

УДК 550.8.056

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-3-49-62

## ВЛИЯНИЕ БИОТУРБАЦИИ НА ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЛЕКТОРОВ НЕФТИ И ГАЗА НА ПРИМЕРЕ НИЖНЕМЕЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРНОГО КАСПИЯ

Валерия Вадимовна Чуркина<sup>1</sup>✉, Алексей Сергеевич Мозговой<sup>2</sup>,  
Юлия Александровна Коточкова<sup>3</sup>, Дмитрий Викторович Кляжников<sup>4</sup>,  
Алена Дмитриевна Егорова<sup>5</sup>, Татьяна Геннадьевна Исакова<sup>6</sup>,  
Татьяна Федоровна Дьяконова<sup>7</sup>, Георгий Александрович Калмыков<sup>8</sup>,  
Сергей Александрович Талдыкин<sup>9</sup>, Елена Евгеньевна Кристя<sup>10</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; valerii\_churkina@rambler.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-7466-1598>

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; a.mozgovoy@oilmsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8595-3446>

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; kotjulik@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5004-4832>

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; petrophysics@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4330-2274>

<sup>5</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; a.nosikova@oilmsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0652-1195>

<sup>6</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; t.isakova@oilmsu.ru

<sup>7</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; dyakonov@yandex.ru

<sup>8</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; g.kalmykov@oilmsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8274-3622>

<sup>9</sup> ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Москва, Россия; Sergey.Taldykin@lukoil.com

<sup>10</sup> ПАО «Лукойл», Москва, Россия; Elena.Kristya@lukoil.com

**Аннотация.** Акватория Каспийского моря является одним из перспективных направлений геолого-разведочных работ для поиска нефтегазоносных объектов. Значительные запасы углеводородов заключены в полимиктовых песчаных коллекторах нижнемеловых (апт-альбских) отложений месторождений Северного Каспия, которые характеризуются неравномерным распределением пелитовой и алевритовой фракций, что приводит к высокому содержанию остаточной воды и низкой проницаемости, слабой согласованности фильтрационно-емкостных свойств между собой. Это предопределяет высокую неоднородность коллекторов в углеводородных залежах и необычно низкие удельные электрические сопротивления при получении безводных притоков углеводородов. Как показали исследования авторов, наиболее важной причиной сложного строения является интенсивная биотурбация отложений практически по всему продуктивному разрезу, которая активно влияет на перераспределение глинистого материала в породах-коллекторах и, в итоге, приводит к снижению удельных электрических сопротивлений коллекторов до такой степени, что их можно отнести к низкоомным.

**Ключевые слова:** нижнемеловые отложения, терригенный коллектор, Северный Каспий, фильтрационно-емкостные свойства, удельное электрическое сопротивление, биотурбация, низкоомные коллекторы

**Для цитирования:** Чуркина В.В., Мозговой А.С., Коточкова Ю.А., Кляжников Д.В., Егорова А.Д., Исакова Т.Г., Дьяконова Т.Ф., Калмыков Г.А., Талдыкин С.А., Кристя Е.Е. Влияние биотурбации на петрофизические характеристики коллекторов на примере нижнемеловых отложений Северного Каспия // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 3. С. 49–62.

## THE INFLUENCE OF BIOTURBATION ON THE PETROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE LOWER CRETACEOUS RESERVOIR ROCKS OF THE NORTHERN CASPIAN

Valeriia V. Churkina<sup>1</sup>✉, Alexei S. Mozgovoy<sup>2</sup>, Julia A. Kotochkova<sup>3</sup>,  
Dmitriy V. Klyazhnikov<sup>4</sup>, Alyona D. Egorova<sup>5</sup>, Tatiana G. Isakova<sup>6</sup>,  
Tatiana F. Dyakonova<sup>7</sup>, Georgiy A. Kalmykov<sup>8</sup>, Sergey A. Taldykin<sup>9</sup>, Elena E. Kristya<sup>10</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; valerii\_churkina@rambler.ru✉

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; a.mozgovoy@oilmsu.ru

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; kotjulik@gmail.com

<sup>4</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; petrophysics@mail.ru

<sup>5</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; a.nosikova@oilmsu.ru

<sup>6</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; t.isakova@oilmsu.ru

<sup>7</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; dyakonovaf@yandex.ru

<sup>8</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; g.kalmykov@oilmsu.ru

<sup>9</sup> LLC «LUKOIL-Engineering», Moscow, Russia; Sergey.Taldykin@lukoil.com

<sup>10</sup> PJSC «LUKOIL», Moscow, Russia; Elena.Kristya@lukoil.com

**Abstract.** The Caspian Sea is one of the most perspective areas for oil and gas exploration. Significant hydrocarbon reserves are contained in the polymictic sand reservoirs of the lower cretaceous (Aptian-Albian) deposits of the North Caspian fields, which are characterized by an irregular distribution of pelitic and silty fractions. This results in high residual water content and low permeability, poor consistency of filtration-volume properties between them.

This predetermines high heterogeneity of reservoirs in hydrocarbon reservoirs and unusually low specific electrical resistivities when producing water-free hydrocarbon inflows. As the authors' studies have shown, the most important reason for the complex structure is the intense bioturbation of deposits virtually throughout the productive section, which actively affects redistribution of clay material in the reservoir rocks and ultimately leads to a decrease in the resistivity of reservoirs to the point where they can be classified as low resistivity.

**Keywords:** lower cretaceous sediments, terrigenous reservoir, North Caspian Sea, filtration-volume properties, electrical resistivity, bioturbation

**For citation:** Churkina V.V., Mozgovoy A.S., Kotochkova J.A., Klyazhnikov D.V., Egorova A.D., Isakova T.G., Dyakonova T.F., Kalmykov G.A., Taldykin S.A., Kristya E.E. The influence of bioturbation on the petrophysical characteristics of the lower cretaceous reservoir rocks of the Northern Caspian. *Moscow University Geol. Bull.* 2023; 3: 49–62. (In Russ.).

**Введение.** Зависимость фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) песчаных коллекторов от биотурбации рассматривали многие исследователи, занимающиеся отложениями юрско-мелового возраста Западной Сибири [Бегма, 2017; Потапова и др., 2020; Сазоненко, 2019]. В этих работах не показана четкая взаимосвязь между видами ихнофоссилий и пористостью/проницаемостью пород, однако доказано их значительное влияние на формирование пустотного пространства коллекторов.

Подсчет запасов углеводородов (УВ) любых месторождений базируется на оценке объема порового пространства коллекторов и модели насыщенности. Условия осадконакопления, интенсивность вторичных процессов, влияющих на изменение первичных ФЕС пород, отражаются непосредственно на показаниях методов геофизических исследований скважин (ГИС), зачастую затрудняют их интерпретацию и определение подсчетных параметров.

Коэффициент нефтегазонасыщенности (Кнг) чаще всего определяется по удельному электрическому сопротивлению (УЭС) по методике Дахнова-Арчи. Для применения электрической модели Дахнова-Арчи в сложных по составу и свойствам продуктивных объектах и получения достоверных значений Кнг необходимо корректно учитывать все факторы, влияющие на УЭС коллектора.

Одной из особенностей изучаемых коллекторов нижнемеловых отложений является то, что в ряде случаев значения Кнг по электрической модели ГИС оказываются крайне низкими (Кнг=23–34%). По результатам испытаний из коллекторов с низкими значениями Кнг, как правило, получают безводные притоки нефти и газа, либо с незначительным содержанием воды в продукции (рис. 1).

Продуктивные отложения месторождений Северного Каспия характеризуются низким УЭС (рис. 1), что получило название «низкоомные нефтегазонасыщенные коллекторы». Согласно опубликованным работам [Комова и др., 2016] на снижение УЭС продуктивных коллекторов могут влиять следующие факторы:

1) микрослоистая последовательность песчаников и глин (анизотропия пород);

2) электронная проводимость внутри матрицы породы. Акцессорные минералы (например, пирит) выступают в качестве дополнительного проводника;

3) высокие значения связанной воды — повышенная глинистость коллекторов, тонкозернистость песчаников, внутренняя микропористость скелетной фракции.

