

Метод микроморфологического анализа рыхлых отложений и его применение для реконструкции палеогеографической обстановки в криолитозоне

А.А. Куть*, А.Е. Мельников

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

*ann.urban@mail.ru

Аннотация. В статье приведены сведения об истории развития метода микроморфологического анализа рыхлого материала. Описаны существующие методики диагностики отложений, рассмотрены основные проблемы, связанные с их применением и корреляцией результатов. Проанализировано современное положение микроморфологического анализа в комплексе литолого-фацальных исследований. Подчеркнуто, что становлению метода способствовал технический прогресс в XX в. Применение электронной микроскопии вывело рассматриваемый метод на совершенно новый уровень. Метод в свое время был разработан для реконструкции обстановки переноса и накопления четвертичных отложений вне области криолитозоны. Однако с 1970-х годов исследование поверхности зерен начали применять для изучения особенностей проявления криогенеза в осадочных отложениях. На современном этапе начинают внедрять современные методы исследований поверхности частиц с использованием компьютерной томографии. Это значительно расширяет область применения метода микроморфологического анализа рыхлых отложений для различных целей. Приводится набор диагностических элементов, выделенных в результате применения данного метода для Кызыл-Сырского дюнного массива в бассейне р. Вилюй и разреза Абалахской поверхности в среднем течении р. Лена.

Ключевые слова: микроморфологический анализ, исторический обзор, становление метода, обстановка осадконакопления, криогенез.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-55-53006 «Криогипергенез грунтовых массивов Южной Якутии России и Северо-Восточного Китая: механизм и особенность».

Введение

Метод микроморфологического анализа рыхлых отложений широко используют специалисты в различных областях геологии и географии. Цель исследований заключается в анализе обстановки осадконакопления, определении генезиса отложений, способа и дальности транспортировки образующего материала для реконструкции истории преобразования рельефа. Метод основан на утверждении, что каждая среда, через которую проходит материал, оставляет на поверхности частицы характерные следы воздействия механических и химических процессов, различающиеся формой, степенью окатанности зерен и набором диагностических элементов поверхности. В криолитогенных отложениях в условиях распространения многолетнемерзлых пород помимо набора специфических текстурных эле-

ментов, получаемых в результате многократных циклов промерзания-протаивания, характерно перераспределение гранулометрического и минералогического состава, количественная оценка которого является прямым индикатором условий формирования криолитозоны. Статья раскрывает особенности применения метода для рыхлых отложений, в том числе и в области развития многолетнемерзлых пород. Описание различных направлений применения этого метода показывает обширность его применения и для практических целей в том числе.

К истории развития метода

Первое упоминание об изучении морфологии песчаных частиц относится к 1880 г. Г. Сорби в своей публикации обратил внимание на особенности строения поверхности зерен [1]. Чуть по-

же П.С. Марсланд установил, что при длительном нахождении в условиях воздушного переноса изменяется размер и степень окатанности частиц [2]. Результаты его исследований показали, что кварцевые зерна имеют достаточную твердость, чтобы подвергаться воздействию окружающей обстановки, но при этом сохранять черты среды в течение продолжительного времени. Это подтолкнуло многих исследователей заняться изучением взаимосвязи формы и окатанности частиц и условий их переноса и накопления. Такие крупные зарубежные ученые, как В.С. Крумбейн [3], А. Кайе [4, 5], Д. Кринслей [6], В.С. Марголис [7], Р. Хигс [8], Ф.Дж. Петтиджон [9], П. Булл [10], В.С. Махоуни [11], и, конечно же, отечественные исследователи А.В. Хабаков [12], В.П. Батурич [13], В.П. Чичагов [14], Л.Б. Рухин [15], Е.В. Рухина [16], Н.Л. Артемова [17], Тимирева С.Н. [18], В.Н. Конищев [19], В.В. Рогов [20] и многие другие внесли большой вклад в развитие и становление метода. Одним из значимых достижений считается классификация зерен по степени окатанности и заматованности поверхности [4]. С годами эта классификация была доработана [21] и ею продолжают пользоваться в настоящее время. Д. Кринслей и В.С. Махоуни на основании огромного объема материала составили атласы текстур поверхности кварцевых зерен [11, 22]. Авторы наглядно

показали, как изменяются форма и поверхность зерен при передвижении рыхлых отложений в речном потоке, при их накоплении в условиях застойного водоема, при переносе ветром, ледником и т. д. В.П. Чичагов, изучая ледниковые отложения, выделил пять наиболее встречающихся видов поверхностей песчаных зерен [14]. А.В. Хабаков [12] разработал метод расчета коэффициента окатанности и заматованности частиц, широко применяемый российскими учеными в настоящее время. Особенности проявления процессов криогенеза минерального вещества и основные положения теории селективного разрушения минералов при фазовых переходах вода–лед были изучены В.В. Роговым и В.Н. Конищевым [20, 23, 24].

Расширение знаний в области изучения микростроения частиц произошло благодаря развитию методов исследований. В 40-х годах XX в. исследования формы и поверхности частиц в полевых условиях проводились под лупой, а в лабораториях – под бинокулярным микроскопом [14]. Форма зерен в то время определялась по микрографиям с помощью палетки с нанесенными концентрическими окружностями. Это, несомненно, было весьма трудоемко и не давало возможности обрабатывать большой объем получаемого материала. Микрографии получали с помощью светового микроскопа (рис. 1). Однако



Рис. 1. Микрография эоловых песчаных зерен, выполненная световым микроскопом [14].

Fig. 1. Light micrograph of aeolian sand grains [14].

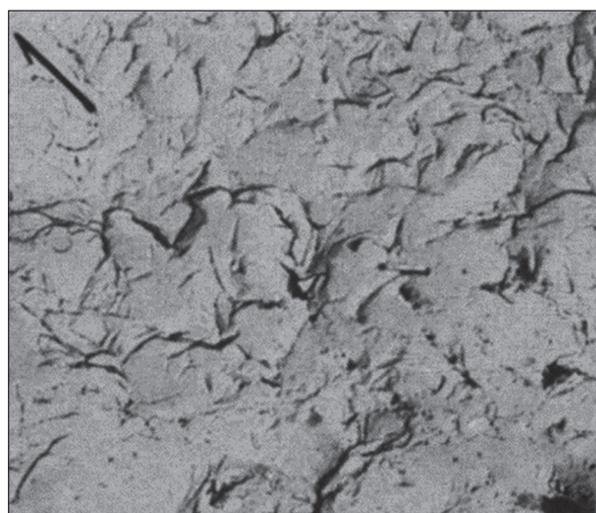


Рис. 2. Реплика поверхности зерна, подготовленная для анализа на ТЭМ [31].

