

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ ГЛИН И ГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛОВ



Фото Е. Shortis, 2018

КОРОЛЕВ В.А.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г Москва, Россия, va-korolev@bk.ru
Адрес: Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119991, Россия

Оригинальная статья

Поступила в редакцию 21.12.2018 / Принята к публикации 12.03.2019 / Дата публикации 29.03.2019

© ООО «Геомаркетинг», 2019

Аннотация

В статье рассмотрена экологическая роль, которую выполняют глины и глинистые минералы в экосистемах и биосфере в целом. Проанализировано значение глин и глинистых минералов в происхождении жизни на Земле и формировании РНК, обусловленное периодичностью микроструктуры этих минералов, их физико-химической активностью и сорбционной способностью по отношению к аминокислотам, нуклеотидам, белкам и РНК. Рассмотрены процессы взаимодействия глинистых минералов с органическим веществом, в том числе — в условиях гидротерм, обладающих специфическими особенностями, способствующими зарождению жизни. Кроме того, проанализированы экологические функции литосферы, обусловленные глинами и глинистыми минералами. Показано, что глины и глинистые минералы выполняют важнейшую экологическую ресурсную функцию, являясь ценным минеральным ресурсом и полезным ископаемым, участвуя в обеспечении биоты (включая человека) различными минеральными и энергетическими ресурсами полезных ископаемых, в обеспечении ресурсами биофильного ряда, в обеспечении возобновляемых ресурсов (воды, нефти и газа), в обеспечении ресурсов геологического пространства и др. Также глины выполняют важную экологическую геохимическую функцию, которая заключается в их участии в геохимических процессах литосферы и формировании специфических геохимических барьеров, выполняющих защитные экологические функции на пути миграции различных загрязнений. Экологическая геодинамическая функция глин заключается в их влиянии на развитие эндогенных и экзогенных геологических процессов, воздействующих на состояние и функционирование экосистем. Наконец, участие глин в обеспечении геофизической экологической функции литосферы заключается в их влиянии на формирование как природных, так и техногенных геофизических полей в эколого-геологических системах. Таким образом, глины и глинистые минералы оказывают огромное влияние на эколого-геологические системы, они участвуют в формировании всех важнейших экологических функций литосферы: ресурсной, геохимической, геодинамической и геофизической. Среди них наиболее значительна роль глин и глинистых минералов в обеспечении ресурсной экологической функции литосферы.

Ключевые слова:

глины; глинистые минералы; РНК; ДНК; происхождение жизни; эволюция жизни; экология; экологические функции литосферы; минеральные и возобновляемые ресурсы; эколого-геологическая система

Ссылка для цитирования:

Королев В.А., 2019. Экологическая роль глин и глинистых минералов. Инженерная геология, Том XIV, № 1, с. 60–71, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2019-14-1-60-71>

THE ECOLOGICAL ROLE OF CLAYS AND CLAY MINERALS

VLADIMIR A. KOROLEV

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, va-korolev@bk.ru

Address: Bld. 1, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia

Original paper

Received 21 December 2018 / Accepted 12 March 2019 / Published 29 March 2019

© "Geomarketing" LLC, 2019

Abstract

The article considers the ecological role played by clays and clay minerals in the ecosystem and the biosphere as a whole. The value of clays and clay minerals in the origin of life on Earth and the formation of RNA are analyzed, due to the periodicity of the microstructure of these minerals, their physicochemical activity and sorption capacity with respect to amino acids, nucleotides, proteins and RNA. The processes of interaction of clay minerals with organic matter are considered, including under conditions of hydrothermal conditions, which have specific features that contribute to the origin of life. In addition, the ecological functions of the lithosphere due to clays and clay minerals were analyzed. It is shown that clays and clay minerals perform the most important ecological resource function, being a valuable mineral resource and mineral, participating in providing biota (including humans) with various mineral and energy resources of minerals, in providing biophilic resources, in providing renewable resources (water, oil and gas), in providing resources of the geological space, etc. Also, the clays perform an important ecological geochemical function, which consists in their participation in the geochemistry processes of the lithosphere and the formation of specific geochemical barriers that perform protective ecological functions on the migration routes of various contaminants. The ecological geodynamic function of clays consists in their influence on the development of endogenous and exogenous geological processes affecting the state and functioning of ecosystems. Finally, the participation of clays in ensuring the geophysical ecological function of the lithosphere consists in their influence on the formation of both natural and man-made geophysical fields in ecological-geological systems. Thus, clays and clay minerals have a great influence on ecological and geological systems, they are involved in the formation of all the most important ecological functions of the lithosphere: resource, geochemical, geodynamic and geophysical. Among them, the most significant is the role of clays and clay minerals in ensuring the resource ecological function of the lithosphere.

Key words:

clays; clay minerals; RNA; DNA; the origin of life; the evolution of life; ecology; ecological functions of the lithosphere; mineral and renewable resources; ecological-geological system

For citation:

Korolev V.A., 2019. The ecological role of clays and clay minerals. Engineering Geology World, Vol. XIV, No. 1, pp. 60–71, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2019-14-1-60-71>

«...и начал творение человека из глины...»
Коран, сура 32. Поклон, 6(7)

Введение

Глины и глинистые минералы являются не только важным компонентом литосферы, но и главнейшей составляющей экосистем и биосферы в целом, фактором, не только формирующим эколого-геологические условия, в которых образуются и развиваются экосистемы, но и возможным ведущим механизмом возникновения и эволюции жизни на Земле.

В последнее время появляется все больше работ, в которых подтверждается ведущая роль глинистых минералов в образовании молекулярных комплексов РНК¹ — компоненте, содержащемся в клетках всех организмов, живущих на Земле и влияющем на функции генов. Появилась теория «мира РНК», согласно которой самокопирующиеся рибо-

зимы (катализирующие синтез РНК на матрице РНК) стали первыми, очень простыми живыми системами [5]. Они начали дарвиновскую эволюцию задолго до появления клеток и со временем, по мере усложнения, вероятно, передали каталитические функции белкам, а длительное хранение наследственной информации — ДНК². В дальнейшем были получены искусственно сотни рибозимов. Выяснилось, что рибозимом является и ключевой каталитический центр рибосомы, организующий синтез белка.

Однако экологическая роль глин и глинистых минералов гораздо шире. В статье рассматривается также участие и роль глин и глинистых минералов в выполнении ими важнейших экологических функций: ресурсной, геохимической, геодинамической и геофизической [7–9].

¹ РНК — сокращенное название рибонуклеиновой кислоты, молекулы которой наряду с ДНК и белками являются основной составляющей в строении клеток и выполняют функции кодирования, считывания информации и регулирования генов. Состоят (как и ДНК) из длинных цепей — нуклеотидов, содержащих сахар рибозы, азотистые основания и фосфатную группу, последовательность которых позволяют РНК кодировать генетическую информацию.

² ДНК — сокращенное название дезоксирибонуклеиновой кислоты, молекулы которой (как и РНК) обеспечивают хранение и передачу от поколения к поколению, а также реализацию генетической информации — программы развития всех живых организмов на Земле. ДНК контролируют информацию о строении РНК и белков в клетках организмов.