Из перечисленных причин в отложениях присутствует микрослоистость (рис. 2), однако это единичные, маломощные прослои, не создающие общего снижения значений УЭС. Доминируют в разрезах биотурбационные текстуры, нарушающие первичную слоистость и приводящие к неоднородности свойств пород (рис. 2). Пирит также выделяется в нижнемеловых отложениях, но его содержание не превышает 2% и не оказывает значительного влияния на электронную проводимость матрицы породы. Из указанных факторов основное внимание заслуживает пункт 3 — повышенная глинистость коллекторов и связанная с этим высокая водонасыщенность, а также тонкозернистость песчаников, тоже приводящая к увеличению остаточной водонасыщенности коллекторов. Эти факторы присутствуют в изучаемом разрезе, но они существенно осложнены процессами интенсивной биотурбации. Это позволило отнести биотурбацию

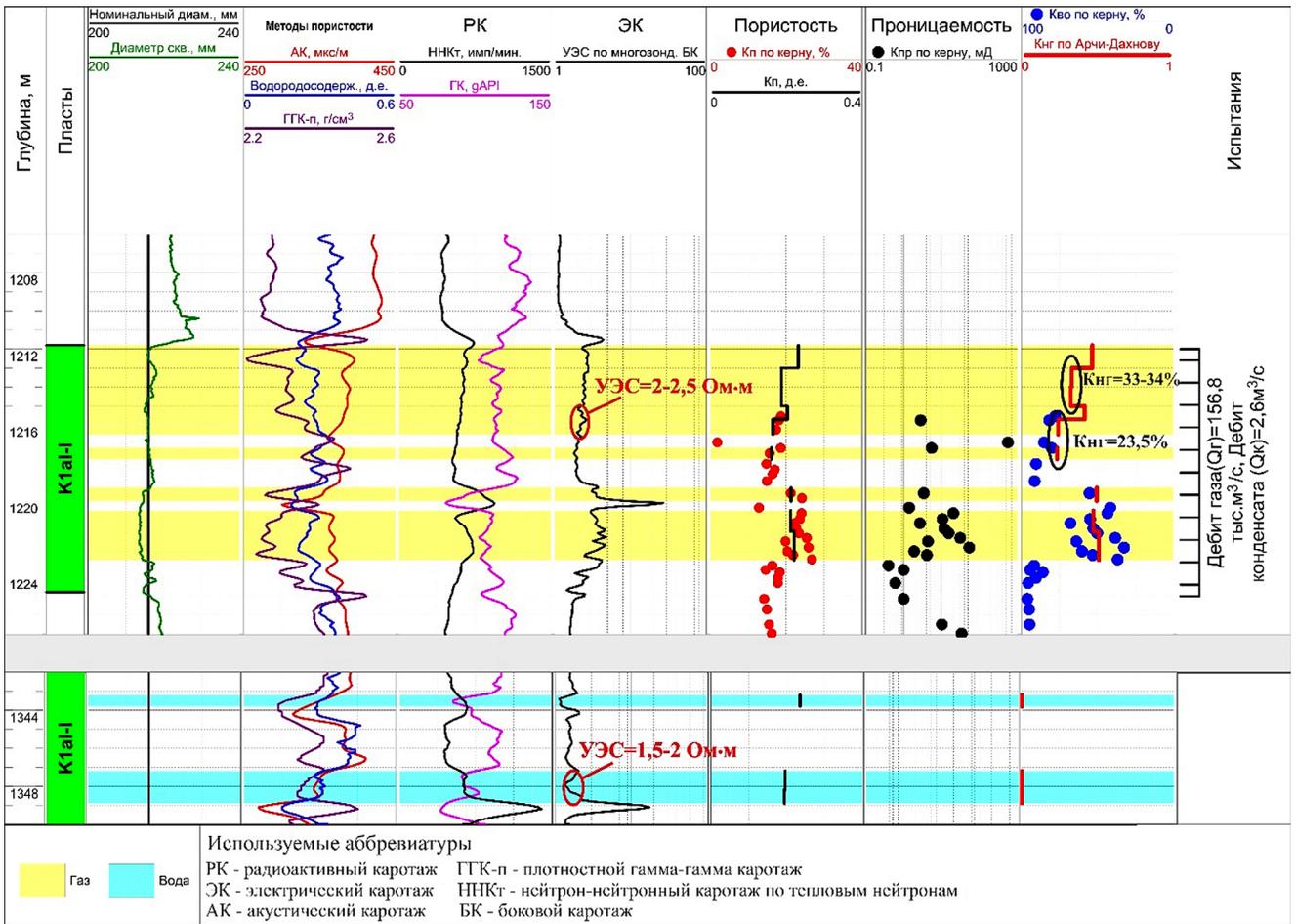


Рис. 1. Геолого-геофизическая характеристика альбских отложений одного из месторождений Северного Каспия

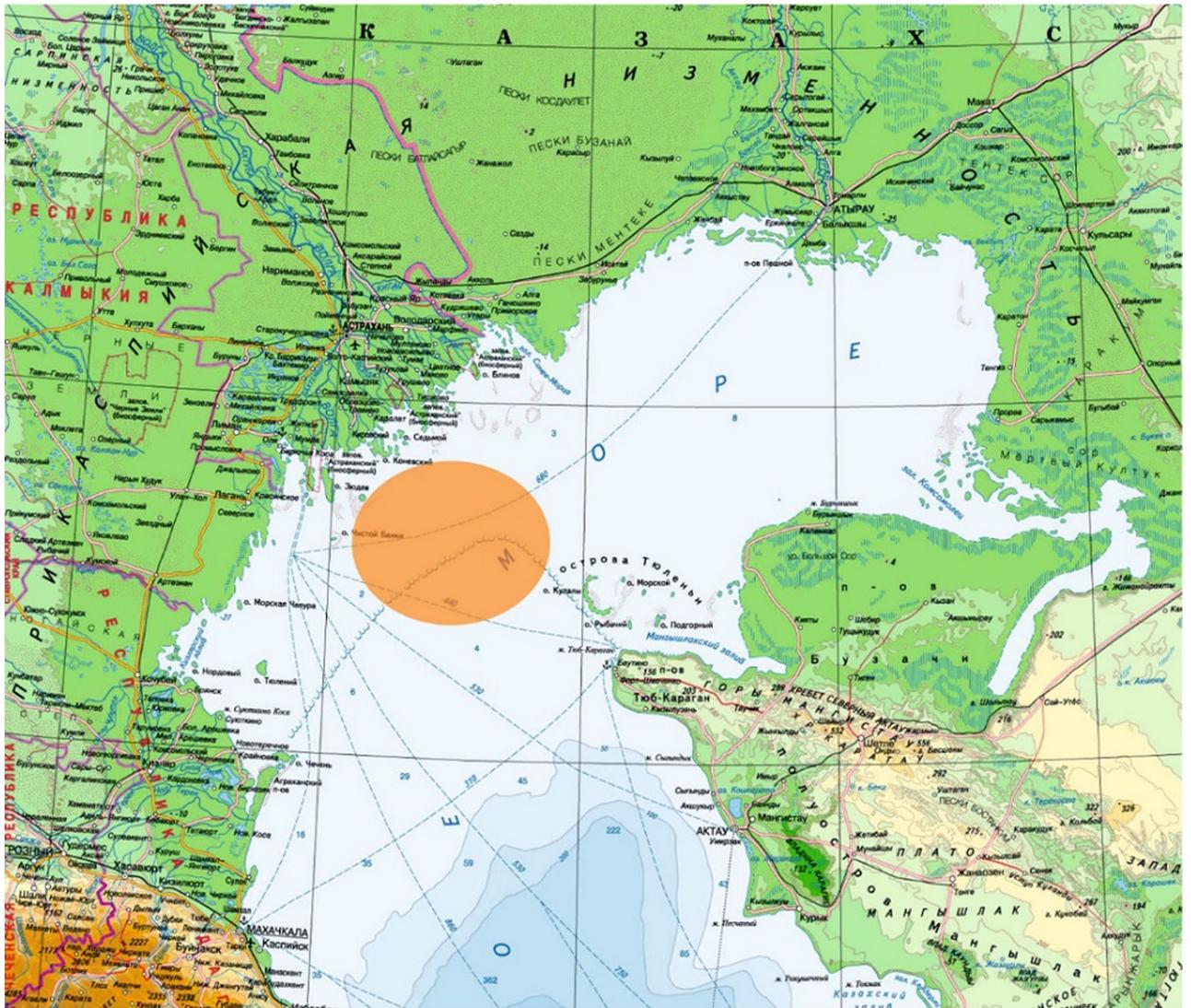
к причинам перевода коллекторов к низкоомным разностям.

В связи с этим, цель исследований заключается в литолого-физическом объяснении причин изменения ФЕС и низких величин УЭС терригенных коллекторов на месторождениях Северного Каспия.

**Материалы и методы.** Работы проведены по 6 скважинам, в которых было выполнено литологическое описание 227,28 м керна. Для детального изучения состава пород было описано 43 шлифа стандартной толщины, изготовленные на эпоксидной смоле, и проведены гранулометрический, рентгеноструктурный (РСА) и рентгенофлуоресцентный (РФА) анализы (63 образца). Анализ главных оксидов и микроэлементов (РФА) в пробах выполнен на спектрометре *Axios mAX Advanced*. Количество минеральных фаз (РСА) определялось на рентгеновском дифрактометре *Rigaku MiniFlex 600*. Количественное соотношение различных фракций (гранулометрия) оценивалось гидравлико-ситовым методом. Кроме того, были привлечены результаты интерпретации данных современного комплекса ГИС по рассматриваемым скважинам, а также результаты определения ФЕС по более чем 2000 образцам.



Рис. 2. Фотографии керна (интервал — коллектор): слева — при дневном свете, справа — в ультрафиолетовом свечении. Глубины 1436,7–1437,7 м



Район исследования

Рис. 3. Географическая карта Северного Каспия с нанесенным районом исследования

### Результаты исследований и их обсуждение.

Объектом исследования являются нижнемеловые (апт-альбские) терригенные коллекторы месторождений Северо-Каспийского района, расположенные в 150–200 км от г. Астрахань (рис. 3; 4). Аптские отложения формировались преимущественно в мелководно-морских частях бассейна на глубинах 10–20 м, альбские — в относительно глубоководных областях на глубинах до 40 м.

Отложения апта ( $K_1a$ ) и альба ( $K_{1al}$ ) представлены глинистыми биотурбированными тонкозернистыми песчаниками и алевролитами с редкими прослоями известняков и глауконитовых разностей, с линзовидной и тонкой горизонтальной слоистостью, нарушенной биотурбацией (рис. 2).