Fig. 2. Replica of grain surface prepared for TEM analysis [31].

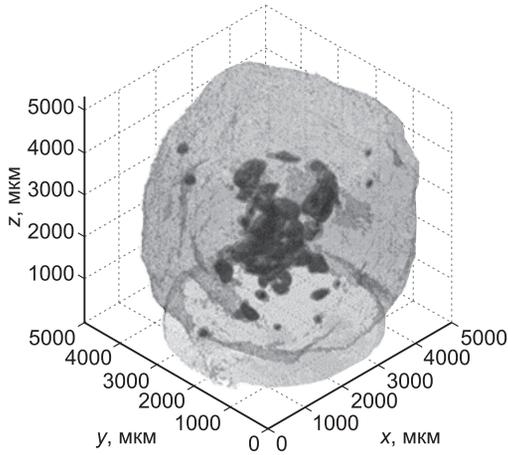


Рис. 3. Реконструкция трехмерной модели песчаной частицы методом рентгеновской компьютерной томографии [26].

Fig. 3. 3D computer tomography reconstruction of sand grain [26].

его применение было возможно лишь для зерен диаметром не менее 1 мм. Значительный прорыв произошел благодаря появлению электронной микроскопии. В 1951 г. геологами Р. Фолком и К. Вевером [25] впервые был использован трансмиссионный электронный микроскоп (ТЭМ). У этого микроскопа (просвечивающего типа) было более высокое разрешение по сравнению со световым, но все же он имел ряд недостатков. Один из них заключался в том, что для исследования зерен необходимо было изготавливать точную копию поверхности – реплику (рис. 2). По этой причине получаемые результаты носили приближенный характер из-за появления искажений. На изготовление 12 реплик уходило около 12 ч, т. е. это было очень сложно и трудоемко. Еще один недостаток заключался в очень высоком разрешении, не позволяющем изучать зерно целиком. По сравнению со сканирующим электронным микроскопом и растровым электронным микроскопом увеличение ТЭМ было в 50 раз меньше [22]. На сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) поверхность зерен можно исследовать напрямую, без предварительного изготовления реплик. Поэтому зерна можно было исследовать целиком или по частям, выбирая необходимое увеличение. К 1968 г. использование СЭМ прочно вошло в практику исследований поверхности зерен и избавило ученых от указанных выше проблем. В настоящее время, наряду с широким применением СЭМ, на фоне

значительного технологического прорыва внедряют более современные методы исследований, такие как рентгеновская томография (микротомография) и компьютерные программные обеспечения, использующие методы 3D-визуализации (рис. 3) [26–28].

В России изучение частиц методом компьютерной томографии впервые было проведено в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, и метод показал эффективность [29]. Основное преимущество заключается в возможности изучения отложений без механических повреждений структуры и свойств отложений [30]. Это дает возможность изучения различных процессов, происходящих в породе.

Использование метода для реконструкции палеоусловий осадконакопления

Микроморфологическое изучение поверхности частиц имеет несколько аспектов. Во-первых, изучение формы и окатанности частиц. Взаимосвязь этих параметров с условиями среды, их переноса и накопления была подтверждена многими исследователями [31]. Установлено, что форма и размер частиц – это результат воздействия окружающей среды, но процессы транспортировки и накопления частиц, как правило, их изменяют. Окатанность – это степень сглаженности очертаний частиц при их транспортировке и переотложении. Степень окатанности показывает обстановку, дальность и длительность переноса. Осадки ледниковых отложений, например, характеризуются угловатыми очертаниями и острыми краями, а ветер шлифует частицы до идеально окатанной формы и делает их поверхность матовой. Для оценки степени окатанности зерен были разработаны классификации, где также используется понятие «заматованность» поверхности. Одна из классификаций была разработана А. Кайе [4] с доработками [21]. Они выделяют следующие классы зерен (рис. 4, а): *RM* – золотые, очень идеально окатанные, поверхность матовая; *EM/RM* – золотые, хорошо окатанные, матовые; *EL* – зерна водной среды, хорошо окатанные глянцевые; *EL/EM* – зерна водной среды, слабо окатанные; *NU* – зерна со свежими сколами и острыми ребрами и гранями, без следов химического выветривания и следов транспортировки; *C* – зерна с развитыми поверхностями расколов; *O* – поверхность зерен очень сильно затронута следа-

