P. 77–94.
13. *Davies R.J., Huuse M., Hirst Ph., Cartwright J., Yang Y.* Giant clastic intrusions primed by silica diagenesis // *Geology.* 2006. V. 34, No 11. P. 917–920. doi: 10.1130/G22937A.1.
14. *Løseth H., Rodrigues N., Cobbold P.R.* World's largest extrusive body of sand? // *Geology.* 2012. V. 40, No 5. P. 467–470. doi: 10.1130/G33117.1.
15. *Jolly R.J.H., Lonergan L.* Mechanisms and controls on the formation of sand intrusions // *J. Geol. Soc.* 2002. V. 159, No 5. P. 605–617. doi: 10.1144/0016-764902-025.
16. *Ross J.A., Peakall J., Keevil G.M.* An integrated model of extrusive sand injectites in cohesionless sediments // *Sedimentology.* 2011. V. 58, No 7. P. 1693–1715. doi: 10.1111/j.1365-3091.2011.01230.x.
17. *Van Loon A.J.(T.).* Sedimentary volcanoes: Overview and implications for the definitions of a volcano on Earth // *Cañón-Tapia E., Szakács A. (Eds.) What is Volcano? Special Paper 470.* Geol. Soc. Am., 2010. P. 31–41. doi: 10.1130/2010.2470(03).

Поступила в редакцию 04.08.2022

Принята к публикации 15.11.2022

Зорина Светлана Олеговна – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры палеонтологии и стратиграфии

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *svzorina@yandex.ru*

Никашин Константин Игоревич – аспирант, инженер научно-исследовательской лаборатории стратиграфии нефтегазоносных резервуаров

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *kostya97@inbox.ru*

Афанасьева Надежда Иосифовна – кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель кафедры палеонтологии и стратиграфии

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *n-afanasieva@rambler.ru*

Хамада Надия – магистрант программы «Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов»

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *nadia.m.hamada@gmail.com*

ISSN 2542-064X (Print)
ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2023, vol. 165, no. 2, pp. 295–307

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2023.2.295-307

**Surface Microtextures of Quartz Grains and Origin of the Paleogene Sands
in the Ulyanovsk-Syzran Volga Region**

S.O. Zorina *, *K.I. Nikashin* **, *N.I. Afanasieva* ***, *N. Hamada* ****

Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia

E-mail: **svzorina@yandex.ru*, ***kostya97@inbox.ru*, ****n-afanasieva@rambler.ru*,
*****nadia.m.hamada@gmail.com*

Received August 4, 2022; Accepted November 15, 2022

Abstract

Quartz grains were separated by standard sieving of the Paleogene sands from the Sosnovka Formation of the Ulyanovsk-Syzran Volga region, which are a scarce and valuable raw material for glass making and construction. In order to establish the origin of the sands and restore the facies conditions of their formation, the surface microtextures of the separated quartz grains were examined by optical and electron microscopy. It was shown that the clastic grains of the Sosnovka sands bear the signs of a multi-stage formation process under the conditions of subaquatic (beach zone), eolian, mixed subaquatic-eolian (coastal dunes), injective, and continental pedological settings. For the first time, a complex of microtextures characteristic of the extrusion of grains from deep horizons under pressure and inherent in the injection mechanism of sand formation was described. The diagnostic complex of injectites includes rotational microtextures, notched microtroughs, and deformed fluid inclusions. The rather fresh appearance of the listed microtextures suggests that they were superimposed on the coastal-marine and eolian stages of the evolution with the subsequent formation of sand intrusions. At the final stage of the geological history of the Sosnovka sands, the grains were shaped by the continental pedological conditions, when secondary

silica in the form of globules and their clusters cemented the quartz grains, the surface of which concatenated the features of the previous stages. Based on the results of the study, an interpretation scheme summarizing various microtextural features of the reconstructed paleoenvironments and the stages of formation the Sosnovka sands was developed. The finding that the Sosnovka sands are sand intrusions is of great practical importance, as it necessitates new approaches to the discovery and prediction of glass and quartz sand deposits confined to the Paleogene Sosnovka Formation of the Ulyanovsk-Syzran Volga region.