С целью сопоставления величин УЭС продуктивных и водонасыщенных коллекторов отложений  $K_{1al}$  и  $K_1a$ , а также вмещающих глинистых пород, были построены гистограммы распределений УЭС по данным ГИС (рис. 5). К продуктивным относи-

лись коллекторы в чисто газовой/нефтяной зоне, при испытании которых были получены безводные притоки газа или нефти. К водонасыщенным относились интервалы ниже принятого ВНК или давшие приток пластовой воды.

Как следует из графиков (рис. 5), изучаемые продуктивные отложения по всему разрезу характеризуются низкими значениями УЭС (от 1 до 10 Ом·м), в среднем составляя 2–3 Ом·м: для отложений  $K_{1al}$  УЭС меняется в пределах 1,4–9,9 Ом·м, при среднем значении 2,9 Ом·м; коллекторы  $K_1a$  имеют диапазон УЭС от 1,2 до 5,9 Ом·м и более низкое, по сравнению с отложениями  $K_{1al}$ , среднее значение УЭС, равное 2,2 Ом·м. В связи с малым числом водонасыщенных прослоев в интервале отложений  $K_{1al}$  и  $K_1a$ , анализ их УЭС проводился совместно для двух пластов. Водонасыщенные коллекторы характеризуются значениями УЭС от 0,7 до 1,6 Ом·м, при среднем значении 1 Ом·м. Вмещающие глинистые породы имеют промежуточные между водонасыщенными

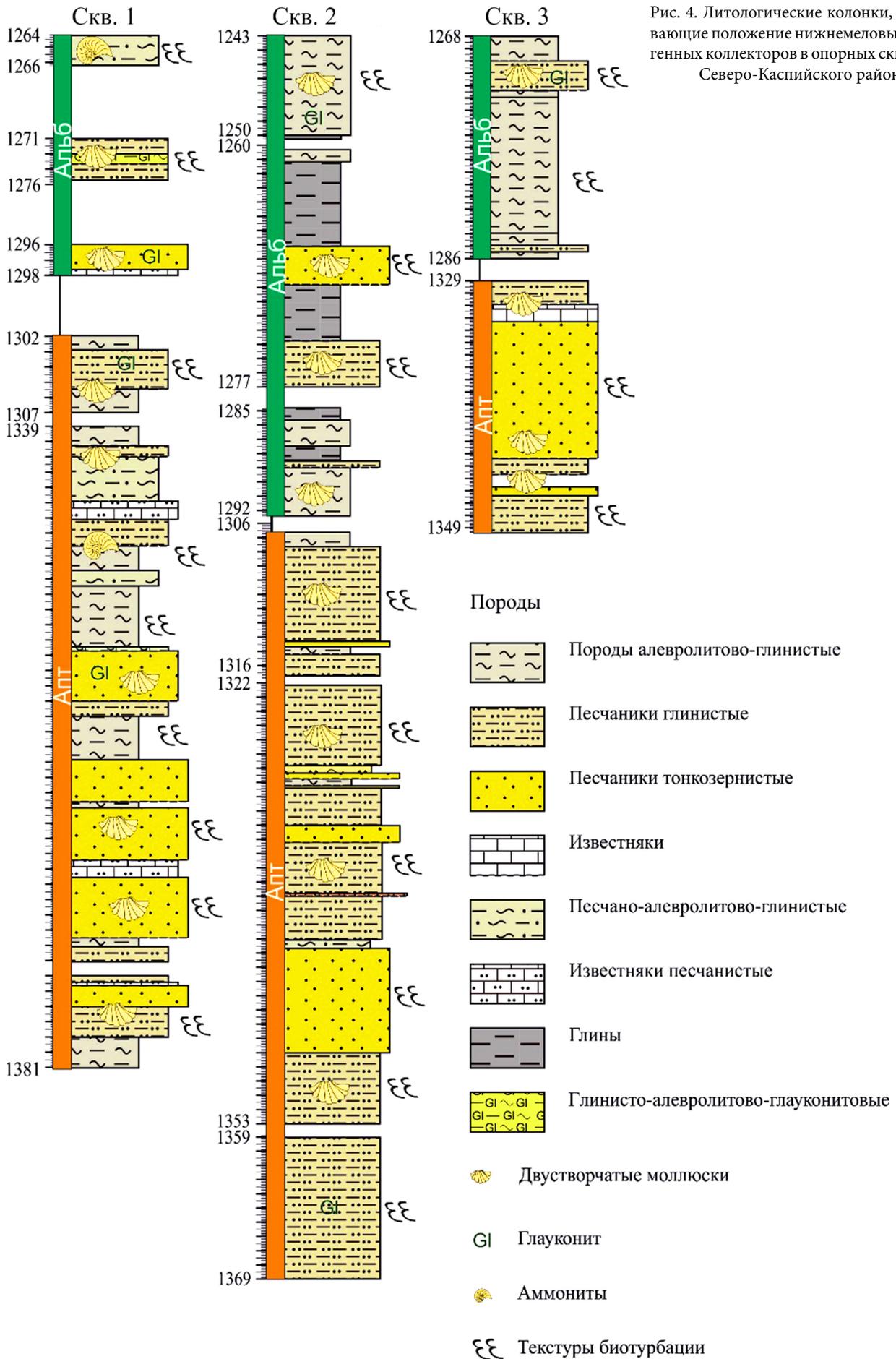


Рис. 4. Литологические колонки, показывающие положение нижнемеловых терригенных коллекторов в опорных скважинах Северо-Каспийского района

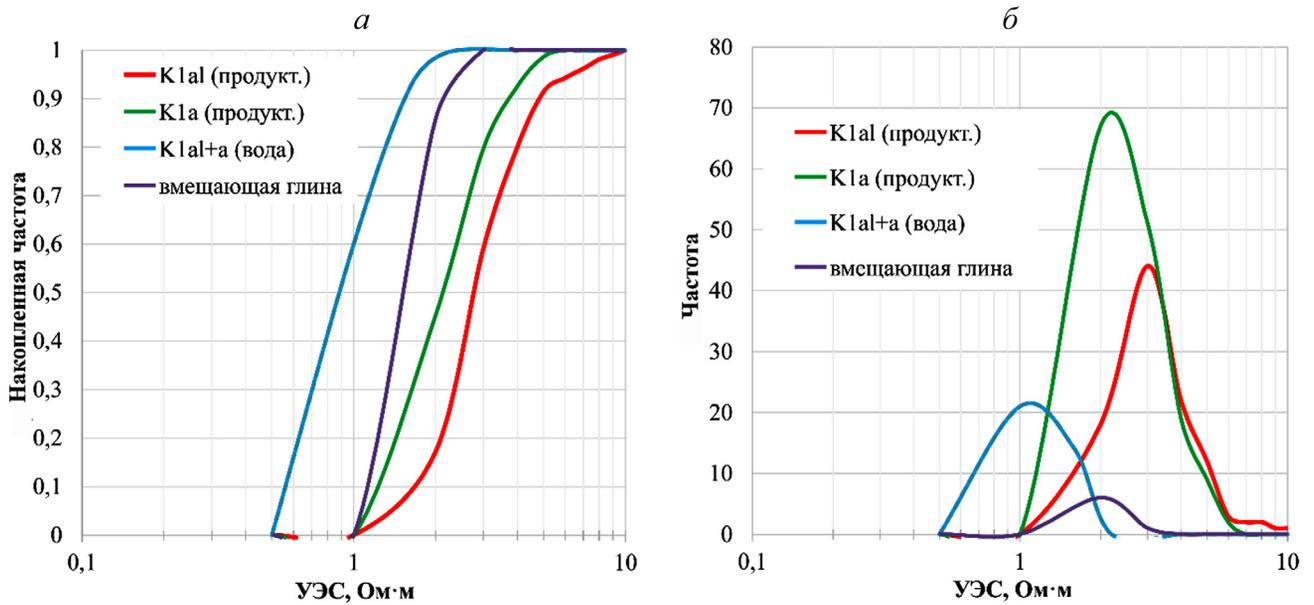


Рис. 5. Сопоставление интегральных (а) и дифференциальных (б) распределений УЭС продуктивного разреза, водоносных пластов, вмещающих глин для отложений  $K_{1a1}$  и  $K_{1a}$