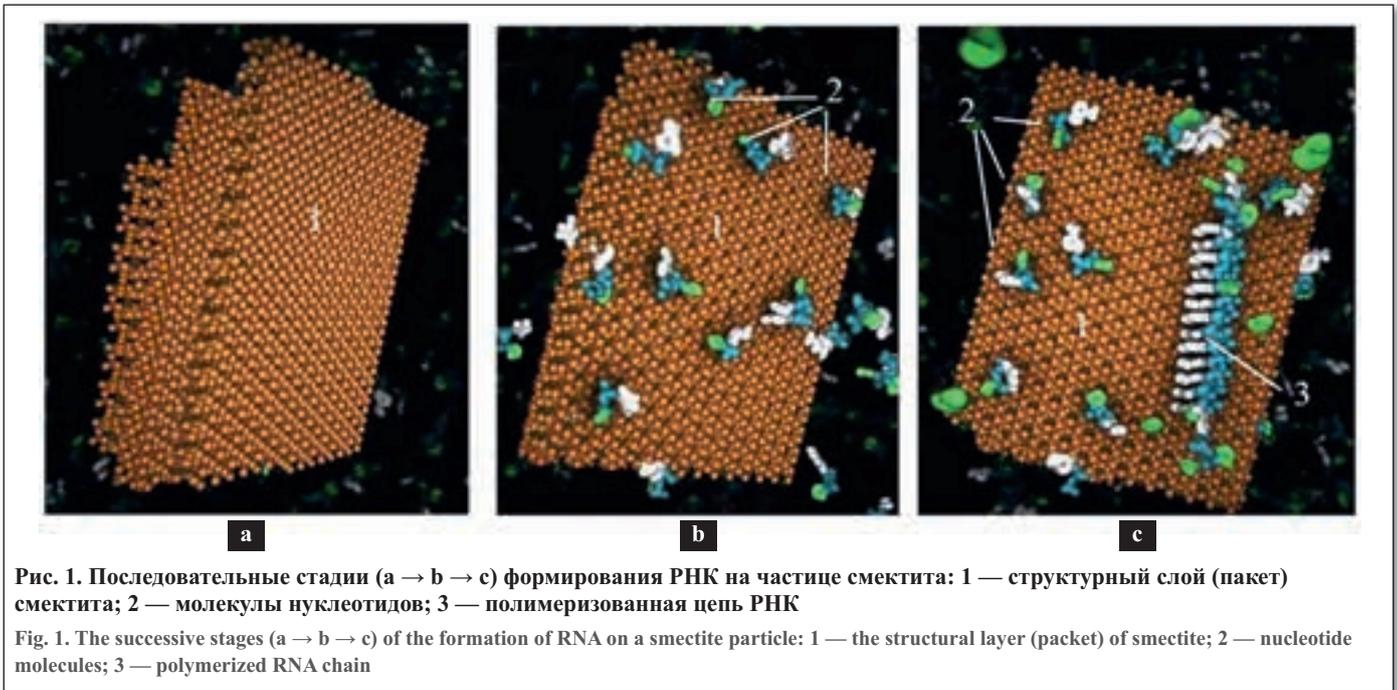


Рис. 1. Последовательные стадии (а → б → с) формирования РНК на частице смектита: 1 — структурный слой (пакет) смектита; 2 — молекулы нуклеотидов; 3 — полимеризованная цепь РНК

Fig. 1. The successive stages (a → b → c) of the formation of RNA on a smectite particle: 1 — the structural layer (packet) of smectite; 2 — nucleotide molecules; 3 — polymerized RNA chain

Роль глинистых минералов в происхождении жизни

А. Грэм Кэрнс-Смит, по-видимому, одним из первых сформулировал гипотезу о происхождении жизни под действием глинистых минералов [15]. Он основывался на концепции, согласно которой первоначальная структура подложки (или матрица), которая обеспечивала бы передачу информации, могла быть неорганическим веществом глинистого типа, а не органическим соединением.

Хорошо известно, что микроструктура высокодисперсных глин (прежде всего групп смектита и иллита) обладает явной периодичностью и представляет собой, по сути, периодическую коллоидную структуру. Она и может служить матрицей для простых молекул органических веществ, которые, попадая в ячейки этой структуры, сами становились периодическими, что и позволяло им затем выстраиваться в структуры аминокислот и нуклеотид, формирующих РНК, ДНК и белки (рис. 1).

Не вдаваясь в подробности функционального значения РНК у различных организмов, отметим, что особого внимания заслуживают вопросы взаимодействия РНК и «неживого» или литогенного субстрата, в качестве которого могут выступать глинистые минералы, как особые геологические образования. За последние десятилетия было получено много новой информации, свидетельствующей о том, что самые примитивные и ранние формы жизни на Земле могли возникнуть под влиянием РНК. Лабораторные эксперименты предполагают, что РНК могла бы реплицироваться сама и выполнять другие функции, необходимые для поддержания жизни примитивной клетки [22].

Впоследствии новая информация в области биохимии только подтверждала эту гипотезу. Было установлено, что РНК образуются в результате процессов синтеза на матрице ДНК с участием специализированных ферментов — РНК-полимераз. Этот процесс называется транскрипцией. Кроме того, молекулы РНК, например, у вирусов — самой многочисленной биологической формы на Земле — играют такую же роль как ДНК у высших организмов: они воспроизводятся только внутри живых клеток

и поражают все типы организмов, известных на Земле от бактерий и архей до грибов, растений и животных.

Важно отметить, что азотистые основания в структуре РНК могут формировать водородные связи между различными составляющими, с помощью которых они могут взаимодействовать с активными центрами поверхности глинистых минералов. Другой важной структурной особенностью молекулы РНК является наличие так называемой «гидроксильной группы в 2' положении» рибозы [19], что также позволяет ей взаимодействовать с глинистым минералом. Разные типы РНК способны оказывать каталитическое действие на различные химические реакции. Такие каталитические молекулы РНК называются рибозимами.

В модели «первичной пиццы», изложенной в работе [20], предполагается, что жизнь зарождалась в виде тонкого слоя органических молекул на поверхности глины (например, каолинита или смектита), частицы которой состоят из тонких аллосиликатных слоев. Некоторые глинистые минералы (смектиты: монтмориллонит, сапонит и др.) обладают внутрикристаллическим набуханием, потому что молекулы воды, как и другие катионы и анионы, внедряются между этими слоями, увеличивая расстояния между ними и создавая «расклинивающее давление». В эти межслоевые промежутки также могут внедряться РНК.