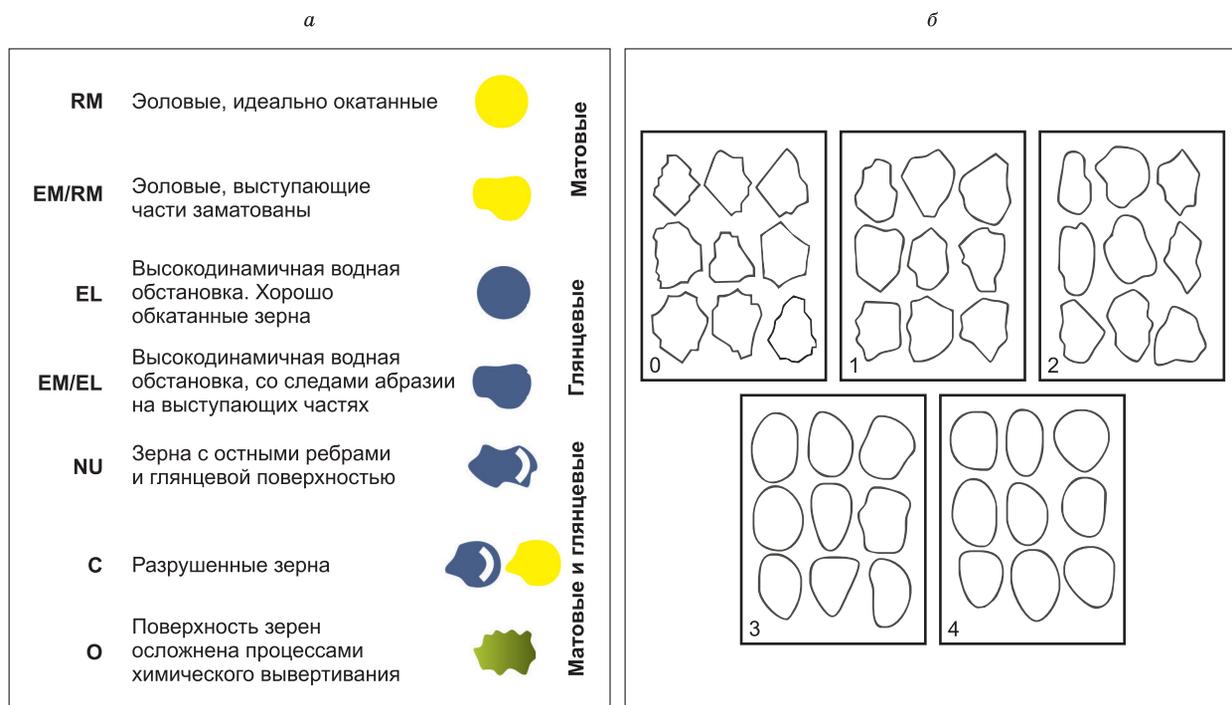


Рис. 4. Классификация зерен согласно: а – А. Кайе; б – А.В. Хабакову.

Fig. 4. Grain classification according to: а – Kaye A.; б – Khabakov A.V.

ми химического выветривания или растворения *in situ*.

В России А.В. Хабаков [12] зерна разделяет по степени окатанности, которая оценивается им по пятибалльной шкале: неокатанные обломки получают нулевой балл, прекрасно окатанные – 4 балла (рис. 4, б). Отдельно он делит зерна на глянцевые, $\frac{1}{4}$ матовые, $\frac{1}{2}$ матовые и матовые.

За более чем вековые исследования была установлена взаимосвязь характера поверхности частиц с генезисом рыхлых отложений [11, 22]. Различными исследователями был собран огромный материал по диагностическим признакам, характерным для флювиальных, золотых, морских, озерных и ледниковых отложений. Доказано, например, что при переносе в динамичном водном потоке во взвешенном состоянии частицы приобретают расчлененный рельеф со сглаженными очертаниями, глянцевую поверхность и образуются мелкоямчатый микрорельеф на выступающих частях, раковистые сколы, параллельная полосчатость, блоки расклинивания.

Описанные выше элементы часто встречаются на поверхности зерен, отобранных из отложений на различных геоморфологических уровнях в среднем течении долины р. Лена в пределах Лено-Алданского междуречья [32]. Автором

были отмечены диагностические элементы, соответствующие различным режимам водной обстановки, от динамичного водного потока до условий застойного водоема в пределах Центральной Якутии. Перемещаясь в водном потоке во взвешенном состоянии, частицы практически не контактируют между собой, и контуры их сглаживаются водным потоком. Для таких зерен характерны развитие мелкоямчатого микрорельефа на выступающих частях (рис. 5, а и б) и процессы растворения на поверхности углублений. При сальтации в более динамичном водном потоке частицы соударяются и поверхность вследствие этого осложняется блоками расклинивания (рис. 5, в), аркообразными ступенями (рис. 5, г), раковистыми сколами и V-образными микроуглублениями. В условиях застойного водоема на поверхности зерен происходит образование глинистой корочки, которая маскирует элементы, приобретенные в процессе переноса и накопления (рис. 5, д). Изменение скорости водного потока часто приводит к интенсивному размыву берегов и увеличению объема поступающего материала. Недавно освобожденные из коренных пород зерна характеризуются угловатыми очертаниями, острыми краями и гранями (рис. 5, е), ярко выраженной параллельной

