

УДК 550.34.06:551.781.4+551.87(477.75)

## ЭОЦЕНОВАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ И ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО КРЫМА

Екатерина Александровна Лыгина<sup>1</sup>✉, Наталья Витальевна Правикова<sup>2</sup>,  
Екатерина Романовна Чижова<sup>3</sup>, Татьяна Юрьевна Тверитинова<sup>4</sup>,  
Елена Васильевна Яковичина<sup>5</sup>, Анатолий Михайлович Никишин<sup>6</sup>,  
Максим Валерьевич Коротаев<sup>7</sup>, Александр Вениаминович Тевелев<sup>8</sup>,  
Елизавета Андреевна Краснова<sup>9</sup>, Владимир Леонидович Косоруков<sup>10</sup>,  
Евгений Николаевич Самарин<sup>11</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ealygina@mail.ru ✉

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; npravikova@mail.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; chizhova\_er@mail.ru

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; tvertat@yandex.ru

<sup>5</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; yakovishina@mail.ru

<sup>6</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; amnikishin@gmail.com

<sup>7</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; korm1111@yandex.ru

<sup>8</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; atevelev@yandex.ru

<sup>9</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия; e.krasnova@oilmsu.ru

<sup>10</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; kosorukov-vladimir@rambler.ru

<sup>11</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; samarinen@mail.ru

**Аннотация.** Представлены результаты комплексного изучения мел-эоценовых отложений Центрального Крыма (г. Ак-Кая). Определены температура и солёность формирования пород маастрихта и эоцена, проведена корреляция с глобальным климатическим событием EETO (Early Eocene Climate Optimum). Доказана синхронность формирования крутых субмеридиональных трещин и базального горизонта эоцена. Выделено три крупных этапа деформаций: доэоценовый, эоценовый и постэоценовый. Показано, что эоценовый этап отвечает формированию палеосейсмодислокаций на фоне главной фазы тектонической активности в Понтидах (Восточная Турция).

**Ключевые слова:** Центральный Крым, мел, эоцен, палеосейсмодислокации, тектонические события

**Для цитирования:** Лыгина Е.А., Правикова Н.В., Чижова Е.Р., Тверитинова Т.Ю., Яковичина Е.В., Никишин А.М., Коротаев М.В., Тевелев А.В., Краснова Е.А., Косоруков В.Л., Самарин Е.Н. Эоценовая сейсмичность и палеогеография Центрального Крыма // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 5. С. 68–77.

## EOCENE SEISMICITY AND PALEOGEOGRAPHY OF THE CENTRAL CRIMEA

Ekaterina A. Lygina<sup>1</sup>✉, Natalia V. Pravikova<sup>2</sup>, Ekaterina R. Chizhova<sup>3</sup>,  
Tatiana Yu. Tveritinova<sup>4</sup>, Elena V. Yakovishina<sup>5</sup>, Anatoly M. Nikishin<sup>6</sup>,  
Maksim V. Korotaev<sup>7</sup>, Aleksandr V. Tevelev<sup>8</sup>, Elizaveta A. Krasnova<sup>9</sup>,  
Vladimir L. Kosorukov<sup>10</sup>, Eugeny N. Samarin<sup>11</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ealygina@mail.ru ✉

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; npravikova@mail.ru

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; chizhova\_er@mail.ru

<sup>4</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; tvertat@yandex.ru

<sup>5</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; yakovishina@mail.ru

<sup>6</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; amnikishin@gmail.com

<sup>7</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; korm1111@yandex.ru

<sup>8</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; atevelev@yandex.ru

<sup>9</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia; e.krasnova@oilmsu.ru

<sup>10</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; kosorukov-vladimir@rambler.ru

<sup>11</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; samarinen@mail.ru

**Abstract.** The article considers the results of a comprehensive study of the Cretaceous-Eocene deposits of the Central Crimea (Ak-Kaya mount.). The temperature and salinity of the formation of Maastriichtian and Eocene rocks have been determined, and a correlation has been made with the global climatic event EETO (Early Eocene Climate Optimum). The synchronicity of the formation of steep submeridional fractures and the basal horizon of the Eocene has been proved. Three major stages of deformation have been identified: pre-Eocene, Eocene, and post-Eocene. It

is shown that the Eocene stage corresponds to the formation of paleoseismic dislocations during the main phase of tectonic activity in the Pontids (Eastern Turkey).