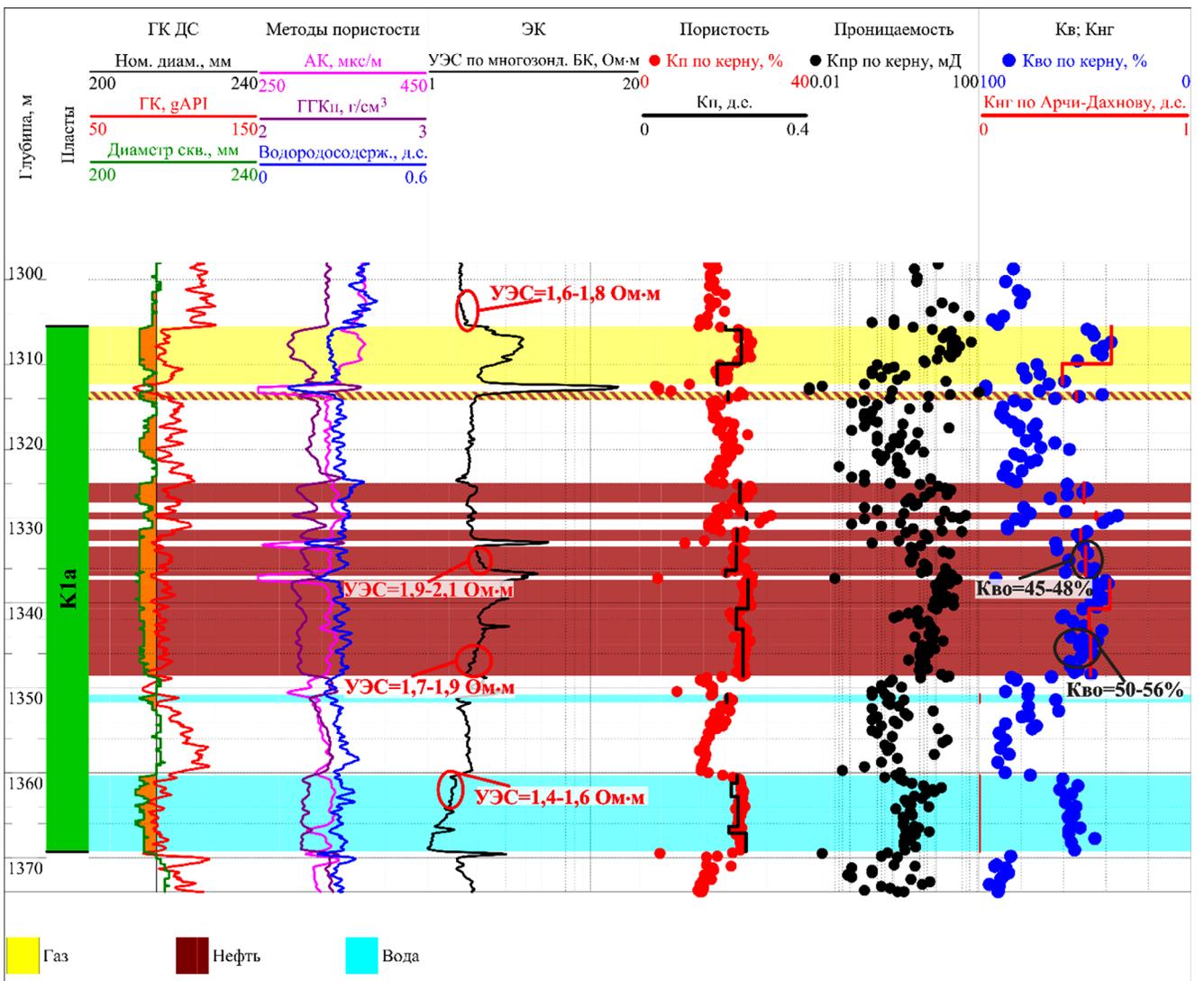
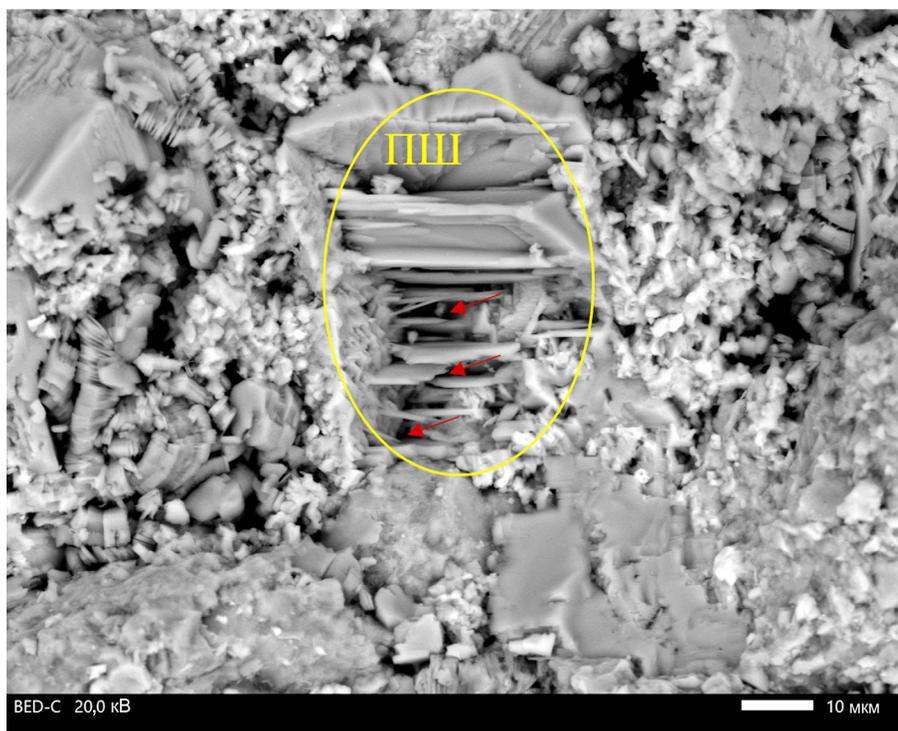


Рис. 6. Геолого-геофизическая характеристика аптских отложений одного из месторождений Северного Каспия

Рис. 7. Фотография под РЭМ: полурастворенное зерно полевого шпата (ПШ).  
Красные стрелки — поры



и продуктивными коллекторами значения УЭС — от 1,8 до 2,2 Ом·м, при среднем значении 1,9 Ом·м.

Анализ показал, что значения УЭС продуктивных коллекторов (УЭС,ср=2,5 Ом·м) близки к УЭС вмещающих пород (УЭС,ср=1,9 Ом·м) (рис. 6). Именно поэтому важным является детальный анализ исследуемых отложений с целью выявления возможных причин их низкого удельного сопротивления. Анализ петрофизической информации показал, что причина низкого УЭС изучаемых отложений не может быть определена единственным фактором. Несомненно, следует обратить внимание

на повышенные значения коэффициента остаточной водонасыщенности для альбских (Кво≈50%) и для аптских (Кво≈53%) коллекторов (рис. 6). Остаточная вода в породах связана с тонкими порами и капиллярами, образованными в результате вторичных преобразований силикатных и алюмосиликатных минералов: полевые шпаты и слюды частично растворяются (рис. 7) или замещаются каолинитом (рис. 8), благодаря чему между полурастворенными зернами алюмо-силикатных зерен (ПШ) и между сростками каолинитовых минералов образуются микрополости. На интенсивность этих процессов

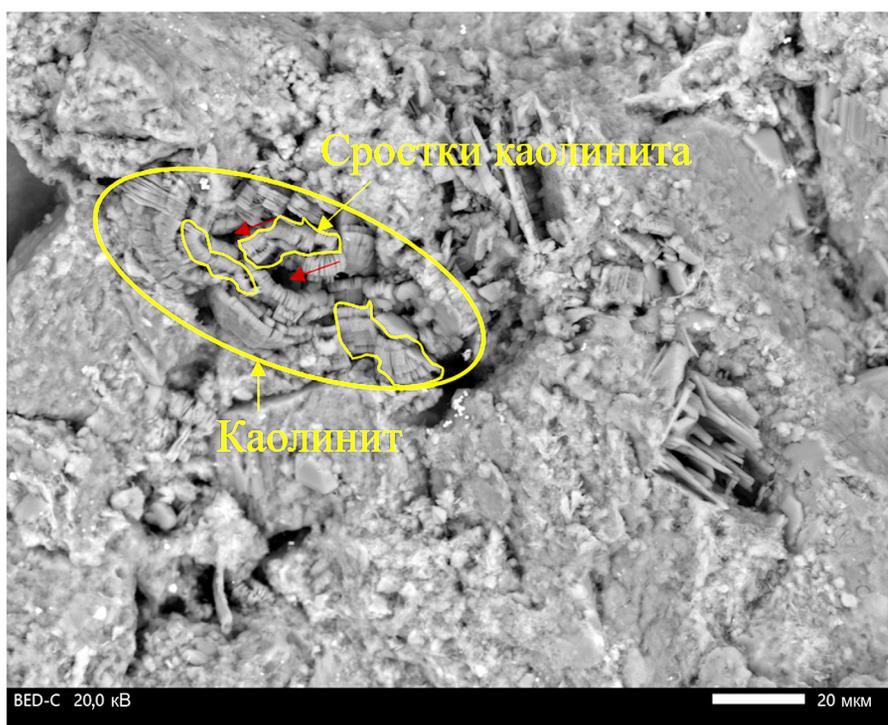


Рис. 8. Фотография под РЭМ: вторичная каолинизация глинистых минералов. Красные стрелки — поры