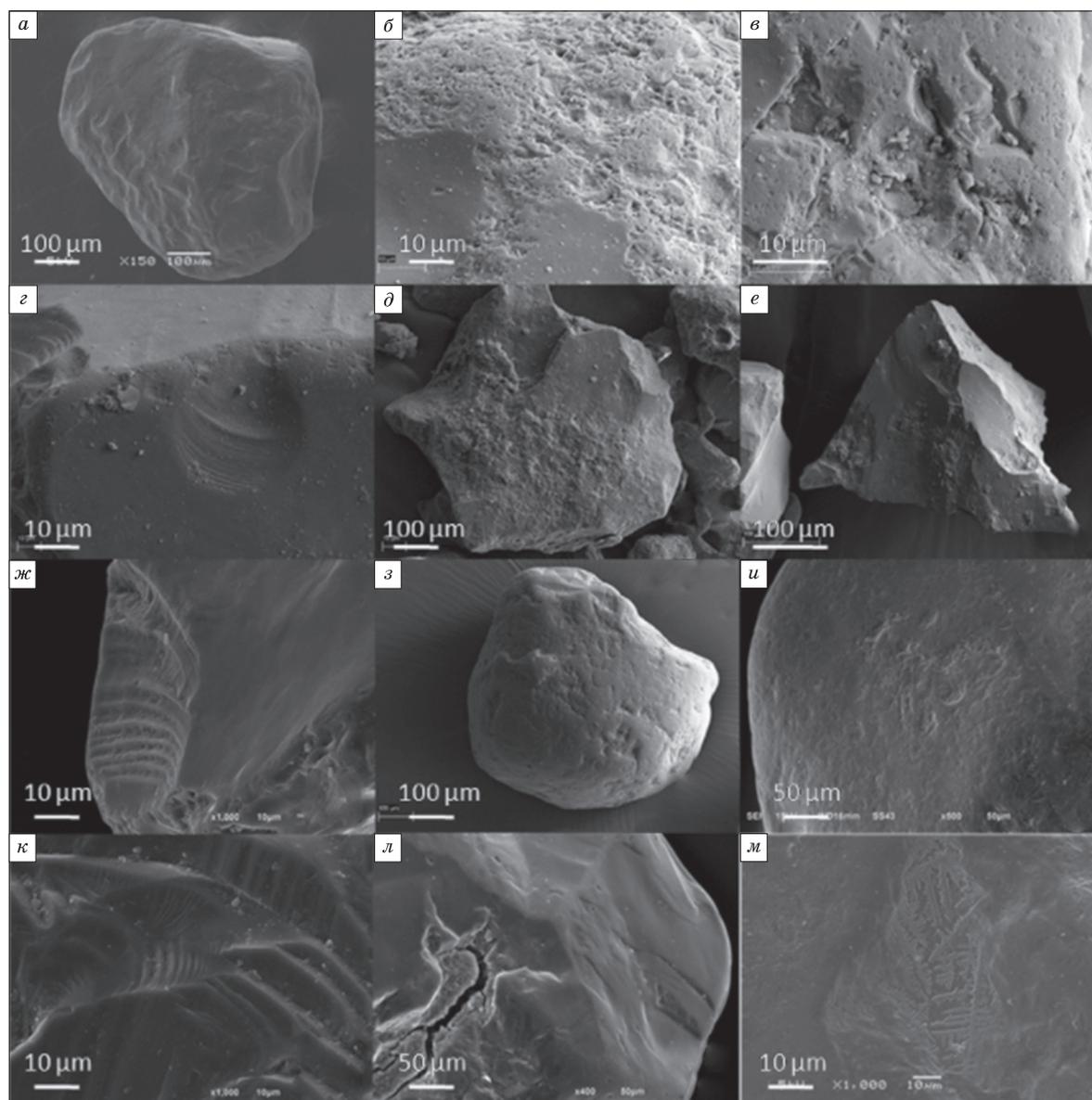


Рис. 5. Микроморфология кварцевых зерен: *а* – зерно кварца, прошедшее обработку в водной среде; *б* – мелкочапчатый микрорельеф на выступающих частях частицы, характерный для водной среды; *в* – блоки расклинивания, указывающие на перенос сальтацией в динамичном водном потоке; *г* – аркообразные ступени; *д* – кварцевое зерно с развитой на поверхности глинистой корочкой; *е* – угловатые очертания и острые ребра зерна, освобожденные из массива коренных пород; *ж* – параллельная полосчатость на поверхности скола; *з* – эоловое зерно; *и* – серпообразные трещины на поверхности, образованные в результате соударения частиц при ветровом переносе; *к* – параллельная полосчатость на плоских поверхностях расколов; *л* – трещина растворения, осложняющая поверхность скола; *м* – локализация хлоридов в коллоидном стяжении.

Fig. 5. Micromorphology of quartz grains: *a* – fluvial environment grain; *б* – mechanically formed upturned plates indicating aquatic environment; *в* – wedging blocks indicating saltation transfer in dynamic water flow; *г* – arc-shaped steps; *д* – coated quartz grain; *е* – angular outlines and sharp edges of grain released from bedrock massif; *ж* – parallel striations on grain surface; *з* – aeolian grain; *и* – crescentic gouges indicating concussion under wind transportation; *к* – parallel striations on flat cleavage face; *л* – solution-precipitation crack on cleavage face; *м* – chloride localization in colloidal contraction.

полосчатостью на поверхности сколов (рис. 5, *ж*). Подобные зерна были отмечены автором в отложениях среднего течения р. Лена и р. Вилюй [32].

В бассейне р. Вилюй, где широким распространением пользуются дюнные массивы (тукуланы), автором был детально изучен Кысыл-

Сырский криогенно-эоловый комплекс [33] и реконструирована обстановка его формирования. В составе отложений были выделены три группы зерен: 1) зерна со следами преимущественно водной обработки; 2) зерна со следами эоловой обработки; 3) исходные зерна. Первая группа представлена как окатанными, так и угловатыми зернами с различной степенью сглаженности рельефа. Отмеченные на поверхности V-образные микроуглубления, мелкие сколы, прямые и серпообразные желобки указывают на аккумуляцию отложений в динамичном водном потоке, где перенос происходил сальтацией. Зерна второй группы имеют изометричную форму и матовую поверхность (рис. 5, з).

Для зерен с эоловой обработкой характерно развитие мелкоямчатого микрорельефа, серпообразных трещин (рис. 5, и) и блюдцеобразных углублений. Для зерен, прошедших водную и эоловую обработку, набор диагностических элементов будет схожим, но для водных зерен характерна глянцевая поверхность, а зерна, прошедшие эоловую обработку имеют матовую поверхность, так как в речном потоке ветер заменяется водой. Третья группа в отличие от вышеописанных первых двух представлена угловатыми зернами с острыми краями и глянцевой поверхностью. Для них характерно развитие сколов и плоских поверхностей расколов, прямых трещин, царапин, ступеней и параллельнойполосчатости (рис. 5, к).

Все описанные выше элементы относятся к сформированному механическим путем. На поверхности остаются также следы химического воздействия среды. Широким распространением пользуются трещины растворения (рис. 5, л), которые формируются в процессе диагенеза при выщелачивании. Также могут формироваться аутигенные минералы, процесс образования которых включает в себя осаждение коллоидных и аморфных фаз. В отложениях Центральной Якутии нами была отмечена локализация хлоридов в коллоидном стяжении, присутствие которого является признаком морской обстановки (рис. 5, м) [34].

Еще одним аспектом является экспериментальное изучение изменения поверхности частиц в различных обстановках переноса. Ф. Куенен и В. Дж. Пердок в 1950–1960-х годах изучали влияние природных химических растворов и накопление отложений в специфических условиях: в пустынях, в прибрежной зоне, при промерзании и оттаивании пород [35, 36]. Эти исследо-

вания экспериментально доказали, что в водном потоке главную роль в образовании хорошо окатанных зерен с блестящей поверхностью играет химическое воздействие. В результате моделирования эоловых и пляжевых условий Д. Кринслеем и Т. Такахаши были установлены элементы поверхности, характерные для столкновения частиц в воздушном потоке, размер которых соотносится со скоростью ветра и увлажненностью [37]. Ими также было выполнено сравнение ледниковых зерен из естественной обстановки и зерен, полученных путем перетирания смеси льда и обломков чистого дробленого кварца под гидростатическим давлением, что имитировало ледниковые условия [38]. Также экспериментальные исследования показали, что следы, характерные для субаквальной среды, появляются на зернах после 50 ч пребывания в водном потоке. После 400 ч зерна приобретают основные признаки водной обработки [39]. А.А. Величко [40] было выполнено моделирование эоловой обработки песчаных зерен. Им было установлено, что после 700 ч (30 дней) обработки зерен при скорости ветра 8,6 м/с окатанность их существенно возростала.