Эксперименты показали, что глинистые минералы хорошо сорбируют и довольно прочно связывают аминокислоты, нуклеотиды, белки, РНК и другие биологические молекулы [16, 18]. На базальной поверхности кристаллов глины и между ее слоями они накапливаются в высокой концентрации даже из очень разбавленного раствора. Адсорбирующие свойства глины широко используются как в разных видах промышленности, так и в быту. На глине нуклеотиды самопроизвольно выстраиваются именно так, как нужно для их «сшивания» в цепочку РНК (см. рис. 1, с). Длинные молекулы РНК очень редко отделяются от глины полностью, но могут медленно перемещаться по ее поверхности, открепляясь то одним, то другим концом. Математическое моделирование взаимодействия разных РНК на плоской минеральной поверхности глин показало [21], что в таких условиях легко образуются группы разных молекул,

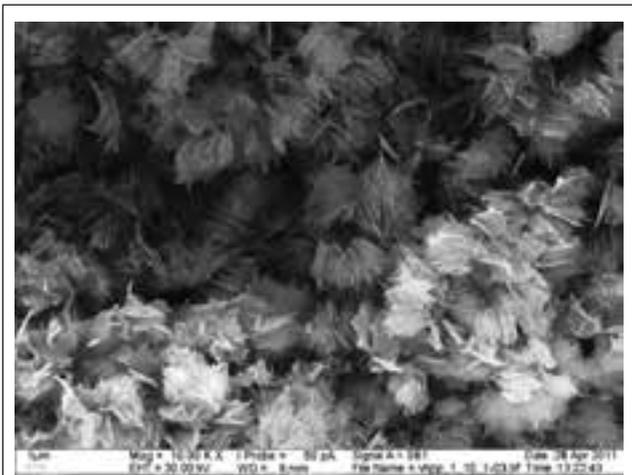


Рис. 2. Доменоподобная микротекстура гидротермальной каолиновой глины, Камчатка [11]

Fig. 2. Domain-like microtexture of hydrothermal kaolin clay, Kamchatka [11]

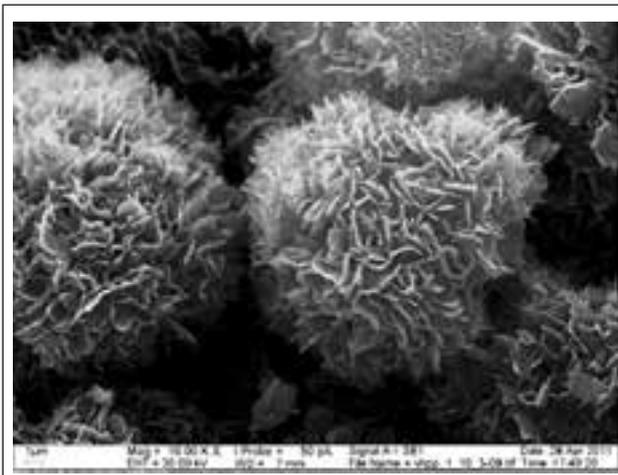


Рис. 3. Псевдоглобулярная микротекстура, образованная гидротермальными псевдоморфозами железистого смектита по обломкам вулканического стекла, Камчатка [11]

Fig. 3. Pseudoglobular microtexture formed by hydrothermal pseudomorphs of ferrous smectite on fragments of volcanic glass, Kamchatka [11]

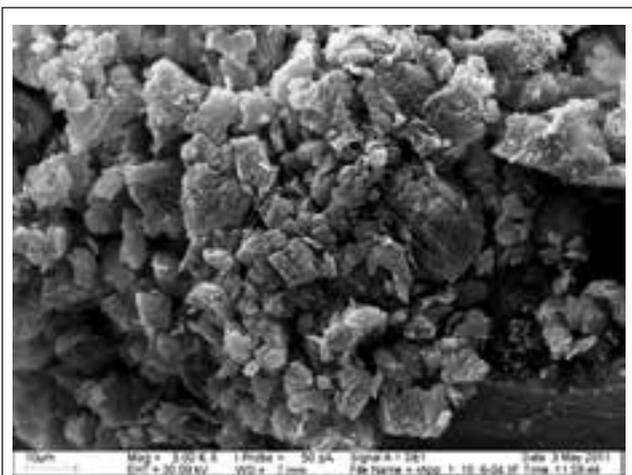


Рис. 4. Матричная микротекстура, образованная частицами гидротермального смектита, Камчатка [11]

Fig. 4. Matrix microtexture formed by hydrothermal smectite particles, Kamchatka [11]

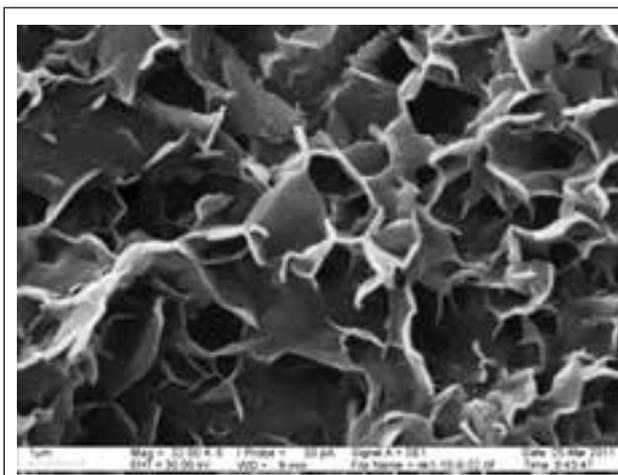


Рис. 5. Губчатая периодическая микротекстура гидротермальных глин Нижне-Кошелевской термоаномалии (Камчатка), сложенная смектитами [13]

Fig. 5. Spongy periodic microtexture of hydrothermal clays of the Nizhne-Koshelevo thermoanomaly (Kamchatka), folded by smectites [13]

связанных взаимной помощью, а размножение паразитов ограничено и не приводит к вымиранию кооперирующихся РНК. Так что хотя четких границ на минеральной поверхности нет, она достаточно ограничивает подвижность РНК и нуклеотидов, чтобы между ними могли появиться тесные группы взаимопомощи [5].

Еще один вклад минеральной подложки в возникновение жизни состоит в том, что она может работать катализатором, т.е. ускорять химические реакции. Эта функция выходит на первый план в тех вариантах модели «первичной пищи», в которых в качестве минеральной основы предлагается не глина, а сульфидные минералы — пирит (FeS_2), сфалерит (ZnS), алабандин (MnS) [5].

Важно также отметить, что взаимодействие глинистых минералов и органических компонентов клеток двояко: этот механизм носит взаимопроникающий характер. Так, например, установлено, что глинистые минералы способны катализировать возникновение сложных органических молекул — будущих элементов протоклеток, — ко-

торые, в свою очередь, стимулируют формирование новых минералов. Многие ученые считают, что оптимальные условия для взаимодействия смектитов с органическими веществами, в результате которого формируются аминокислоты и нуклеотиды — «строительный материал» клеток, существуют в гидротермах, как, например, в современных гидротермах Камчатки, где образуются гидротермальным путем различные глинистые минералы: каолиниты, смектиты и иллиты (рис. 2–5).

Наряду с этим глины и глинистые минералы участвуют в обеспечении важнейших экологических функций литосферы: ресурсной, геохимической, геодинамической и геофизической. Рассмотрим их особенности.