**Key words:** Central Crimea, Cretaceous, Eocene, paleoseismic dislocations, tectonic events

**For citation:** Lygina E.A., Pravikova N.V., Chizhova E.R., Tveritinova T.Yu., Yakovishina E.V., Nikishin A.M., Korotaev M.V., Tevelev A.V., Krasnova E.A. Kosorukov V.L., Samarina E.N. Eocene seismicity and paleogeography of the Central Crimea. *Moscow University Geol. Bull.* 2022: № 5; 68–77. (In Russ.).

**Введение.** Статья посвящена результатам изучения пограничных мел-палеогеновых отложений Центрального Крыма и продолжает начатые в 2016–2017 гг. исследования, итоги которых описаны в работе [Лыгина и др., 2019]. Опробован участок, соседний с исследованным ранее, на северо-западном склоне г. Ак-Кая и проведен более широкий комплекс анализа вещества. Задачей работ была проверка ранее выдвинутой версии о широком развитии эоценовых структурных преобразований в этом регионе. Последние проявились в формировании палеосейсмодислокаций в виде дизъюнктивных сейсмогенных структур в результате древних землетрясений. Последние в свою очередь отражают периодический рост крупных поднятий складчатого фундамента Крыма, связанного с тектоническими событиями в Северо-Восточной Турции [Nikishin et al., 2014].

**Материалы и методы исследований.** В основу работы положен материал, отобранный в течение полевых сезонов 2019–2020 гг. Район исследований находится в пределах Белогорско-Курской структурно-фациальной зоны (СФЗ) центральной части Предгорного Крыма [Астахова и др., 1984; Зернецкий и др., 2014], на северной окраине г. Белогорск и представляет собой скальный уступ эоценовой куэсты (рис. 1, 2).

Разрез пограничных меловых–эоценовых отложений изучен на северо-западном склоне г. Ак-Кая (45°06'49» с.ш.; 34°36'41» в.д.) в 1,25 км на север от северного окончания с. Белая Скала. Замеры трещиноватости (более 100 трещин) и отбор материала заполнения крупных трещин проведены в 760 м на юго-восток от первого обнажения (45°06'33» с.ш.; 34°37'05» в.д.) (рис. 2).

В описанном разрезе снизу вверх выделены 4 слоя (рис. 3). Слои 1, 2 отнесены к маастрихту, слои 3, 4 — к эоцену по аналогии с ранее описанным соседним обнажением [Лыгина и др., 2019].

**Слой 1.** Серые, плотные песчанистые известняки с многочисленными ходами роющих организмов, местами ожелезненные (>3 м).

**Слой 2.** Спикуловые известняки светло-серые, массивные, с примесью глауконита и кварца. В верхней части ожелезнены, биотурбированы (5 м).

Несогласная граница меловых пород и нуммулитовых известняков эоцена обнажена под нависающим карнизом куэсты. Она представлена неровной ожелезненной поверхностью твердого дна, покрытой глауконитовой коркой и пронизанной ходами роющих организмов на глубину до 0,5–0,7 м.