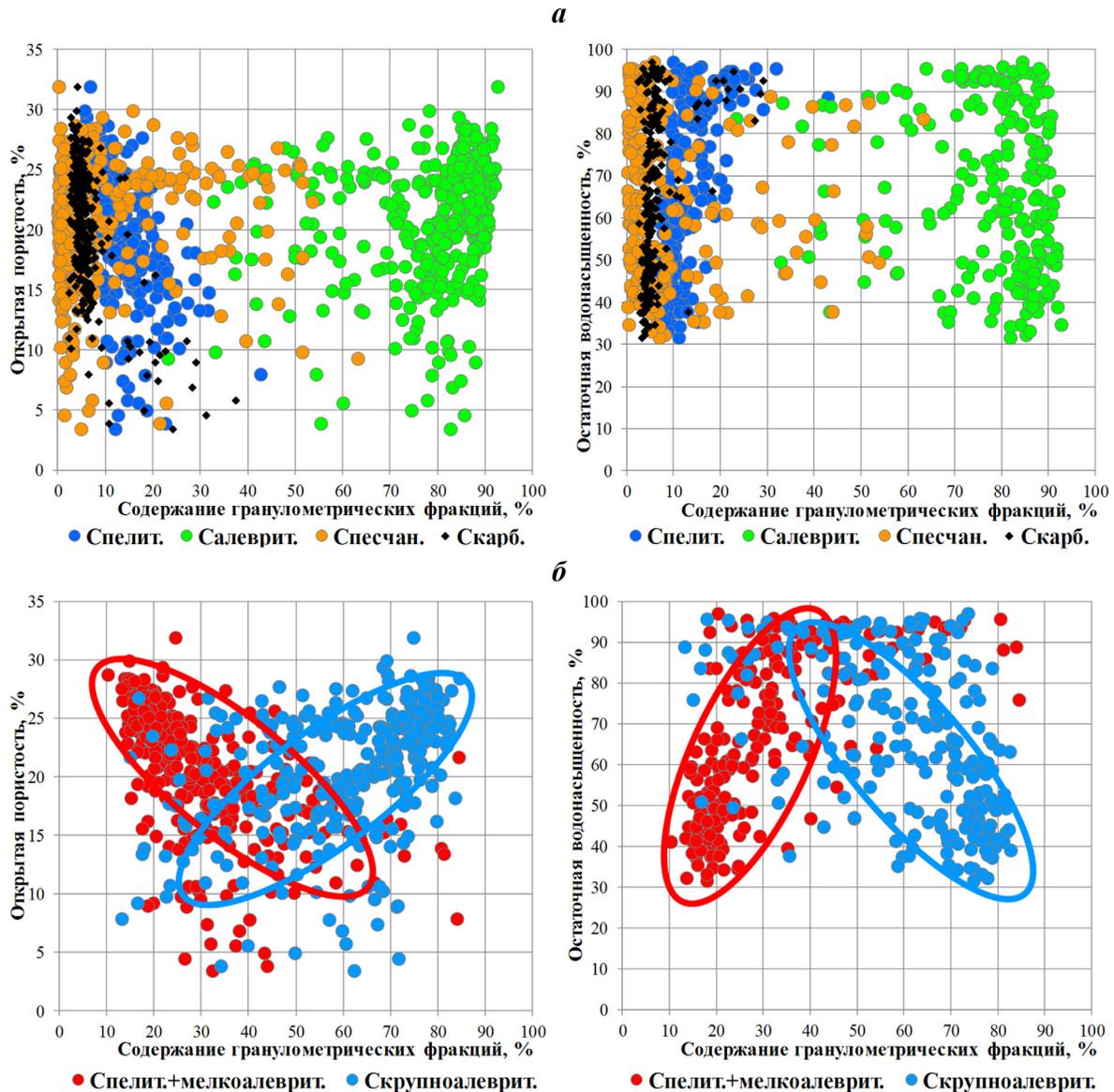


Рис. 9. Сопоставления содержаний гранулометрических фракций с Кп и Кво для отложений  $K_1a$  месторождений Северного Каспия: а — до дифференциации алевритовой фракции на мелко- и крупноалевритовую; б — после дифференциации

влияет размер зерен: алевритовые и пелитовые частицы более подвержены вторичным изменениям. В исследуемых породах-коллекторах содержание этих фракций достаточно велико благодаря биотурбации, в ходе которой живые организмы (илоеды) перемешивают породу, привнося более тонкий материал в песчаный осадок.

Анализ гранулометрического состава показал, что для изучаемых аптских и альбских отложений характерно повышенное содержание алевритовой (0,01–0,1 мм) и пелитовой (<0,01 мм) фракций. В среднем они составляют 77,8 и 13,6% соответственно. Содержание песчаной (>0,1 мм) фракции невелико и составляет 8,6%. Карбонатность исследуемых пород в среднем равна 6,4%.

На примере отложений  $K_1a$  видно, что четких связей между содержаниями пелитовой, алевритовой и песчаной фракциями, а также карбонатности с ФЕС пород проследить не удастся (рис. 9, а).

Дифференциация алевритовой фракции на мелкоалевритовую (0,01–0,04 мм) и крупноалевритовую (0,04–0,1 мм) и последующее объединение мелкоалевритовой фракции с пелитовой позволяет наметить следующие тренды (рис. 9, б): увеличение суммарного содержания пелитовой и мелкоалевритовой фракций ведет к уменьшению открытой пористости и увеличению остаточной водонасыщенности, вызывая снижение УЭС пород; увеличение содержания крупноалевритовой фракции приводит к увеличению открытой пористости и уменьшению остаточной водонасыщенности.

Анализ состава и распределения глинистого материала в породе является важным этапом исследования в данной работе. С точки зрения литологии, алевритовые и песчаные породы относятся к аркозам, в которых выделяется неравномерно распределенный глинистый цемент, состоящий в основном из гидрослюда и каолинита, в меньшей степени

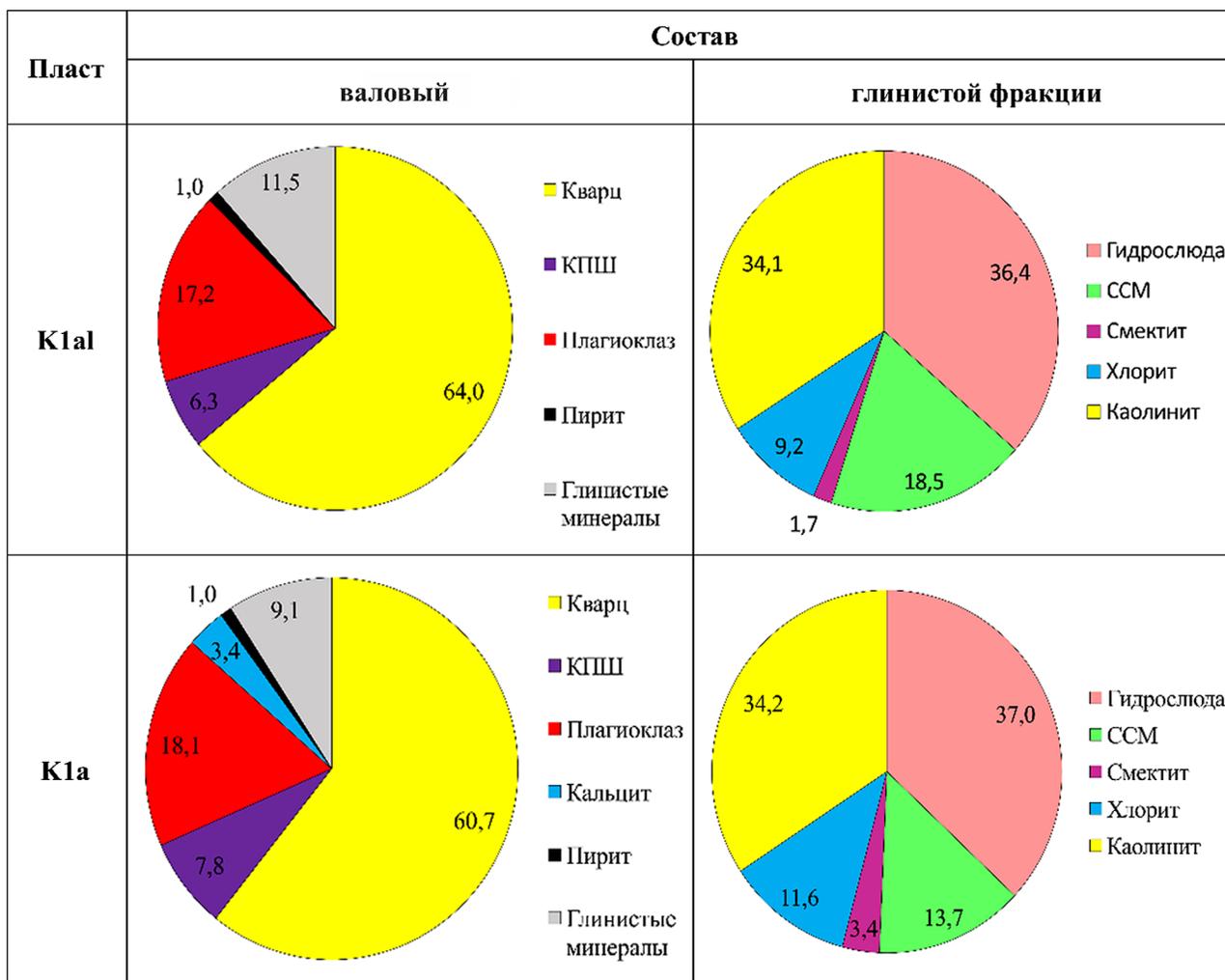


Рис. 10. Круговые диаграммы с процентным содержанием минералов по результатам рентгеноструктурного анализа. КПШ — калиевый полевой шпат, ССМ — смешаннослойные минералы; K1a1 — альбские отложения, K1a — аптские отложения

смектита и хлорита (общее содержание глин варьирует от 8 до 15%) (рис. 10). Сам скелет пород (кварц и полевые шпаты) и УВ являются диэлектриками. Наличие глинистого цемента в алевро-песчаных породах-коллекторах увеличивает электропроводность пород. Каолинит в данных отложениях, в основном, вторичный и образует поровый цемент (рис. 11). Процесс каолинизации проходит в кислых средах

(pH = 4–5), в результате чего происходит частичное растворение алюмосиликатов (полевых шпатов и слюд) [Фролов, 1993], приводящее к увеличению емкости коллектора на 2–3%, а проницаемости — в несколько раз [Neasham, 1977]. И самое важное — образующиеся в этом процессе свободные катионы железа, натрия и калия будут сорбироваться на отрицательно заряженной глинистой поверхности,