Экологическая ресурсная функция глин

Глины и глинистые минералы выполняют важнейшую экологическую ресурсную функцию, участвуя в обеспечении биоты (включая человека) минеральными и энергетическими ресурсами полезных ископаемых, в

Глины и глинистые минералы как полезные ископаемые Clays and clay minerals as natural resources		
Промышленность	Характеристика	Используемые глины и минералы
Металлургическая	Огнеупорные кирпичи, шамот, футеровочные массы	Огнеупорные глины: каолиновые, иллитовые
Строительных материалов	Строительный кирпич, керамзит	Легкоплавкие глины и суглинки: смектитовые, иллитовые, полиминеральные
	Строительная керамика	То же
Нефтяная	Очистка жидких углеводородов	Смектиты, иллиты, палыгорскит
	Буровые раствора	Смектиты, иллиты
Химическая	Резиновая отрасль	Каолиновые глины, каолинит, вермикулит
Легкая	Фарфорово-фаянсовая отрасль, керамика	Каолиновые глины, каолинит
	Производство красок	Железистые, охристые и др. глины, вермикулит, палыгорскит
Пищевая	Сорбенты	Смектиты, иллиты, каолиниты
Медицина, косметология	Сорбенты и лекарства	Смектиты, иллиты, каолиниты, палыгорскит
Сельское хозяйство	Пищевые добавки животным, субстраты	Смектиты, каолиниты, вермикулит
Машиностроение	Техническая керамика, теплоизоляционные изделия	Огнеупорные глины: каолиновые, иллитовые, вермикулит, палыгорскит
Целлюлозно-бумажная	Производство бумаги и картона	Каолиновые глины, каолинит
Атомная	Защитные материалы	Вермикулит

обеспечении ресурсами биофильного ряда, в обеспечении возобновляемых ресурсов, в обеспечении ресурсов геологического пространства [7–9]. Ниже приводятся подробные характеристики этих функций.

Роль глин в обеспечении минеральными ресурсами полезных ископаемых заключается в том, что различные глины и глинистые минералы являются сами по себе ценным полезным ископаемым, важнейшим для многих видов промышленности (табл.). Промышленное использование глин и глинистых минералов обусловлено их специфическими свойствами: высокой дисперсностью и гидрофильностью, адсорбционной и обменной способностью, тиксотропией и набуханием, особыми теплофизическими и радиационными свойствам и др. Наибольшие объемы глин потребляют такие виды промышленности, как металлургическая, строительная и нефтяная. При этом сфера применения глин и глинистых минералов постоянно расширяется в разных отраслях промышленности.

Глина — один из древнейших строительных материалов человека. С палеолита человек использовал сырую глину для строительства жилищ, а позже из нее изготавливал строительный кирпич, ставший в наши дни самым распространенным строительным материалом на Земле. Примерно 12–10 тыс. лет назад человек стал массово использовать обжиг глины для изготовления посуды, появилась керамика, изменившая быт людей. Но первые керамические предметы появились еще раньше — 29–25 тыс. лет до н. э. Глина использовалась и для хранения информации — широко известные глиняные таблички с клинописными текстами, появившимися у шумеров около 3,3 тыс. лет до н. э.

Для различных микро- и макроорганизмов глины и глинистые минералы являются пищевым и энергетическим ресурсом. Некоторые микроорганизмы питаются определенными глинистыми минералами. Многие мик-

роорганизмы и их метаболиты участвуют в образовании и трансформации глинистых минералов. Для отдельных видов птиц и млекопитающих, склонных к литофагии, глины являются кудюритами [9]. Так, например, некоторые виды попугаев (ара, амазоны, жако, пионусы и др.), врановых (*Corvus monedula*) используют глину как пищевую добавку, пополняя свой рацион необходимыми веществами, содержащимися только в глинах. Глинистые илы являются пищей для илоедов (детритоедов — детритофагов) — двустворчатые моллюсков, голотурий, морских ежей, червей и др.

Роль глин в обеспечении энергетическими ресурсами человеческого сообщества является опосредованной, но весьма важной, т.к. глинистые породы участвуют в формировании месторождений нефти и газа — важнейших горючих полезных ископаемых.

В бассейнах осадконакопления глинистый материал и органическое вещество накапливаются одновременно, чем и создаются условия для последующей генерации углеводородов. В относительно глубоководных глинистых отложениях морского генезиса большая часть органического вещества относится к сапропелевому типу, обладающему наибольшим нефтематеринским потенциалом [2, 6].

Глины играют важнейшую роль не только в генезисе нефтяных углеводородов, но и способствуют их концентрации в залежах, обуславливая структурный фактор месторождений. Региональные глинистые экраны — флюидоупоры — в условиях широкого развития межрезервуарной миграции нефтяных и газовых флюидов являются одним из ведущих факторов, контролирующих концентрацию нефтяных и газовых скоплений в пределах различных интервалов отложений осадочного чехла нефтегазоносных бассейнов. Поэтому важнейший поисковый критерий нефтегазоносных осадочных бассейнов — наличие

горизонтов глинистых толщ сводчатой формы, играющих роль экранов или «глинистых покрывок» над залежами нефти и газа [6].

Роль глин в обеспечении биоты ресурсами биофильного ряда заключается в обеспечении организмов жизненно важными макро- и микробиогенными элементами. К первым относят С, О, N, H, Ca, P, K, S, а ко вторым — Fe, Mg, I, Cu, Zn, B, Si, Mo, Cl, Va и др. [9]. Для растений важна, прежде всего, обеспеченность их такими макробиогенными элементами, как азот, фосфор и калий. Сами глинистые минералы не содержат биофильные элементы в свободной форме, доступной для растений. Но за счет их большой сорбционной и обменной способности они могут становиться вторичными источниками биофильных элементов для организмов, захватывая ионы N^+ , Ca^{2+} , P^{3+} , K^+ , Na^+ в обменный комплекс.

Но и сама биота влияет на глинистые минералы. Установлено³, что в почвах (в частности, черноземах) процесс гумусообразования, как и выщелачивание кальция, приводит к подкислению среды, усилению глинообразования и трансформации состава слоистых минералов со структурой 2:1, прежде всего, смектитов. Изменение последних сопровождается увеличением в составе кристаллохимической ячейки минералов содержания кремния, железа и снижением количеств остальных элементов.

Важную роль в этом играют органо-минеральные комплексы (ОМК) глин, т.е. соединения особого типа, формирующиеся за счет адсорбции растворенного органического вещества поверхностью глин. Процесс этот стадийный: сначала происходит диссоциация органических кислот в воде с образованием радикалов типа $RCOO^-$. Затем в минерализованных растворах органические молекулы взаимодействуют с катионами сильных оснований (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) с образованием металлоорганических ионов (гуматов), причем в этих реакциях могут участвовать как карбоксильные, так и фенольные группы по схеме: $Me^{2+} + RCOO^- \rightarrow RCOOMe^+$. После этого положительно заряженные гуматы взаимодействуют с отрицательно заряженными частицами глинистых минералов (например, иллита) с образованием ОМК: $RCOOMe^+ + [Ca-иллит]^- \rightarrow ОМК$.

Установлено, что органо-минеральные комплексы глин, содержащиеся в почвах, обеспечивают значительную часть доступных растениям макробиогенных элементов, в том числе фосфатов, азота и калия. Органические составляющие почвенного поглощающего комплекса (легкие фракции) поставляют доступные фосфаты, в основном, за счет содержащихся в них растворимых соединений, которые высвобождаются в процессе минерализации, в меньшей мере за счет процессов обмена ионов почвенного раствора и ионами функциональных групп. Участие органо-минеральных комплексов глин осуществляется, в основном, за счет процессов сорбции–десорбции. Фракция остатка участвует в накоплении доступных фосфатов процессами растворения–осаждения минеральных соединений [1].

Наряду с почвами особо много вещественных ресурсов биофильного ряда содержится в морских и пресноводных илах, которые служат пищей для детритофагов (см. выше).