**Слой 3.** Нуммулитовые глауконитовые известняки с базальным конгломератом в основании (2 м).

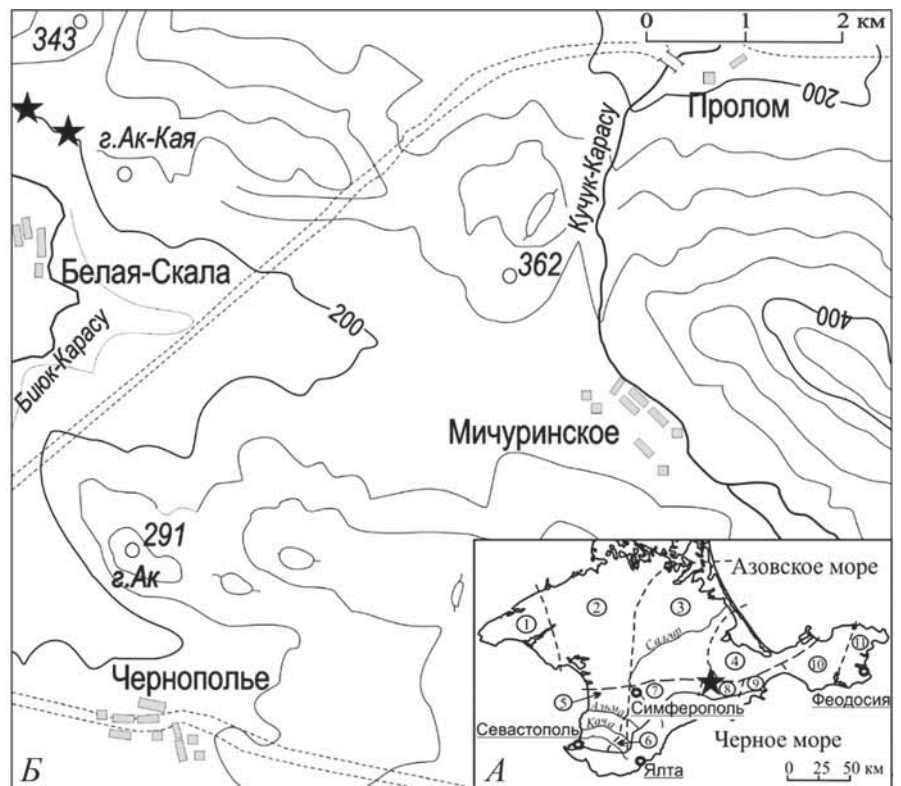


Рис. 1. Положение изученных разрезов (звездочки): А — на карте-схеме Крымского п-ова, по [Зернецкий и др., 2014]; цифры в кружках — структурно-фациальные зоны: Равнинный Крым: 1 — Тарханкутская, 2 — Сивашская, 3 — Северо-Восточная, 4 — Индольская, 5 — Юго-Западная, 6 — Бахчисарайский стратотипический район; Предгорный Крым: 7 — Симферопольская, 8 — Белогорско-Курская, 9 — Насыпкойская, Керченский район: 10 — Центральная, 11 — Восточная; Б — на топографической схеме Белогорского района Крыма, по [Лыгина и др., 2019]