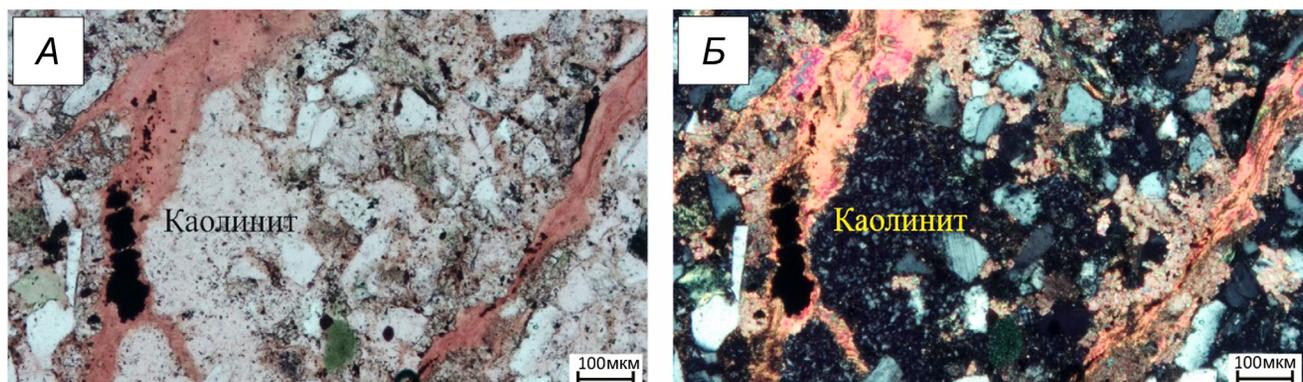


Рис. 11. Фото шлифа: песчаник мелко-тонкозернистый, алевроитовый (10–15%), хорошо сортированный, аркозный, с поровым каолиновым цементом. Увеличение  $\times 10$ , размерная линейка 100 мкм. Слева — николи параллельные, справа — скрещенные

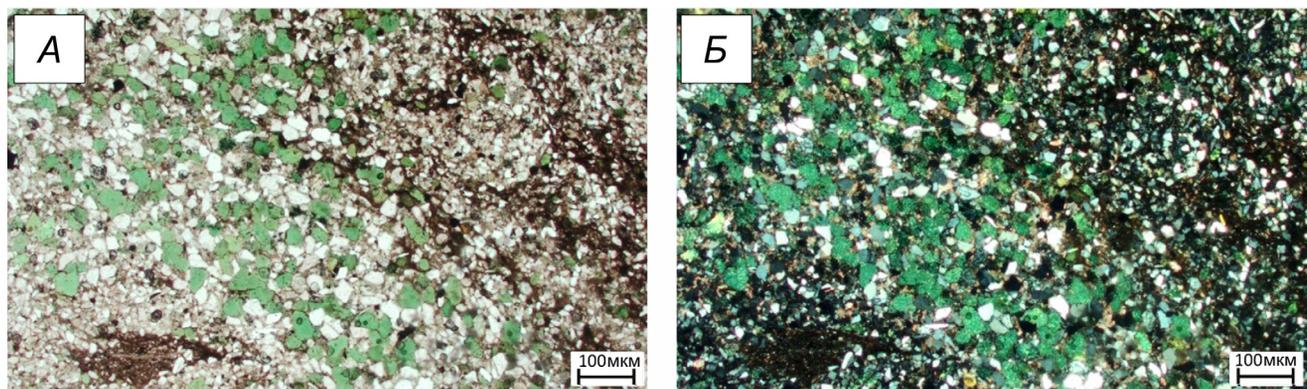


Рис. 12. Алевро-песчаник тонкозернистый, хорошо сортированный, аркозовый, с глауконитовыми линзами. Увеличение  $\times 10$ , размерная линейка 100 мкм. Слева — николи параллельные, справа — николи скрещенные

тем самым увеличивая плотность зарядов поверхностных слоев глин [Комова и др. 2016], создавая дополнительную ионную проводимость и снижая УЭС пород. Наибольшей площадью сорбционной поверхности и емкостью катионного обмена обладают гидрослюды и смектиты, которые в данных разрезах содержатся в значительных количествах (рис. 12). При нарушении кристаллической решетки этих глинистых минералов (в результате вторичных процессов каолинизации и выщелачивания) повышается доля некомпенсированных зарядов за счет разрушения связей алюмокремниевых тетраэдров и октаэдров в глинах, что приводит к необходимой компенсации заряда путем адсорбирования свободных катионов в окружающей среде.

В исследуемых разрезах на распределение и количество глинистых минералов огромное влияние

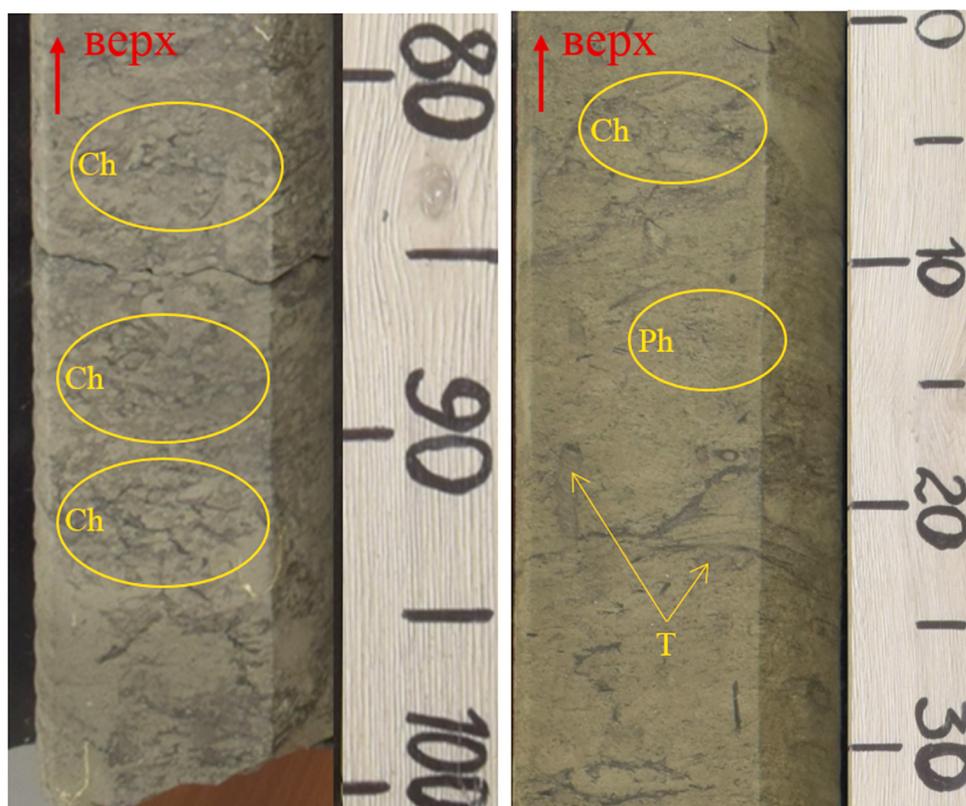
оказывает биотурбация. Биотурбация — биологическое перемешивание минеральных осадков и почв при поедании их червями и членистоногими [Фролов, 1993]. При описании керна были выделены ихнофоссилии, характерные для ихнофагии *Cruziana*. Основные виды представлены *Phycosiphon*, *Chondrites*, *Teichichnus* (рис. 13), также встречаются *Palaeophycus*, *Planolites*, *Asterosoma* и *Arenicolites*. Степень биотурбации сильно варьируется, индекс по шкале Дрозера-Боттье [Droser, 1986] изменяется от 0 до 5. Данная ихнофагия соответствует мелководно-морским обстановкам с разной гидродинамикой. Виды *Arenicolites*, *Phycosiphon* могут служить индикаторами штормовых процессов, что подтверждается отложениями, вскрытыми скважинами — отмечаются горизонты с разноориентированными литокластами нижележащих пород и обломки углистого детрита.