Роль глин в обеспечении возобновляемых ресурсов относительно проблематична, поскольку до настоящего

времени спор о возможности возобновления нефтяных и газовых месторождений не окончен. Тем не менее, в последнее время появляется все больше и больше фактов о том, что любая залежь жидких или газообразных углеводородов – это некая динамически равновесная, но в то же время открытая, диссипативная система, способная к самовосстановлению в относительно короткое время, измеряемое даже годами. При этом принимается смешанная теория происхождения углеводородов (органическая и неорганическая теории) [2].

В этой связи важная роль, обусловленная глинами и глинистыми минералами, принадлежит глинистым покрывкам, рассмотренным выше. Без их наличия и благоприятной конфигурации невозможно скопление возобновляемых углеводородных ресурсов. И наряду с этим существенна роль глин в концентрировании первичного органического вещества, трансформирующегося затем в углеводороды.

С глинами связан и другой не менее важный возобновляемый ресурс — вода, необходимая всем организмам. Подземные воды в глинах содержатся в основном в форме связанной воды и воды переходного типа — капиллярной и осмотической. Общие запасы этой воды в глинах земной коры огромны, однако связанная вода глин доступна для микроорганизмов, но недоступна растениям и высшим организмам. Вода переходного типа доступна для растений и организмов. В зависимости от условий залегания глин и их состояния доступность влаги для растений может меняться в определенных пределах.

В целом глины играют большую роль в формировании возобновляемых запасов подземных вод, в защищенности водоносных горизонтов от проникновения в них загрязнений, в строении артезианских бассейнов, выполняя в них роль водоупоров.

Наконец, глины и глинистые минералы играют важную роль в создании возобновляемых почвенных ресурсов и обеспечении их плодородия. Частицы глин являются фактором, обуславливающим оптимальную структуру почв вследствие их агрегирования, образования ОМК и наличия определенной поглотительной и обменной способности.

Роль глин в обеспечении ресурсов геологического пространства заключается в том, что объемы глинистых грунтов в пределах литосферы достигают огромной величины. Глины — один из самых распространенных типов осадочных грунтов, на которых формируются различные экосистемы, в данном случае — эколого-геологические системы (ЭГС) массивов глинистых грунтов. В пределах этих ЭГС функционируют и эволюционируют как абиотические, так и биотические подсистемы [8–10].

Для микробиоценозов пространство ЭГС массивов глинистых грунтов является средой обитания микроорганизмов, экологически связанных с глинами — пелитофилов. Глины оказывают большое влияние на автохтонные микробиоценозы, являясь для них благоприятным местообитанием, источником некоторых элементов питания и энергии (см. выше). Например, изучение консорциумов микроорганизмов на ряде месторождений глин Украины показало [14], что в их составе присутствуют и бактерии, и простейшие, и низшие грибы. При этом отмечается высокая устойчивость к стрессовым факторам микробных сообществ, выделенных из монтмориллонитовых глин.

³ Шоба В.Н., 2001. Органо-минеральные системы почв. Автореф. дис. ... докт. биол. наук. РАСХН (Сибирское отделение), Новосибирск.



Рис. 6. Оса, строящая гнездо из глины (<https://www.livejournal.com>)

Fig. 6. Wasp building a nest of clay (<https://www.livejournal.com>)

В фитоценозах пространство ЭГС массивов глинистых грунтов представляет собой субстрат и среду обитания для растений, предпочитающих и освоивших глинистые грунты — пелитофитов. Как и среди прочих литофитов, среди пелитофитов выделяются и облигатные формы (обитающие только на глинах), и факультативные формы (обитающие как на глинах, так и на иных типах грунтов). Например, в фитоценозах ЭГС глинистых массивов полупустынь и пустынь обычными представителями пелитофитов являются растения подсемейства маревых или лебедовых (*Chenopodioidae*), среди которых распространены как однолетние травянистые, так и многолетние кустарниковые и полукустарниковые и древесные растения: различные виды солянок (*Salsola*), лебеды (*Atripliceae*), солеросов (*Salicornia*), саксаул (*Haloxylon*) и др.

Для зооценозов пространство ЭГС массивов глинистых грунтов является средой обитания многих беспозвоночных и позвоночных животных — пелитофилов. Многие организмы используют глину для строительства своих гнезд (термиты, осы-пелопеи (рис. 6), многие птицы (рис. 7): ласточки, птицы-печники (рода *Furnarius*), скалистые поползни, сорочьи жаворонки и др.). Особенно сложная «архитектура» гнезд отмечена у птиц-печников, которые каркас гнезда делают из различных растительных материалов, а затем обмазывают его глиной

(рис. 7, а). Вес некоторых глиняных гнезд печников составляет 3,5–4 кг.

Суммарный объем глины, «перерабатываемой» и перемещаемой в мире, например, птицами, поражает. Так, расчеты показывают, что только на территории Белоруссии, где численность деревенской ласточки (*Hirundo rustica*) составляет 1–1,5 млн. пар, суммарная масса их глиняных гнезд составляет по самым скромным оценкам около 1–2 тыс. тонн! Учитывая, что их общая численность в мире во много раз больше, а кроме деревенской ласточки глиняные гнезда строят и другие виды ласточек (к тому же многие виды не используют гнезда повторно, а строят ежегодно новые), то общий масштаб «перерабатываемой» ими глины представляет гигантскую величину.

Наряду с птицами глины активно «перерабатывают» и многие другие организмы, в том числе беспозвоночные: моллюски, ракообразные, членистоногие и др. Например, масштабы использования глин термитами также поражают — некоторые термитники, построенные из частиц глин, склеенных слюной термитов, имеют высоту до восьми метров, а самый большой, обнаруженный в Африке, имел высоту 12,8 м. Недавно в Бразилии были обнаружены термитники возрастом до 4 тыс. лет (рис. 8), покрывающие огромную территорию: объем «переработанной» в них глины термитами составляет десятки кубических километров!

По-видимому, в еще больших масштабах на Земле животными используются как среда обитания глинистые илы — глинистые осадки пресноводных и морских бассейнов, не прошедшие стадию диагенеза. Они особо богаты микроорганизмами, а также различными беспозвоночными (моллюсками, ракообразными, членистоногими) и позвоночными животными.

В пределах европейской части Российской Федерации ресурсы геологического пространства, обусловленные глинами, огромны. Глинистые отложения с поверхности слагают обширные территории северо-запада, которые связаны с моренными аккумулятивными равнинами последнего оледенения; пространства севера, связанные с моренными равнинами максимального оледенения, переработанные последующими процессами. В Поволжье и Прикаспийской части РФ — это площади морских слабо расчлененных равнин. В Западной Сибири — территории, сложенные с поверхности морскими, аллювиальными



Рис. 7. Печники (а) и ласточки (б) в своих глиняных гнездах (<https://zagge.ru/>)

Fig. 7. Horneros (a) and swallows (b) in their clay nests (<https://zagge.ru/>)



Рис. 8. Термитники на северо-востоке Бразилии [17]
Fig. 8. Mound-building termites in the northeast of Brazil [17]

ми и озерно-аллювиальными глинистыми грунтами, в Восточной Сибири — территории, сложенные с поверхности глинистыми грунтами и сформированные ледниковыми и криогенными морфоструктурами с наложенными аккумулятивными мерзлотно-солифлюкционными формами. Все это — примеры ресурса геологического пространства, сформированного глинами.