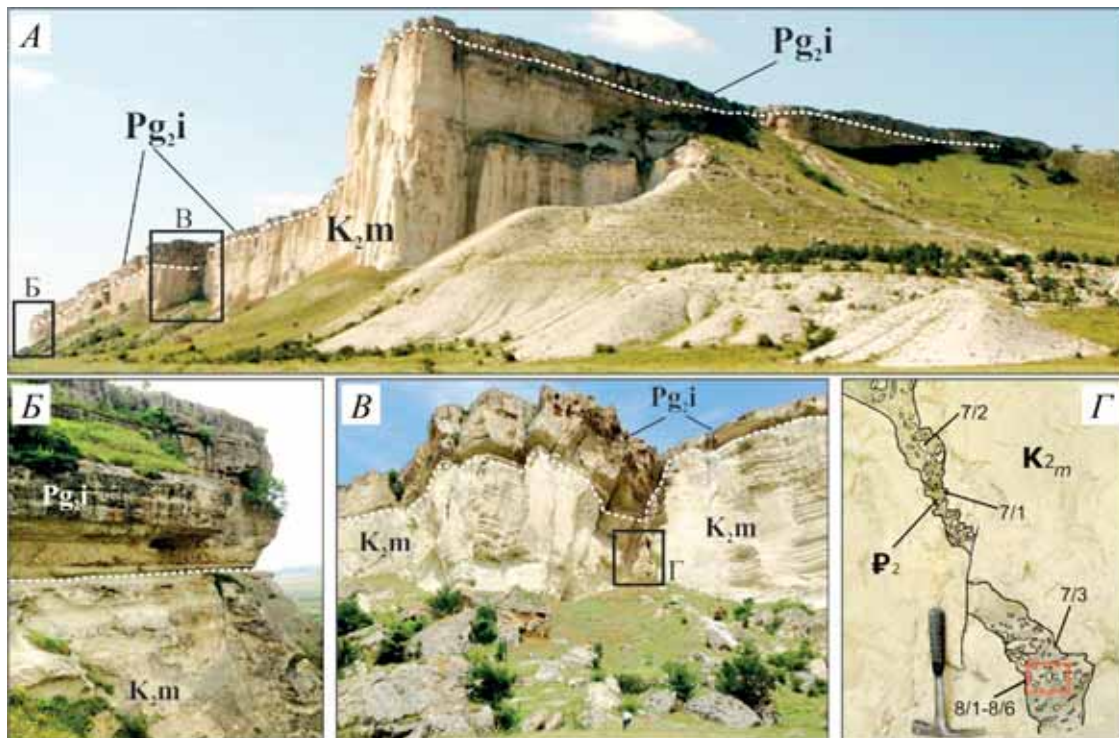


Рис. 2. Общий вид изученных обнажений пограничных мел-эоценовых отложений г. Ак-Кая. Белый пунктир — границы разновозрастных отложений, рамки с буквами — положение отдельных частей изученных обнажений на фото: А — общий вид на г. Ак-Кая с юг-юго-востока; Б, В — общий вид изученных обнажений на северо-западном склоне г. Ак-Кая (Б) и на юго-восток от него (В) (в рамке на рис. 2 В — положение крупной трещины в обнажении, см. Г); Г — фото крупной трещины с элементами дешифрирования и схемой отбора образцов

*Слой 4.* Нуммулитовые известняки органогенно-обломочные, плотные, массивные (>3 м). В слоях 3 и 4 снизу вверх количество глауконита уменьшается.

Кровля маастрихтских пород расчленена многочисленными различно ориентированными трещинами, в том числе крупными структурами отрывного типа, которые заполнены материалом, близким по составу к базальному горизонту эоцена, с обломками маастрихтских пород разного размера (рис. 2, 3).

Всего из описанных обнажений отобрано 18 образцов, из которых изготовлено 10 шлифов. Образцы отобраны из послойно описанного разреза верхней части маастрихтских пород до границы с эоценом (3 шт.), из перекрывающих нуммулитовых известняков эоцена (6 шт.), в том числе из базального горизонта (3 шт.), а также из материала, заполняющего крупные трещины в верхнемеловых отложениях (9 шт., рис. 3). Шлифы изучены под микроскопом Zeiss Lab. A1 на кафедре региональной геологии и истории Земли МГУ имени М.В. Ломоносова. В результате выделено 5 литологических типов (ЛТ) отложений, при описании которых использована классификация карбонатных пород по первично-осадочным структурам Р.И. Данема, усовершенствованная А. Эмбри и Дж. Кловеном [Уилсон, 1980]. Классификация строится на разнице соотношения микритового заполнителя и зерен (целых раковин, обломков скелетов, литокластов и др.) карбонатных пород. Она позволяет перейти к интерпретации палеогеографических обстановок с

использованием стандартных микрофаций (СМФ) и модели фациальных поясов [Уилсон, 1980], дающих достаточно полное представление о палеогеографии древнего бассейна осадконакопления.

*ЛТ1* (шлиф 3/1). Известняк спикуловый, алевритистый, органогенно-обломочный, мелко-среднеобломочный (мад-вакстоун). В породе присутствуют обломки спикул известковых губок от 0,05 до 0,6 мм (в среднем 0,2–3 мм, 20%), обломки раковин фораминифер размером до 1 см (10%) и единичные двустворок. Присутствуют зерна кварца размером до 0,05 мм (5–7%), глауконита размером около 0,3 мм (1–2%), цемент базальный (55–60%), микритовый, комковато-сгустковый, цианобактериально-водорослевый; порода сильно биотурбирована, развито ожелезнение. Литотип характеризует породы маастрихта.