Keywords: microtextures, grains, sands, Sosnovka Formation, Paleogene, Ulyanovsk-Syzran Volga region, Russian Platform

Acknowledgements. This study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-27-00070, <https://rscf.ru/project/22-27-00070/>).

Figure Captions

- Fig. 1. Location of the Eastern Tashlinsky and Kuchurovsky quarries on the geographical (*a*) and general geological (according to Lichman, 1968f) (*b*) maps; lithological composition of the upper part of the Sosnovka Formation in the Eastern Tashlinsky (*c*) and Kuchurovsky (*d*) quarries and the sampling sites.
- Fig. 2. SEM images of Sm-1 grains, fraction < 0.16 mm: *a*) well-rounded grain with a smooth surface and a fresh sickle-shaped dent (1); *b*) medium-rounded grain with a rough surface and V-shaped impact pits (2). Micrographs of Sm-2 grains; *c*) semi-rounded grain with a rough surface, as well as multiple sickle-shaped splits (1) and impact fractures (3). Fraction 0.315–0.63 mm; *d*) poorly rounded grains with slightly rough surfaces, convex edges, as well as smoothed dents and conchoidal chips. Fraction 0.16–0.315 mm.
- Fig. 3. *a*) SEM image of a fragment of the medium-rounded grain with clusters of silica globules in the dents and troughs. Sm-2 sample, fraction 0.63–1.25 mm; *b*) micrograph of small-sized quartz grains cemented by secondary silica. Kuch-1 sample, fraction 0.63–1.25 mm.
- Fig. 4. Rotational microtextures characteristic of injectites. Kuch-1 sample: *a*) SEM image of a grain with the traces of stepped indentation and rotation of a smaller grain; *b*) micrograph of the matt surface of a grain with parallel sickle-shaped impact dents (dotted oval) and a rotational microtexture (dotted rectangle); *c*) enlarged fragment of the grain surface with a rotational microtexture. The direction of indentation (1), rotation (2), and movement (3) of a small grain is shown with the arrows.
- Fig. 5. Microtroughs as indicators of the injection mechanism: *a*) SEM image of a well-rounded grain with unidirectional microtroughs (1) and stepped sickle-shaped dents (2); *b*) micrograph of a semi-rounded grain with parallel trough-like grooves on a smooth hummocky and pitted surface. Kuch-1 sample, fraction 0.315–0.63 mm; *c*) enlarged fragment of the microtroughs with small notches along the sides (2). The movement of “scratching” grains is shown with the arrows.
- Fig. 6. Internal deformations of the fluid inclusion. Kuch-1 sample, fraction 0.63–1.25 mm. Fractures around the inclusion coinciding with the direction of the grain squeezing are shown with the arrows.

References

1. Georgiev V.M. A methodology for examining detrital quartz microtextures using electron microscopy. *Lithol. Polezn. Iskop.*, 1982, no. 6, pp. 37–48. (In Russian)
2. Krinsley D.H., Doornkamp J.C. *Atlas of Quartz Sand Surface Textures*. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1973. 91 p.
3. Mahaney W.C. *Atlas of Sand Grain Surface Textures and Applications*. New York, Oxford Univ. Press, 2002. 237 p.
4. Vos K., Vandenberhe N., Elsen J. Surface textural analysis of quartz grains by scanning electron microscopy (SEM): From sample preparation to environmental interpretation. *Earth-Sci. Rev.*, 2014, vol. 128, pp. 93–104. doi: 10.1016/j.earscirev.2013.10.013.
5. Zorina S.O., Afanasyeva N.I. The sand injectites in the Russian Platform’s Paleogene sediments. *Stratigr. Sedimentol. Oil-Gas Basins*, 2012, vol. 2, pp. 35–48.