Не меньший, а еще больший ресурс геологического пространства, сформированный глинами, представлен преимущественно морскими глинистыми толщами, перекрытыми иными отложениями и залегающими на различной глубине. В осадочном чехле континентов глины преобладают в платформенных областях. Это морские глинистые толщи кембрийского возраста (синие глины), девонские пестроцветные глины, морские каменноугольные глины (гжельские и др.), пермские глины, юрские и меловые глины, а также различные морские глины палеоген-неогена (майкопские, сарматские, меотические глины и др.) и четвертичного возраста (хвалынские, скифские глины и др.).

Экологическая геохимическая функция глин

Глины выполняют важную экологическую геохимическую функцию, которая заключается в их участии в геохимических процессах, влияющих на биоту, и формировании специфических геохимических барьеров [7]. Особенно велика роль глин в таких геохимических провинциях, областях и зонах, где они составляют основной тип отложений и формируют определенные ассоциации химических элементов, а также геохимические неоднородности.

Хорошо известно, что глины активно сорбируют практически все виды загрязнений: тяжелые металлы, углеводороды, органические и хлорорганические токсиканты (пестициды, гербициды и т.п.), а также радионуклиды. При этом высокая сорбционная способность многих глин обуславливает их двоякую роль в эколого-геологических системах. С одной стороны, благодаря этой способности они накапливают различные компоненты, в том числе и токсичные, становясь источниками вторичного загрязнения окружающей среды и ЭГС, а с другой стороны — препятствуют распространению загрязнений, аккумулируя (локализуя) их в глинистых толщах, выполняющих роль защитных сорбционных барьеров. Так, например, для многих геохимических регионов, в которых широко развиты глины, отмечено повышенное содержание в них

свинца, селена и др. элементов, которые лишь в микродозах не опасны для человека.

Специфической депонирующей средой, накапливающей различные токсиканты, являются так называемые «донные осадки» — современные пресноводные и морские глинистые илы. Их сорбционная способность по отношению к различным загрязнителям (тяжелым металлам, радионуклидам и т.п.) обусловлена как поглотительной способностью самих глинистых минералов, так и их органо-минеральных комплексов.

Поскольку глины отличаются низкими коэффициентами фильтрации (K_f) и большинство их по ГОСТ 25100-2011 «Грунты. Классификация» относится к категории водонепроницаемых ($K_f < 0,005$ м/сут), то миграция геохимических компонентов в пределах глинистых толщ осуществляется преимущественно диффузионным путем, и лишь по зонам дислокаций и разгрузки — фильтрацией. В этой связи весьма важна оценка коэффициентов диффузии в глинах различных экологически значимых геохимических компонентов.

На сорбционной и диффузионной способности глинистых минералов основаны технологии изготовления глинистых защитных барьеров и экранов, обладающих различными полезными свойствами (полупроницаемостью, селективностью поглощения и т.п.). Такие глиняные защитные барьеры (или завесы) устраиваются на полигонах хранения различных отходов, включая токсичные (например, радиоактивные). Наилучшим материалом для них служат монтмориллонитовые глины.

На возможности протекания в глинах электрокинетических процессов основаны электрокинетические и электрохимические способы очистки глинистых грунтов от токсичных загрязнений [3], электромелиорация глинистых грунтов, электроосмотическое осушение и уплотнение глин. Указанные технологии позволяют успешно управлять эколого-геологическими условиями на загрязненных и техногенно-нарушенных территориях.

Экологическая геодинамическая функция глин

Эта функция глин обусловлена их участием в формировании различных геологических процессов, как эндогенных, так и экзогенных, влияющих на биоту и состояние ЭГС [7, 8]. Среди них выделяют катастрофические, опасные, неблагоприятные и благоприятные для организмов, включая человека [9]. Для всех геодинамических процессов на массивах глинистых грунтов в экологическом плане важно учитывать соотношение скорости развития этих процессов и скорости сукцессий экосистем.

Экологическая роль глин в эндогенных процессах связана с их влиянием на скорость распространения сейсмических волн (фактор сейсмического микрорайонирования территорий), а также с их участием в грязевом вулканизме и гидротермальных процессах. Согласно СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах», расчетная сейсмичность строительных площадок на глинистых грунтах увеличивается на один балл по сравнению с исходной сейсмичностью территории. Водонасыщенные глины увеличивают риск сейсмических катастроф с большими экологическими последствиями.

Грязевой вулканизм (подводный и надводный) широко распространен на Земле, в том числе и на некоторых территориях России (Керчь, Тамань (рис. 9, а), Камчатка и

условиях, и в том числе зависит от *температурного поля* грунтов. Теплофизические свойства глинистых грунтов сильно зависят от их состава, консистенции и состояния (мерзлое или талое), варьируя в широких пределах. Установлено, что свойства и состояние глин существенно меняются при техногенных тепловых воздействиях [4]. Это сказывается и на состоянии эколого-геологической системы (ЭГС), подвергнутой таким воздействиям. Особо важное значение глины имеют в формировании тепловых полей экосистем в криолитозоне. В мерзлых глинах вода содержится в жидком состоянии, создавая условия для ее миграции и специфическую среду для микробиоценозов и пелитофитов.

Глины влияют и на *магнитное поле* эколого-геологических систем. Природные экосистемы адаптировались к естественному геомагнитному полю Земли. Если же в каком-либо регионе возникают геомагнитные аномалии, они вызывают изменения в ЭГС. Еще в прошлом веке Ю.Б. Осиповым⁴ было доказано влияние магнитного поля на формирование строения и свойств глин. Из этого следует, что в ЭГС с участием глинистых грунтов будут формироваться особые условия, которые будут влиять и на организмы. По величине магнитной восприимчивости глины в зависимости от их состава и состояния меняются от очень слабо намагничивающихся ($10 \cdot 10^{-5}$, ед. СИ) до хорошо намагничивающихся ($3 \cdot 10^{-2}$, ед. СИ).

Магнитные свойства глин используются в палеомагнетизме. Израильские археологи и палеогеофизики, изучавшие палеомагнитное поле Земли по глиняной керамике различной датировки, установили, что поскольку глины часто содержат примеси оксида железа, то при изготовлении глиняных сосудов, до их затвердевания, частицы железа ориентируются вдоль линий магнитного поля Земли, и, основываясь на их ориентации, можно оценить его напряженность в момент изготовления сосуда. Эти исследования показали, что магнитное поле Земли может резко (в разы) изменять свою напряженность всего за десятки лет — как минимум для обширных регионов, а скорее всего, и для планеты в целом. Причем предсказать такие колебания при современном уровне знаний нельзя.

В природных ЭГС массивов глинистых грунтов формируются естественные *электрические поля*, обусловленные электрокинетическими явлениями второго рода, характерными для глин, а также блуждающими токами. Электрические и электромагнитные поля ЭГС массивов глинистых грунтов зависят от электрических свойств глин — их электропроводности и диэлектрической проницаемости, которые в зависимости от состава и состояния глин меняются в очень широком диапазоне. Стоит отметить, что многие микроорганизмы, несущие тот или иной заряд, способны влиять на параметры двойного электрического слоя глин.