Применение метода для отложений в условиях криолитозоны

Одно из направлений анализа – изучение влияния процесса криогенеза, прежде всего циклов промерзания-оттаивания, и исследование поверхности разрушенных зерен минералов и определение наиболее характерных деформаций [20, 24]. Цель таких исследований заключается в выделении диагностических критериев для оценки криогенного воздействия и восстановлении условий формирования криолитозоны. Изучению этого явления долгое время не уделялось должного внимания. Морфологические исследования отложений, прошедших криогенную переработку, в естественных условиях и в условиях экспериментов позволили установить диагностические признаки криогенного элювия [34].

Разрушение частиц при криогенном выветривании происходит при формировании льда в микротрещинах некриогенного происхождения, при замерзании растворов, содержащихся в полостях частицы, при изменении поверхности под воздействием сил физико-химического и химического взаимодействия поверхности с водой [41]. Эти процессы оставляют на поверхности характерные следы в виде борозд, трещин и сколов. Бо-

розды могут быть как прямые, так и ломаные, а трещины радиальные, расщепления, в виде зигзагообразных или ломаных линий. Сколы, имеющие криогенную природу образования, имеют раковистый облик, разрушают частицу на несколько частей, связаны с полостями в частице и отщепляют от частиц клинообразные фрагменты. Диагностическим признаком также служит форма частиц, которая при криогенном выветривании приобретает сложную сильнорасчлененную форму. Также при криогенном преобразовании дисперсных отложений образуются агрегаты, которые представляют собой ассоциации глинистых и тонкопесчаных частиц, не распадающиеся в воде при отсутствии химических соединений, способствующих их разрушению, или механического воздействия.

Полученные результаты основываются на субъективном визуальном анализе. Одни и те же признаки могут встречаться на поверхности зерен различных генетических групп. Поэтому важным направлением стала разработка количественной оценки степени криогенной переработки отложений [19, 20, 23]. Было установлено, что многократное промерзание-оттаивание приводит к значительному изменению состава и строения рыхлых отложений. Экспериментальные исследования показали, что в условиях резких переходов температуры через 0 °С гранулометрический состав рыхлых отложений существенно меняется. Как правило, более крупные частицы разрушаются и накапливается фракция 0,05–0,01 мм [42]. Кроме изменения гранулометрического состава при криогенном выветривании происходит перераспределение минерального состава отложений. Это связано с тем, что криогенная устойчивость кварца меньше по сравнению с полевым шпатом. Все это определяет криогенную специфику преобразования отложений в области криолитозоны. На основании этих закономерностей был предложен коэффициент криогенной контрастности (ККК), который представляет собой показатель распределения кварца и полевых шпатов по фракциям 0,05–0,01 и 0,1–0,05 мм и отражает специфическую криогенную организацию:

$$\text{ККК} = \frac{Q_1/F_1}{Q_2/F_2},$$

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 0,05–0,01 мм.

Особенность коэффициента криогенной контрастности заключается в том, что его значения не зависят от литологии, фациально-генетических факторов формирования, а определяются мерзлотно-климатическими условиями осадконакопления [43]. Была установлена зависимость интенсивности криогенной дезинтеграции от температурного режима, при котором происходили процессы промерзания-протаивания. Криолитогенные отложения имеют значения ККК больше 1. Для отложений, возникших в условиях умеренной и теплой климатических зон с незначительной ролью криогенных факторов и литогенеза, значения ККК меньше 1 [41]. Далее была выполнена корреляция значений этого коэффициента со среднегодовой температурой современных отложений деятельного слоя, что дает возможность определения палеотемпературных условий формирования криолитогенных отложений, которые прошли стадию криогипергенеза [44].

Заключение

За более чем вековую историю своего развития метод микроморфологического анализа рыхлых отложений основательно вошел в комплекс литолого-фациальных исследований и инженерно-геологических изысканий. Метод доказал свою состоятельность, а получаемые результаты имеют большое значение при реконструкции обстановки осадконакопления, оценке степени разрушения частиц при криогенезе и анализе степени изменения свойств грунтов, в строительстве и эксплуатации инженерных сооружений. К настоящему времени собран обширный материал о форме зерен и их поверхности как индикаторах среды транспортировки и накопления отложений. Была проделана большая работа по идентификации микротекстур на поверхности кварцевых частиц и зерен тяжелых минералов, выделены и классифицированы механические и химические элементы, соответствующие ледниковым, эоловым, озерным, флювиальным, моренным и морским условиям седиментации, а также криогенному преобразованию осадков. В последние годы форма и микростроение поверхности частиц изучаются для оценки влияния этих параметров на строительные свойства грунтов оснований инженерных сооружений (плотность, угол внутреннего трения, водонасыщенность, влагоемкость, строение порового пространства и т. д.) [42, 43]. Метод позволяет поновому взглянуть на процесс формирования отложений.