6. Leonov G.P. *Osnovnye voprosy regional'noi stratigrafii paleogenovykh otlozhenii Russkoi platformy* [Major Problems in the Regional Stratigraphy of the Paleogene Deposits of the Russian Platform]. Moscow, Izd. Mosk. Gos. Univ., 1961. 552 p. (In Russian)
7. Distanov U.G. Accumulation of silicious rocks in the Mesozoic and Cenozoic platform basins. In: *Kremnistye porody SSSR* [Silicious rock of the USSR]. Kazan, 1976, pp. 255–262. (In Russian)
8. Akhmet'ev M.A., Shik S.M., Alekseev A.S. *Unifitsirovannaya stratigraficheskaya skhema paleogenovykh otlozhenii Povolzhsko-Prikaspiiskogo subregiona* [Unified Stratigraphic Scheme of Paleogene Deposits of the Volga-Caspian Subregion]. Moscow, VNIGNI, 2015. 96 p. (In Russian)
9. Higgs R. Quartz-grain surface features of Mesozoic–Cenozoic sands from the Labrador and western Greenland continental margins. *J. Sediment. Petrol.*, 1979, vol. 49, no. 2, pp. 599–610. doi: 10.1306/212F779D-2B24-11D7-8648000102C1865D.
10. Braccini E., de Boer W., Hurst A., Huuse M., Vigorito M., Templeton G. Sand injectites. *Oilfield Rev.*, 2008, vol. 20, no. 2, pp. 33–49.
11. Hurst A., Scott A., Vigorito M. Physical characteristics of sand injectites. *Earth-Sci. Rev.*, 2011, vol. 106, nos. 3–4, pp. 215–246. doi: 10.1016/j.earscirev.2011.02.004.
12. Dixon R.J., Schofield K., Anderton R., Reynolds A.D., Alexander R.W.S., Williams M.C., Davies K.G. Sandstone diapirism and clastic intrusion in the Tertiary submarine fans of the Bruce-Beryl Embayment, Quadrant 9, UKCS. In: Hartley A.J., Prosser D.J. (Eds.) *Characterization of Deep Marine Clastic Systems*. Vol. 94. Book Ser.: Geological Society, London, Special Publications. London, Geol. Soc., 1995. pp. 77–94.
13. Davies R.J., Huuse M., Hirst Ph., Cartwright J., Yang Y. Giant clastic intrusions primed by silica diagenesis. *Geology*, 2006, vol. 34, no. 11, pp. 917–920. doi: 10.1130/G22937A.1.
14. Løseth H., Rodrigues N., Cobbold P.R. World's largest extrusive body of sand? *Geology*, 2012, vol. 40, no. 5, pp. 467–470. doi: 10.1130/G33117.1.
15. Jolly R.J.H., Lonergan L. Mechanisms and controls on the formation of sand intrusions. *J. Geol. Soc.*, 2002, vol. 159, no. 5, pp. 605–617. doi: 10.1144/0016-764902-025.
16. Ross J.A., Peakall J., Keevil G.M. An integrated model of extrusive sand injectites in cohesionless sediments. *Sedimentology*, 2011, vol. 58, no. 7, pp. 1693–1715. doi: 10.1111/j.1365-3091.2011.01230.x.
17. Van Loon A.J.(T.). Sedimentary volcanoes: Overview and implications for the definitions of a volcano on Earth. In: Cañón-Tapia E., Szakács A. (Eds.) *What is Volcano?* Special Paper 470. Geol. Soc. Am., 2010, pp. 31–41. doi: 10.1130/2010.2470(03).

Для цитирования: Зорина С.О., Никашин К.И., Афанасьева Н.И., Хамада Н. Микроструктуры на поверхности зерен кварца и происхождение палеогеновых песков Ульяновско-Сызранского Поволжья // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2023. Т. 165, кн. 2. С. 295–307. doi: 10.26907/2542-064X.2023.2.295-307.

For citation: Zorina S.O., Nikashin K.I., Afanasieva N.I., Hamada N. Surface microtextures of quartz grains and origin of the Paleogene sands in the Ulyanovsk-Syzran Volga region. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2023, vol. 165, no. 2, pp. 295–307. doi: 10.26907/2542-064X.2023.2.295-307. (In Russian)