Радиационное поле (или поле ионизирующего излучения) ЭГС массивов глинистых грунтов формируется за счет их естественной и искусственной радиоактивности. Естественная радиоактивность глин разного возраста и генезиса меняется в широких пределах. Разные глинистые минералы обладают различной за-



Рис. 10. Эколого-геологическая система, сформировавшаяся на крупном вязко-пластическом оползне-потоке: пунктир — граница оползня; стрелки — направления смещения оползневых глинистых масс

Fig. 10. The ecological-geological system formed on a large viscous-plastic landslide-flow: the dotted line is the boundary of the landslide; arrows — the direction of displacement of landslide clay masses

щитной способностью по отношению к проникающей радиации. Наилучшими защитными свойствами обладает вермикулит.

Естественная радиоактивность глин часто обусловлена выделением радона и его диффузией в толщах глинистых грунтов. Величина коэффициента диффузии радона в ненарушенных глинистых отложениях составляет порядка 10^{-3} см²/с. Коэффициент диффузии радона в воде на четыре порядка ниже, чем в воздухе, вследствие чего степень заполнения пор водой — один из основных факторов, определяющих коэффициент диффузии рыхлых песчано-глинистых отложений и почв. Коэффициент диффузии радона в глинах зависит от степени заполнения пор водой: при низком содержании воды в порах эта зависимость выражена слабо, однако при степени заполнения пор водой более 60–70%, вода блокирует поры и коэффициент диффузии глины существенно снижается⁵.

Заключение

В результате проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Глины и глинистые минералы оказывают огромное влияние на эколого-геологические системы, они участвуют в формировании и реализации всех важнейших экологических функций литосферы: ресурсной, геохимической, геодинамической и геофизической.
2. Среди них наиболее значительна роль глин и глинистых минералов в обеспечении ресурсной экологической функции литосферы.
3. Вероятно, весьма важна роль глин и в происхождении жизни на Земле, в формировании РНК организмов, являясь для них своеобразным субстратом, матрицей с периодической коллоидной структурой. ☺

⁴ Осипов Ю.Б., 1968. Исследование глинистых суспензий, паст и осадков в магнитном поле. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. МГУ, Москва.

⁵ Микляев П.С., 2015. Научные основы оценки потенциальной радоноопасности платформенных территорий. Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. ИГЭ РАН, Москва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артемьева З.С., 2010. Органическое вещество и гранулометрическая система почвы. ГЕОС, Москва.
2. Гаврилов В.П., 1998. Геодинамическая модель нефтегазообразования в литосфере и ее следствия. Геология нефти и газа, № 6, с. 2–12.
3. Королев В.А., 2001. Очистка грунтов от загрязнений. МАИК «Наука/Интерпериодика», Москва.
4. Кошелев А.Г., Королев В.А., Соколов В.Н., 2001. Изменение свойств глинистых грунтов при техногенных тепловых воздействиях. Геоэкология, № 6, с. 519–530.
5. Никитин М.А., 2016. Происхождение жизни. От туманности до клетки. Альпина нон-фикшн, Москва.
6. Осипов В.И., Соколов В.Н., Еремеев В.В., 2001. Глинистые покрышки нефтяных и газовых месторождений. Наука, Москва.
7. Пекшева Е.П., Королев В.А., 1997. Эволюция глинистых грунтов в эпоху техногенеза. Эволюция инженерно-геологических условий Земли в эпоху техногенеза, Труды Международной научной конференции, Москва, 1997, с. 74–75.
8. Трофимов В.Т., Королев В.А., Харьковина М.А., Барабошкина Т.А., Калинин Э.В., Вознесенский Е.А., Аверкина Т.И., Цуканова Л.А., Жигалин А.Д., Самарин Е.Н., Васильчук Ю.К., Хачинская Н.Д., Буслаева О.Д., Николаева С.К., 2012. Базовые понятия инженерной геологии и экологической геологии: 280 основных терминов, под ред. В.Т. Трофимова. ООО «Геомаркетинг», Москва.
9. Трофимов В.Т., Харьковина М.А., Барабошкина Т.А., Жигалин А.Д., 2018. Экологические функции абиотических сфер Земли, под ред. В.Т. Трофимова. КДУ, Университетская книга, Москва.
10. Трофимов В.Т., Хачинская Н.Д., Цуканова Л.А., Юров Н.Н., Королев В.А., Григорьева И.Ю., Харьковина М.А., 2014. Геологическое пространство как экологический ресурс и его трансформация под влиянием техногенеза, под ред. В.Т. Трофимова. Изд-во «Академическая наука» — ООО «Геомаркетинг», Москва.
11. Фролова Ю.В., Чернов М.С., Рычагов С.Н., 2016. К вопросу о преобразовании туфов в разрезе Верхне-Паужетского термального поля (Южная Камчатка). Вулканизм и связанные с ним процессы, Материалы научной конференции, посвященной дню вулканолога, Петропавловск-Камчатский, 2016, с. 449–460.
12. Холодов В.Н., 2006. Геохимия осадочного процесса. ГЕОС, Москва.
13. Чернов М.С., Соколов В.Н., Рычагов С.Н., Кузнецов Р.А., Алешин А.Р., 2016. Строение гидротермальных глин Южной Камчатки: от макро- до наноуровня. Вулканизм и связанные с ним процессы, Материалы научной конференции, посвященной дню вулканолога, Петропавловск-Камчатский, 2016, с. 460–466.
14. Широбоков В.П., Янковский Д.С., Дымент Г.С., 2014. Микробы в биогеохимических процессах, эволюции биосферы и существовании человечества. ФОП Верес О.И., Киев.
15. Cairns-Smith A.G., 1982. Genetic takeover: and the mineral origins of life. Cambridge University Press, Cambridge.
16. Feuillie C., Daniel I., Michot L.J., Pedreira-Segade U., 2013. Adsorption of nucleotides onto Fe-Mg-Al rich swelling clays. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 120, pp. 97–108, <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.06.021>.
17. Martin S.J., Funch R.R., Hanson P.R., Eun-Hye Yoo, 2018. A vast 4,000-year-old spatial pattern of termite mounds. *Current Biology*, Vol. 28 (22), pp. 292–293.
18. Pedreira-Segade U., Hao J., Razafitianamaharavo A., Pelletier M., Marry V., Le Crom S., Michot L.J., Daniel I., 2018. How do nucleotides adsorb onto clays? *Life*, Vol. 8, No. 4, pp. 1–59, <https://doi.org/10.3390/life8040059>.
19. Salazar M., Fedoroff O.Y., Miller J.M., Ribeiro N.S., Reid B.R., 1992. The DNA strand in DNA·RNA hybrid duplexes is neither B-form nor A-form in solution. *Biochemistry*, Vol. 32, No. 16, pp. 4207–4215.
20. Smith J.M., Szathmáry E., 1997. The major transitions in evolution. Oxford University Press, Oxford.
21. Szabo P., Scheuring I., Czarán T., Szathmáry E., 2002. In silico simulations reveal that replacers with limited dispersal evolve towards higher efficiency and fidelity. *Nature*, Vol. 420, pp. 340–343.
22. Zimmer C., 2005. How and where did life on Earth arise? *Science*, Vol. 309, Issue 5731, pp. 89, <https://doi.org/10.1126/science.309.5731.89>.