Литература

1. *Sorby H.C.* On the structures and origin of noncalcareous stratified rocks // *Quart. J. Geol. Soc. London.* 1880. Vol. 36. P. 46–92.
2. *Wadell H.* Volume, shape, and roundness of rock particles // *Jour. Geol.* 1932. Vol. 40. P. 443–451.
3. *Krumbein W.C.* Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles // *J. Sed. Petro.* 1941. Vol. 11. P. 64–72.
4. *Cailleux A.* Les actionnes éoliennes périglaciaires en Europe // *Mémoires de la Société Géologique de France.* 1942. Vol. 41. 176 p.
5. *Cailleux A.* Morphoskopische Analyse der Geschiebe und Sandkörner und Ihre Bedeutung für die Paläoklimatologie // *Geologische Rundau.* 1952. Bd. 40. P. 11–19.
6. *Crinsley D.H., McCoy F.* Aeolian quartz sand and silt // *Scanning Electron Microscopy in the Study of Sediments* / (Ed. by W.B. Whalley), *Geo Abstracts.* Norwich, UK, 1978. P. 249–259.
7. *Margolis S.V., Krinsley D.H.* Processes of formation and environmental occurrence of microfeatures on detrital quartz grains // *Am. J. Sci.* 1974. Vol. 274, No. 5. P. 449–464.
8. *Higgs R.* Quartz-grain surface features of Mesozoic-Cenozoic sands from the Labrador and western Greenland continental margins // *Journal of sedimentary petrology.* 1979. Vol. 49, No. 2. P. 599–610.
9. *Петтиджон Ф. Дж.* Осадочные породы: Пер. с англ. М., Недра, 1981. 751 с.
10. *Bull P.A.* Procedures in environmental reconstruction by SEM analysis // *The Scientific Study of Flint and Chert. Fourth International Flint Symposium.* Brighton, 1986. P. 221–226.
11. *Mahaney, W.C.* Atlas of sand grain surface textures and applications. Oxford: Oxford University Press, 2002. 237 p.
12. *Хабаков А.В.* Об индексах окатанности галечников // *Советская геология.* 1946. № 10. С. 98–99.
13. *Батурин В.П.* Петрографический анализ геологического прошлого по терригенным компонентам. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1947.
14. *Чичагов В.П.* К методике изучения поверхности песчаных зерен и ее значение для определения генезиса четвертичных отложений // *Материалы по генезису и литологии четвертичных отложений (К V Конгрессу ИНКВА).* Минск: Изд. АН БССР. 1961. С. 249–262.
15. *Рухин Л.Б.* Основы общей палеогеографии. Л.: Гостехиздат, 1962.
16. *Рухина Е.В.* Литология ледниковых отложений. Л., 1973. 76 с.
17. *Артемова Н.Л.* Микроморфология лессовидных образований области вечной мерзлоты как показатель их генезиса: Дис ... канд. геогр. наук. М., 1988. 195 с.
18. *Тимирева С.Н.* Динамика экзогенных процессов в ледниковых и перигляциальных зонах среднего и позднего плейстоцена центра Русской равнины (на основе анализа морфоскопии и морфометрии песчаных кварцевых зерен): Дис ... канд. геогр. наук. М.: ИГ АН, 1989.
19. *Konishchev V.N., Rogov V.V.* Cryogenic processes in loess. Geography, environment, sustainability. 2017. Vol. 10(2). P. 4–14. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2017-10-2-4-14>
20. *Рогов В.В.* Особенности морфологии частиц криогенного элювия // *Криосфера Земли.* 2000. Т. 4, № 3. С. 67–73.
21. *Mycielska-Dowgiallo E., Woronko B.* Analiza obtoczenia i zmatowienia powierzchni ziarn kwarcowych frakcji piaszczystej i jej wartość interpretacyjna // *Przegląd Geologiczny.* 1998. Vol. 46. P. 1275–1281.
22. *Krinsley D.H., Doornkamp J.C.* Atlas of quartz sand surface textures. Cambridge: University Press, 1973. 92 p.
23. *Конищев В.Н., Рогов В.В.* Микростроение грунтов, испытывавших многократное замораживание и оттаивание // *Проблемы криолитологии.* Вып. 2. М.: Изд-во МГУ, 1972. С. 90–94.
24. *Конищев В.Н.* Некоторые общие закономерности преобразования состава дисперсных пород криогенными процессами // *Проблемы криолитологии.* Вып. VI. М.: Изд-во МГУ, 1977.
25. *Russel R.D., Taylor R.E.* Roundness and shape of Mississippi River sand // *Jour. Geology,* 1937. Vol. 45. P. 225–267.
26. *Kuenen Ph.H.* Experimental abrasion. 4. Eolian action // *J. Geol.* 1960. Vol. 68. P. 427–449.
27. *Kuenen Ph.H., Perdok W.G.* Experimental abrasion 5. Frosting and defrosting of quartz grains // *Journal of Geology.* 1962. Vol. 70. P. 648–658. <https://doi.org/10.1086/62686>
28. *Krinsley D., Takahashi T.* Surface textures of sand grains: an application of electron microscopy // *Science.* 1962. Vol. 135, No. 3507. P. 923–925.
29. *Krinsley D., Takahashi T.* Surface textures of sand grains – an application of electron microscopy: glaciation // *Science.* 1962. Vol. 138, No. 3546. P. 1262–1264.
30. *Georgiev V.M., Khrishev K.* Experimental modeling of subaqueous mechanical abrasion of eolian quartz grains // *27th IGG Moscow,* 1984. Vol. 2, P. 61–62.
31. *Величко А.А., Грибченко Ю.Н., Тимирева С.Н.* Моделирование эоловой обработки песчаных зерен // *Литология и полезные ископаемые.* 1997. № 4. С. 431–439.
32. *Шмелев Д.Г.* Криогенез рыхлых отложений полярных областей Земли: Дис ... канд. геогр. наук. М., 2015. 155 с.
33. *Folk R.L.* Petrology of sedimentary rocks: Austin, Texas, Hemphill's Book Store, 1968. 170 p
34. *Фазлиахметов А.М., Стаценко Е.О., Храменков Э.М.* О применении рентгеновской компьютер-

ной томографии при изучении песчаников // Геологический сборник № 11. Информационные материалы. 2014. С. 92–96.

35. Курчатова А.Н., Рогов В.В. Новые методы и подходы к изучению гранулометрического и морфологического состава криогенных грунтов // Инженерные изыскания. 2014. Вып. 5-6. С. 58–63.