#### Сопоставление параметров пористости и проницаемости в целом для пласта и с видами биотурбации

| Альб                |            |                         |            |                          | Апт                 |             |            |            |                          |              |
|---------------------|------------|-------------------------|------------|--------------------------|---------------------|-------------|------------|------------|--------------------------|--------------|
| В целом для пласта  |            |                         |            |                          |                     |             |            |            |                          |              |
|                     | Минимум    |                         | Максимум   | Среднее                  | Минимум             |             | Максимум   | Среднее    |                          |              |
| Кп, %               | 15,5       |                         | 32,0       | 22,3                     | 17,9                |             | 32,0       | 24,4       |                          |              |
| Кпр, мД             | 0,2        |                         | 191,0      | 7,3                      | 0,5                 |             | 157,0      | 5,4        |                          |              |
| Кво, %              | 27,0       |                         | 77,0       | 50,0                     | 30,7                |             | 82,0       | 53,0       |                          |              |
| Скв. 1              |            |                         |            |                          |                     |             |            |            |                          |              |
| Глубины 1264–1298 м |            |                         |            |                          | Глубины 1339–1381 м |             |            |            |                          |              |
| Вид                 | Chondrites | Planolites и Chondrites | Planolites | Phycosiphon и Chondrites | Вид                 | Phycosiphon | Chondrites | Planolites | Phycosiphon и Chondrites | Palaeophycus |
| Кп, %               | 21,7       | –                       | 24,4       | 23,5                     | Кп, %               | 24,4        | 23,2       | –          | 22,3                     | –            |
| Кпр, мД             | 19,5       | –                       | 7,8        | 19,4                     | Кпр, мД             | 15,4        | 23,6       | –          | 14,0                     | –            |
| Скв. 2              |            |                         |            |                          |                     |             |            |            |                          |              |
| Глубины 1243–1292 м |            |                         |            |                          | Глубины 1307–1369 м |             |            |            |                          |              |
| Кп, %               | 24,8/ 13*  | 24,8                    | –          | –                        | Кп, %               | 20,9        | 20,8       | 22,7       | 23,6                     | 20,4         |
| Кпр, мД             | 25,2/19,3* | 25,2                    | –          | –                        | Кпр, мД             | 7,0         | 34,6       | 4,4        | 2,7                      | 7,1          |
| Скв. 3              |            |                         |            |                          |                     |             |            |            |                          |              |
| Глубины 1268–1286 м |            |                         |            |                          | Глубины 1329–1349 м |             |            |            |                          |              |
| Кп, %               | –          | 23,8                    | –          | –                        | Кп, %               | 23,3        | 24,0       | –          | –                        | –            |
| Кпр, мД             | –          | 12,4                    | –          | –                        | Кпр, мД             | 15,7        | 10,6       | –          | –                        | –            |

Примечание. \* — единичные ходы.

Рис. 13. Фото керна с ихно-фоссилиями: слева — следы *Chondrites* (Ch); справа — следы *Teichichnus* (T), *Chondrites* (Ch), *Phycosiphon* (Ph)



*Phycosiphon* практически не встречается в альбских отложениях, но доминирует в аптских разрезах. Следы *Chondrites* в большом количестве встречаются в породах альба, в редких случаях в породах апта и часто являются показателями повышения уровня моря [Knaust, 2017].

Как показывают петрофизические исследования, эти ходы представителей ихнофауны (а именно *Chondrites*, *Phycosiphon*) при их высокой концентрации увеличивают сообщаемость пор пород за счет привнесения песчаного материала, что в свою очередь повышает проницаемость коллекторов (таблица). Но в то же время, проницаемость и удельное электрическое сопротивление сильно биотурбированных пород с другими видами ихнофоссилий (*Planolites*, *Asterosoma* и некоторые *Chondrites*) снижаются за счет неоднородности отложений и привноса глинистого материала в песчаные осадки в результате заполнения нор/ходов выше и ниже лежащими глинистыми отложениями.

Сопоставление на качественном уровне коэффициента глинистости (Кгл), оцененного по торевой кривой спектрального гамма-каротажа (СГК), и интенсивности биотурбации (рис. 14) показало, что переработка материала живыми организмами влияет на перераспределение глинистого материала в породах. Исходное содержание глин в отложениях, связанное с изменениями условий осадконакопления, а именно гидродинамики среды, меняется в результате биотурбационных процессов. Это приводит к разным вариантам изменения свойств, связанным с переносом минеральных компонент породы — к увеличению ФЕС за счет возрастания песчаной

фракции (благодаря видам *Chondrites*, *Phycosiphon*) и к снижению ФЕС за счет дополнительного возрастания глинистости (из-за наличия видов *Arenicolites* и *Asterosoma*). Также на перераспределение глин влияет интенсивность переработки материала живыми организмами. На рис. 14 (а, е) выделяются алевритово-глинистые песчаные породы, полностью переработанные илоедами (интенсивная биотурбация), что делает породу однородной, со значениями Кгл 0,04–0,07 д.е. На фотографиях шлифов отмечаются глинистые линзы в алевритовых песчаниках, в одном случае (б) — это первичные глинистые прослои (сохранившиеся из-за меньшего влияния биотурбации), во втором (в) — результат деятельности илоедов *Arenicolites*, которые привносят глинистый материал в песчаные прослои. В таких отложениях коэффициент глинистости повышается до 0,36 д.е. Породы, представленные шлифами г и д, относятся к отложениям, образовавшимся с участием штормовых процессов: живые организмы, образующие следы *Phycosiphon*, зарывались в ил, привнося выше лежащий плохо-сортированный песчаный материал. Значения Кгл в таких породах варьируют в пределах 0,07–0,10 д.е.

В изучаемом разрезе, несмотря на ординарные распределения глинистости (до 10–15%) и пористости (до 20–25%) коллекторов, аномальными являются низкие значения УЭС по геофизическим исследованиям скважин, не характерные для традиционных коллекторов с рассеянной глинистостью. Это связано с тем, что при переработке материала организмами, происходит перераспределение глинистого материала, привнос его в песчаные прослои,

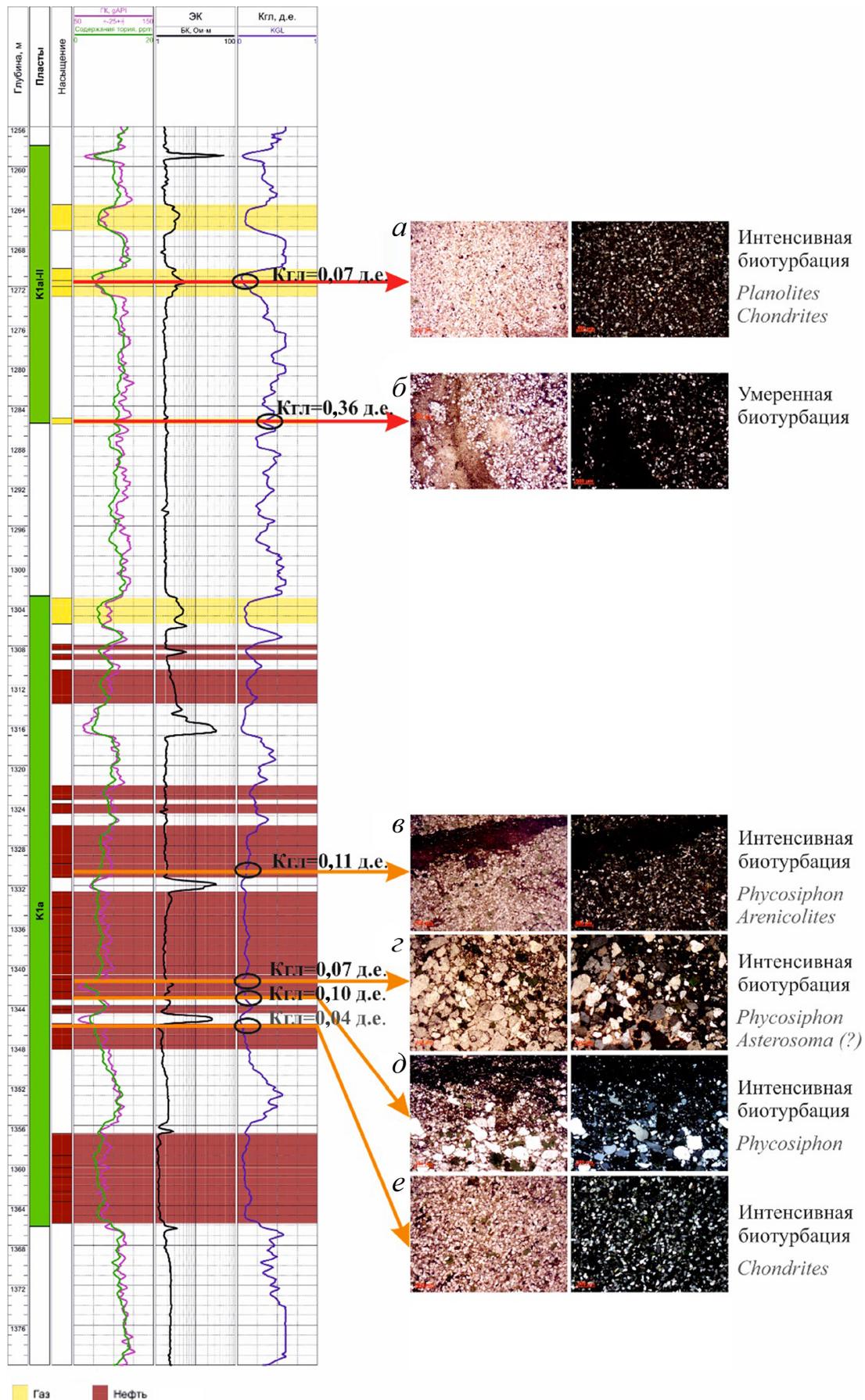


Рис. 14. Геофизический планшет одной из скважин месторождений Северного Каспия, на котором показано сравнение Кгл (график) с интенсивностью биотурбации пород (фотографии шлифов). Фотографии шлифов под микроскопом, увеличение  $\times 2,5$ , размерная линейка 500 мкм: слева — николи параллельные, справа — скрещенные

Рис. 15. Фотографии песчаника, глинистого, биотурбированного: А — отсканированный в полную величину большой шлиф, прокрашенный, размерная линейка 1 см; Б, В — фотографии шлифов под микроскопом, увеличение  $\times 2,5$ , размерная линейка 500 мкм: Б — параллельные николи; В — скрещенные николи; а — глинистые линзы; б — глинистый песчаник; с — сильнопористый песчаник (ходы илоедов). Глубина 1440,32 м. К<sub>1</sub>а