REFERENCES

1. Artemyeva Z.S., 2010. Organic matter and soil grain size system. GEOS, Moscow. (in Russian)
2. Gavrilov V.P., 1998. A geodynamic model of oil and gas formation in the lithosphere and its consequences. *Geology of oil and gas*, No. 6, pp. 2–12. (in Russian)
3. Korolev V.A., 2001. Cleaning the soil from contamination. МАИК "Science / Interperiodica", Moscow. (in Russian)
4. Koshelev A.G., Korolev V.A., Sokolov V.N., 2001. Changes in the properties of clayey soils under technogenic heat effects. *Geoecology*, No. 6, pp. 519–530. (in Russian)
5. Nikitin M.A., 2016. The origin of life. From nebula to cell. Alpina non-fiction, Moscow. (in Russian)
6. Osipov V.I., Sokolov V.N., Eremeev V.V., 2001. Clay tires of oil and gas fields. Nauka, Moscow. (in Russian)

7. Peksheva E.P., Korolev V.A., 1997. The evolution of clay soils in the era of technogenesis. The evolution of geotechnical conditions of the Earth in the era of technogenesis, Proceedings of the International Scientific Conference, Moscow, 1997, pp. 74–75. (in Russian)
8. Trofimov V.T., Korolev V.A., Kharkina M.A., Baraboshkina T.A., Kalinin E.V., Voznesensky E.A., Averkina T.I., Tsukanova L.A., Zhigalin A.D., Samarina E.N., Vasilchuk Yu.K., Khachinskaya N.D., Buslaeva O.D., Nikolaeva S.K., 2012. Basic concepts of engineering geology and ecological geology: 280 basic terms, in V.T. Trofimov (ed.). "Geomarketing" LLC, Moscow. (in Russian)
9. Trofimov V.T., Kharkina M.A., Baraboshkina T.A., Zhigalin A.D., 2018. Ecological Functions of Earth's Abiotic Spheres, in V.T. Trofimov (ed.). KDU, University Book, Moscow. (in Russian)
10. Trofimov V.T., Khachinskaya N.D., Tsukanova L.A., Yurov N.N., Korolev V.A., Grigorieva I.Yu., Kharkina M.A., 2014. Geological space as an ecological resource and its transformation under the influence of technogenesis, in V.T. Trofimov (ed.). Publishing house of the "Akademicheskaya nauka" — "Geomarketing" LLC, Moscow. (in Russian)
11. Frolova Yu.V., Chernov M.S., Rychagov S.N., 2016. On the issue of the transformation of tuffs in the section of the Upper Pauzhetsky thermal field (South Kamchatka). Volcanism and related processes, Proceedings of the Scientific Conference dedicated to the day of the volcanologist, Petropavlovsk-Kamchatsky, 2016, pp. 449–460. (in Russian)
12. Kholodov V.N., 2006. Geochemistry of the sedimentary process. GEOS, Moscow. (in Russian)
13. Chernov M.S., Sokolov V.N., Rychagov S.N., Kuznetsov R.A., Aleshin A.R., 2016. The structure of hydrothermal clays of South Kamchatka: from macro to nano level. Volcanism and related processes, Proceedings of the Scientific Conference dedicated to the day of the volcanologist, Petropavlovsk-Kamchatsky, 2016, pp. 460–466. (in Russian)
14. Shirobokov V.P., Yankovsky D.S., Dyment G.S., 2014. Microbes in biogeochemical processes, the evolution of the biosphere and the existence of humanity. Veres OI FOP, Kiev. (in Russian)
15. Cairns-Smith A.G., 1982. Genetic takeover: and the mineral origins of life. Cambridge University Press, Cambridge.
16. Feuillie C., Daniel I., Michot L.J., Pedreira-Segade U., 2013. Adsorption of nucleotides onto Fe-Mg-Al rich swelling clays. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 120, pp. 97–108, <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.06.021>.
17. Martin S.J., Funch R.R., Hanson P.R., Eun-Hye Yoo, 2018. A vast 4,000-year-old spatial pattern of termite mounds. *Current Biology*, Vol. 28 (22), pp. 292–293.
18. Pedreira-Segade U., Hao J., Razafitianamaharavo A., Pelletier M., Marry V., Le Crom S., Michot L.J., Daniel I., 2018. How do nucleotides adsorb onto clays? *Life*, Vol. 8, No. 4, pp. 1–59, <https://doi.org/10.3390/life8040059>.
19. Salazar M., Fedoroff O.Y., Miller J.M., Ribeiro N.S., Reid B.R., 1992. The DNA strand in DNA·RNA hybrid duplexes is neither B-form nor A-form in solution. *Biochemistry*, Vol. 32, No. 16, pp. 4207–4215.
20. Smith J.M., Szathmáry E., 1997. The major transitions in evolution. Oxford University Press, Oxford.
21. Szabo P., Scheuring I., Czarán T., Szathmáry E., 2002. In silico simulations reveal that replacers with limited dispersal evolve towards higher efficiency and fidelity. *Nature*, Vol. 420, pp. 340–343.
22. Zimmer C., 2005. How and where did life on Earth arise? *Science*, Vol. 309, Issue 5731, pp. 89, <https://doi.org/10.1126/science.309.5731.89>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

КОРОЛЕВ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ

Профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, д.г.-м.н., г. Москва, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

VLADIMIR A. KOROLEV

Professor of the Department of Engineering and Ecological Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, DSc (Doctor of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, Russia

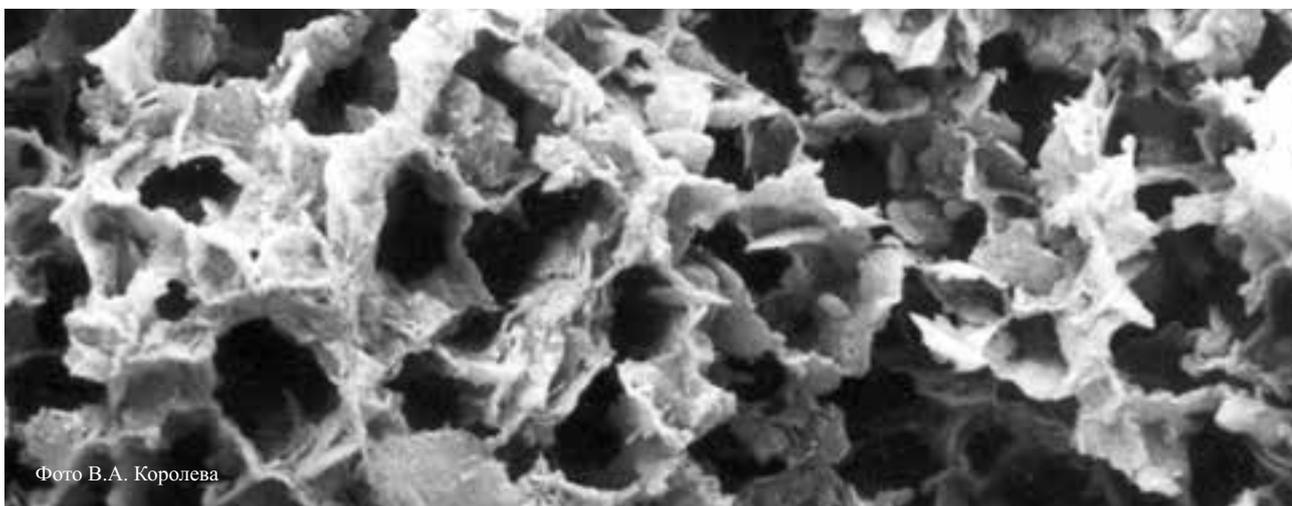


Фото В.А. Королева