36. Wenbo Zheng, Xinli Hu, Tannant D.D. Shape Characterization of Fragmented Sand Grains via X-Ray Computed Tomography Imaging // International Journal of Geomechanics. 2020. Vol. 20, Iss. 3. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001599

37. Романенко К.А., Абросимов К.Н., Курчатова А.Н., Рогов В.В. Опыт применения рентгеновской компьютерной томографии в исследовании микростроения мерзлых пород и почв // Криосфера Земли. 2017. Т. 21, № 4. С. 75–81. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-4(75-81)

38. Romanenko K.A., Abrosimov K.N., Kurchatova A.N., Rogov V.V. The experience of applying X-ray computer tomography to the study of microstructure of frozen ground and soils // Kriosfera Zemli. 2017. Vol. XXI, No. 4. P. 63–68. DOI: 10.21782/EC2541-9994-2017-4(63-68)

39. Кунафин А.Д., Балыкова С.Д., Чернов М.С., Кузнецов Р.А. Особенности морфологии песчаных зерен и ее влияние на свойства аллювиальных песчаных пород горных рек // Материалы второй Общероссийской научно-практической конференции молодых специалистов. М., 2018. С. 21–27.

40. Cho G.C., Dodds J., Santamarina J.C. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: Natural and crushed sands. // J. Geotech. Geoenviron. 2006. Vol. 132 (5). P. 591–602. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:5\(591\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:5(591))

Поступила в редакцию 17.03.2021

Принята к публикации 24.06.2021

Об авторах

КУТЬ Анна Алексеевна, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677007, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, <http://orcid.org/0000-0001-7970-9124>, Researcher ID: E-2780-2018, ann.urban@mail.ru;

МЕЛЬНИКОВ Андрей Евгеньевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677007, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-7910-9441>, Researcher ID: O-4081-2017, Scopus ID: 57208581176, melnikowdron@mail.ru.

Информация для цитирования

Куть А.А., Мельников А.Е. Метод микроморфологического анализа рыхлых отложений и его применение для реконструкции палеогеографической обстановки в криолитозоне // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 3. С. 64–74. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-64-74>

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-64-74

The method of micromorphological analysis of loose sediments and its application for the reconstruction of paleogeographic settings in the cryolithozone

A.A. Kut*, A.E. Melnikov

Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia

*ann.urban@mail.ru

Abstract. The data on the history of the morphological analysis of loose materials are presented. The existing procedures of sediment diagnostics are described, the major problems related to their application and correlation of the results are considered. The modern status of micromorphological analysis in the set

of lithological-facial investigations is analyzed. The development of the method was promoted by the technological advancement in the 20th century. The application of electron microscopy has brought the method under consideration to a brand new level. The method was originally developed to recover the settings of transport and accumulation of Quaternary sediments outside the boundaries of the cryolithozone. However, since the 1970-s, investigation of grain surfaces started to be applied to study the features of cryogenesis manifestations in sedimentary deposits. At the modern stage, up-to-date methods to study particle surface with the help of computer tomography are under introduction. This broadens the area of the application of micromorphological analysis of loose sediments for various purposes. A set of diagnostic elements allocated as a result of the application of this method for the Kyzyl-Syr dune area in the basin of the Vilyuy river and for the section of the Abalakh surface in the middle reach of the Lena river is presented.

Keywords: micromorphological analysis, historical survey, establishment of the method, sedimentation environment, cryogenesis.

Acknowledgements. *The research was carried out with support from the Russian Foundation for Basic Research (Project number 20-55-53006 «Cryogenesis of ground massifs of Southern Yakutia, Russia, and North-Eastern China: mechanism and specificity»).*

References

1. Sorby H.C. On the structures and origin of noncalcareous stratified rocks // *Quart. J. Geol. Soc. London*, 1880. Vol. 36. P. 46–92.
2. Wadell H. Volume, shape, and roundness of rock particles // *Jour. Geol.* 1932. Vol. 40. P. 443–451.
3. Krumbein W.C. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles // *J. Sed. PetroI.* 1941. Vol. 11. P. 64–72.
4. Cailleux A. Les actionnes éoliennes périglaciaires en Europe // *Mémoires de la Société Géologique de France*. 1942. Vol. 41. 176 p.
5. Cailleux A. Morphoskopische Analyse der Geschiebe und Sandkörner und Ihre Bedeutung für die Paläoklimatologie // *Geologische Rundau.* 1952. Bd. 40. P. 11–19.
6. Crinsley D.H., McCoy F. Aeolian quartz sand and silt // *Scanning Electron Microscopy in the Study of Sediments* / (Ed. by W.B. Whalley), *Geo Abstracts*. Norwich, UK, 1978. P. 249–259.
7. Margolis S.V., Krinsley D.H. Processes of formation and environmental occurrence of microfeatures on detrital quartz grains // *Am. J. Sci.* 1974. Vol. 274, No. 5. P. 449–464.
8. Higgs R. Quartz-grain surface features of Mesozoic-Cenozoic sands from the Labrador and western Greenland continental margins // *Journal of sedimentary petrology*. 1979. Vol. 49, No. 2. P. 599–610.
9. Pettyjohn F.G. Osadochnyie porody/ *Per. s angl.* M.: Nedra, 1981. 751 p.
10. Bull P.A. Procedures in environmental reconstruction by SEM analysis // *The Scientific Study of Flint and Chert. Fourth International Flint Symposium*. Brighton, 1986. P. 221–226.
11. Mahaney W.C. Atlas of sand grain surface textures and applications. Oxford: Oxford University Press, 2002. 237 p.
12. Khabakov A.V. Ob indeksah okatannosti galechnikov // *Sovetskaya geologiya*. 1946. No. 10. P. 98–99.
13. Baturin V.P. Petrographicheskiy analiz geologicheskogo proshlogo po terrigenym komponentam. M.; L.: Izd-vo AN SSSR, 1947.
14. Chichagov V.P. K metodike izucheniya poverhnosti peschanyh zeren I ee znachenie dlya opredeleniya genezisa chetvertichnyh otlogheniy // *Materialy po genezisu I litologii chetvertichnyh otlogheniy* (K V Kongressu INQUA). Minsk: Izd-vo AN BSSR. 1961. P. 249–263.
15. Rukhin L.B. Osnovy obshey paleogeographii. L.: Gostoptekhizdat, 1962.
16. Rukhina E.V. Lithologiya lednikovyh otlogheniy. L., 1973. 76 p.
17. Artemova N.L. Micrimorphologiya lessovidnyh obrazovaniy oblasti vechnoy merzloty kak pokazatel ih genezisa: Dis ... kand. geogr. nauk. M., 1988. 195 p.
18. Timireva S.N. Dinamika ekzogennyh processov v lednikovyh i periglacialnyh zonah srednego i posdnego pleistocena centra Russkoi ravniny (na osnove analiza morphoskopii i morphometrii peschanyh I kvarcevyh zeren): Dis ... kand. geogr. nauk. M.: IG RAN, 1989.
19. Konishchev V.N., Rogov V.V. Cryogenic processes in loess. Geography, environment, sustainability. 2017. Vol. 10(2). P. 4–14. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2017-10-2-4-14>
20. Rogov V.V. Osobennosti morphologii chastic kriogennogo eluvia // *Kriosfera Zemli*. 2000, Vol. 4, No. 3. P. 67–73.
21. Mycielska-Dowgiatto E., Woronko B. Analiza obtoczenia i zmatowienia powierzchni ziarn kwarcowych frakcji piaszczystej i jej wartosc interpretacyjna // *Przegląd Geologiczny* 1998. Vol. 46. P. 1275–1281.
22. Krinsley D.H., Doornkamp J.C. Atlas of quartz sand surface textures. Cambridge: University Press, 1973. 92 p.
23. Konishev V.N., Rogov V.V. Microstroenie gruntov, ispytavshih mnogokratnoe zamoragivanie I ottaivanie // *Problemy kriolitologii*. Vyp. 2. M.: Izd-vo MGU, 1972. P. 90–94.
24. Konishev V.N. Nekotorye obshie zakonomernosti preobrazovaniya sostava dispersnyh porod kriogennymi