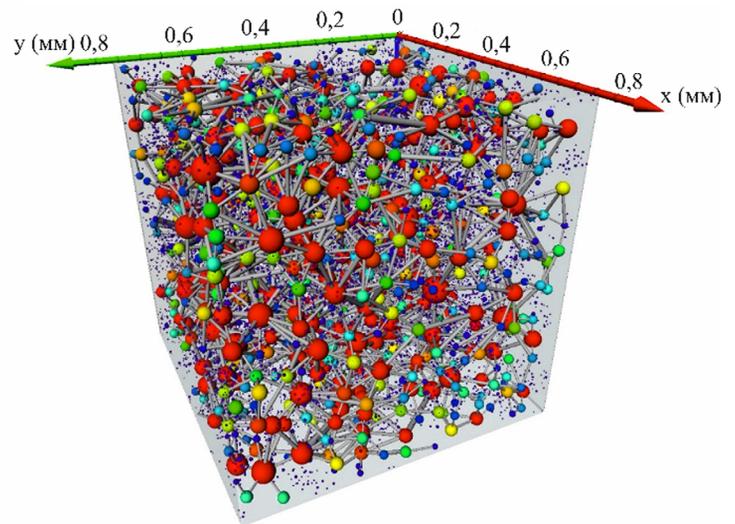
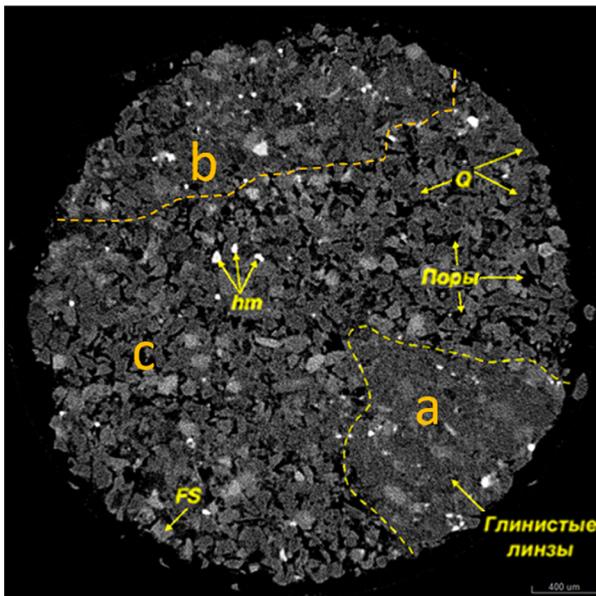
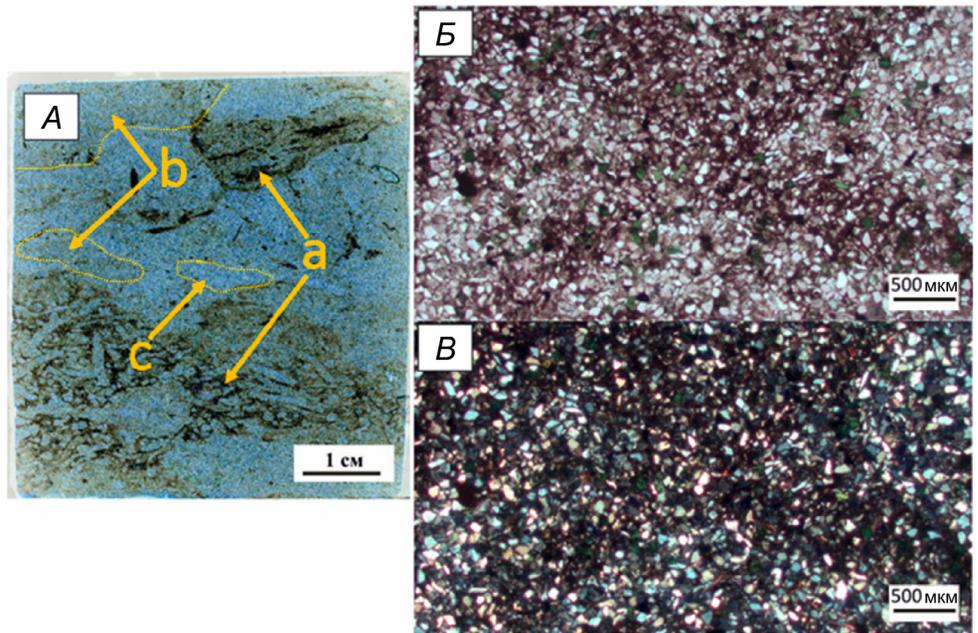


Рис. 16. Слева — рентгеноплотностной срез песчаника с интерпретацией: Q — кварц, FS — полевые шпаты, hm — минералы тяжелой фракции, поры — поровое пространство; а — глинистые линзы; б — глинистый песчаник; с — сильнопористый песчаник. Справа — сеточная модель пустотного пространства в объеме кубика с ребром 0,76 мм: сферы — поры разного размера; линии — каналы, соединяющие поры

создается дополнительная проводимость. Также меняется взаимоотношение зерен: уменьшается плотность упаковки, начинают преобладать точечные контакты компонентов. На рис. 15, А и рис. 16 прослеживаются первичные глинистые линзы (а), которые были частично затронуты биотурбацией, в результате чего в них был привнесен песчаный материал из выше и ниже лежащих прослоев. В песчаных же прослоях отмечаются неоднородные области — свидетельство изменения упаковки зерен: б — области глинистых песчаников; с — области сильнопористых песчаников.

Таким образом, детальные исследования колонок ядра из нижнемеловых осадков месторождений

Северного Каспия показали наличие нескольких видов инхофоссилий, приводящих к двум различным результатам изменения петрофизических характеристик за счет переработки минеральных компонент породы в процессе своей активной жизнедеятельности: к снижению ФЕС пород за счет увеличения глинистого материала; к увеличению ФЕС пород за счет перераспределения минеральных зерен скелета. Но невзирая на разное воздействие биотурбации на изменение свойств коллекторов, основным и общим результатом интенсивной деятельности всех видов илоедов является существенное увеличение удельной электрической проводимости пород, которая самым ощутимым образом сказывается на снижении

показаний электрических методов геофизических исследований разрезом скважин.

**Выводы.** 1. Раннемеловые коллекторы месторождений Северного Каспия имеют сложное строение, связанное с высокой степенью неоднородности и слабой согласованностью фильтрационно-емкостных свойств между собой.

2. Продуктивный разрез, представленный апт-альбскими терригенными отложениями, имеет низкую дифференциацию пород по значениям удельного электрического сопротивления: УЭС меняется при переходе от продуктивных коллекторов (2,2–2,9 Ом·м) к водоносным (1 Ом·м) и вмещающим прослоям (1,9 Ом·м). Низкая дифференциация пород по УЭС затрудняет интерпретацию ГИС при выделении коллекторов, оценке характера их на-

сыщенности, прогнозе величин нефтегазонасыщенности по электрической модели ГИС.

3. Алевролитовые и песчаные породы являются аркозами, в которых глинистые минералы цемента и вторичные преобразования в виде каолинитизации напрямую влияют на сопротивление пласта, увеличивая ионную проводимость и снижая УЭС продуктивных коллекторов.

4. Биотурбация отложений является установленным в процессе исследований ядра вторичным фактором, осложняющим первичные условия осадконакопления, приводя к дополнительному снижению УЭС продуктивных коллекторов, за счет интенсивной переработки минеральных компонент породы разными видами илоедов в процессе их жизнедеятельности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бегма Д.С. Литолого-фациальные особенности строения верхнеюрских отложений месторождения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 1. С. 109–122.

2. Комова А.Д., Дьяконова Т.Ф., Исакова Т.Г. и др. Особенности строения и оценки нефтенасыщенности верхнеюрских низкоомных коллекторов на примере Ватъеганского месторождения Западной Сибири // Экспозиция Нефть Газ. 2016. № (53). С. 17–21.

3. Комова А.Д., Дьяконова Т.Ф., Исакова Т.Г. и др. Некоторые виды сложных коллекторов продуктивных разрезов нефтегазовых месторождений // Геофизика. 2017. № 5. Спецвыпуск «ЦГЭ-50 лет». С. 126–133.

4. Потапова А.С., Кудаманов А.И., Ярунова Н.К., Студнев Е.А. Использование ихнофациального анализа ядра для локализации перспективных зон в отложениях турона (Русское месторождение, Западная Сибирь) // Мат-лы XIX научно-практической конференции «Геоло-

гия и разработка месторождений с трудноизвлекаемыми запасами», 24–26 сентября 2019, Анапа. М., 2019.

5. Сазоненко Д.Ф. Биотурбация в коллекторах раннемелового возраста в Шаимском НГР Западной Сибири. IX Всероссийское литологическое совещание. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2019. 214 с.

6. Фролов В.Т. Ф 91. Литология. Кн. 2: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 1993. 432 с.

7. Droser M.D., Bottjer D.J. A semiquantitative field classification of ichnofabric // J. Sedim. Petrol. 1986. № 56. P. 558–559.

8. Knaust D. Atlas of Trace Fossils in Well Core: Appearance, Taxonomy and Interpretation. Springer International Publishing AG. 2017. 209 p.

9. Neasham J.W. SPE 6858 The morphology of dispersed clay in sandstone reservoirs and its effect on sandstone shaliness, pore space and fluid flow properties. Shell Development Company. 1977.

Статья поступила в редакцию 21.03.2023,  
одобрена после рецензирования 22.03.2023,  
принята к публикации 22.07.2023