processami // Problemy kriolitologii. Vyp. VI. M. Izd-vo MGU, 1977.

25. *Russel R.D., Taylor R.E.* Roundness and shape of Mississippi River sand // *Jour. Geology*, 1937. Vol. 45. P. 225–267.

26. *Kuenen Ph.H.* Experimental abrasion. 4. Eolian action // *J. Geol.* 1960. Vol. 68. P. 427–449.

27. *Kuenen Ph.H., Perdok W.G.* Experimental abrasion 5. Frosting and defrosting of quartz grains // *Journal of Geology*. 1962. Vol. 70. P. 648–658. <https://doi.org/10.1086/62686>

28. *Krinsley D., Takahashi T.* Surface textures of sand grains: an application of electron microscopy // *Science*. 1962. Vol. 135, No. 3507. P. 923–925.

29. *Krinsley D., Takahashi T.* Surface textures of sand grains – an application of electron microscopy: glaciation // *Science*. 1962. Vol. 138, No. 3546. P. 1262–1264.

30. *Georgiev V.M., Khrishev K.* Experimental modeling of subaqueous mechanical abrasion of eolian quartz grains // 27th IGG Moscow, 1984. Vol. 2, P. 61–62.

31. *Velichko A.A., Gribchenko Yu.N., Timireva S.N.* Modelirovanie eolovoy obrabotki peschanyh zeren // *Litologiya i poleznyy iskopaemye*. 1997. No. 4. P. 431–439.

32. *Shmelev D.G.* Kriogenez ryhlyh otlogeny pol'yarnykh oblastey Zemli: Dis ... kand. geogr. nauk. M., 2015. 155 p.

33. *Folk R.L.* Petrology of sedimentary rocks: Austin, Texas, Hemphill's Book Store, 1968. 170 p

34. *Fazliahmetov A.M., Stacenko E.O., Hramchenko E.M.* O primeneni rentgenovskoy komputernoy tomografii pri izuchenii peschanikov // *Geologicheskyy sbornik* No. 11. Informacionnye materialy. 2014. P. 92–96.

35. *Kurchatova A.N., Rogov V.V.* Novie metody i podhody k izucheniu granulometricheskogo i morfologicheskogo sostava kriogenykh gruntov // *Ingenierne izyskaniya*. 2014. Vyp. 5-6. P. 58–63.

36. *Wenbo Zheng, Xinli Hu, Tannant D.D.* Shape Characterization of Fragmented Sand Grains via X-Ray Computed Tomography Imaging // *International Journal of Geomechanics*. 2020. Vol. 20. Iss. 3. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001599

37. *Romanenko K.A., Abrosimov K.N., Kurchatova A.N., Rogov V.V.* Opyt primeniya rentgenovskoy komputernoy tomografii v issledovanii mikristroeniya merzlykh porod I pochv // *Kriosfera Zemli*. 2017. Vol. 21, No. 4. P. 75–81. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-4(75-81)

38. *Romanenko K.A., Abrosimov K.N., Kurchatova A.N., Rogov V.V.* The experience of applying X-ray computer tomography to the study of microstructure of frozen ground and soils // *Kriosfera Zemli*. 2017. Vol. XXI, No. 4. P. 63–68. DOI: 10.21782/EC2541-9994-2017-4(63-68)

39. *Kunafin A.D., Balykova S.D., Chernov M.S., Kuznetsov R.A.* Osobennosti morfologii peschanyh zeren i ee vliyanie na svoystva alluvialnykh peschanyh porod gornykh rek // *Materialy vtoroy Obcherossiyskoy nauchno-practicheskoy konferencii molodykh specialistov*. M., 2018. P. 21–27.

40. *Cho G.C., Dodds J., Santamarina J.C.* Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: Natural and crushed sands. // *J. Geotech. Geoenviron.* 2006. Vol. 132 (5). P. 591–602. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:5\(591\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:5(591))

About the authors

KUT', Anna Alekseevna, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Researcher, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia, <http://orcid.org/0000-0001-7970-9124>, Researcher ID: E-2780-2018, ann.urban@mail.ru;

MELNIKOV, Andrey Evgen'evich, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-7910-9441>, Researcher ID: O-4081-2017, Scopus ID: 57208581176, melnikowdron@mail.ru.

Citation

Kut' A.A., Melnikov A.E. The method of micromorphological analysis of loose sediments and its application for the reconstruction of paleogeographic settings in the cryolithozone // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2021, Vol. 26, No. 3. pp. 64–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-64-74>