*ЛТ2* (шлифы 4/2, 4/3). Известняк спикулово-фораминиферовый, алевритистый (мадстоун), органогенно-обломочный, тонкозернистый. В породе присутствуют остатки фораминифер и спикул губок (10–15%), единичные остатки двустворок, криноидей. Литотип практически идентичен ЛТ1, однако здесь содержится до 10–15% алевритовых частиц кварца (0,05–0,07 мм). Основная масса сложена кальцитовым микритом (70–75%). Встречены отдельные области с четкой границей, внутри которых в средне-мелкокристаллической кальцитовой массе присутствуют глауконит и редкие нуммулиты. К ЛТ2 относятся породы обломков твердого дна в кровле

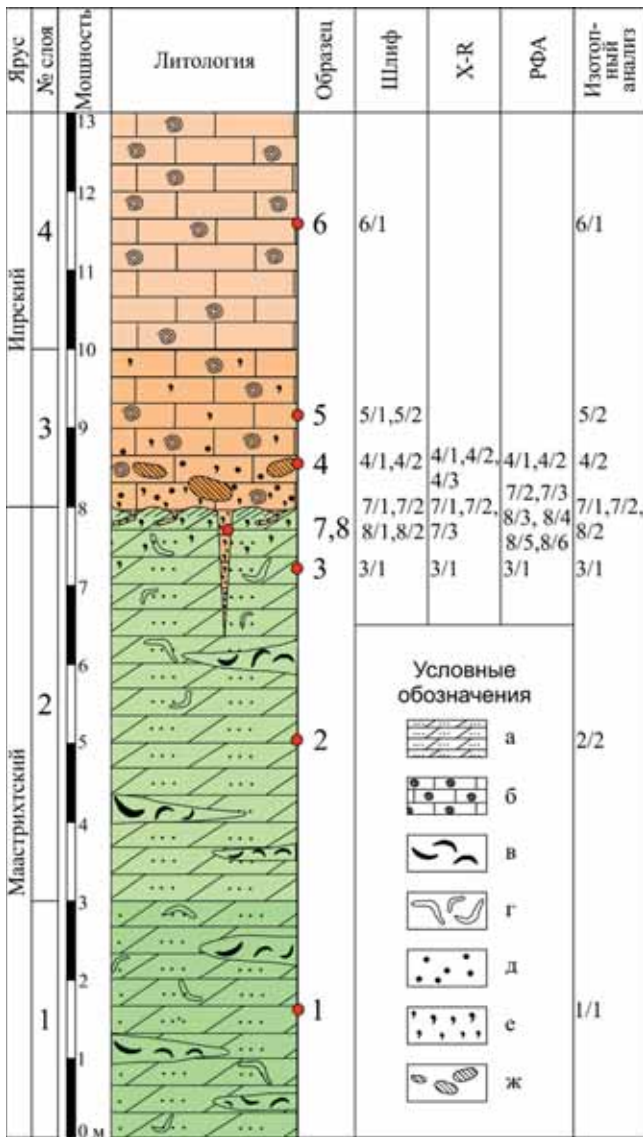


Рис. 3. Разрез пограничных мел-эоценовых отложений г. Ак-Кая со схемой отбора образцов и выполненными исследованиями: 1 — мергели алевролитистые; 2 — известняки нуммулитовые; 3 — скопления раковинного детрита; 4 — ходы роющих организмов; 5 — конкреции фосфорита; 6 — конкреции глауконита; 7 — обломки кровли пород твердого дна

маастрихтских отложений, закатанные в базальный горизонт эоценовых отложений.

Отложения ЛТ1-2 сформированы в пределах относительно глубоководной части внешнего шельфа с глубиной до нескольких сотен метров в нормально-морских водах, насыщенных кислородом [Уилсон, 1980].

ЛТ3 (шлиф 7/2). Седиментационная брекчия (рудстоун). Структура обломочная, крупнозернистая, литокласты с размерами до 1,5 см составляют до 70% породы и представлены породами, аналогичными таковым в шлифах 3/1, 4/2, 4/3 (ЛТ1-2), текстура брекчиевая. Пространство между литокластами заполнено вторичным крупнокристаллическим кальцитом (30%) со следами деформаций, с зернами глауконита размером от 0,2 мм до 0,5 мм, в некоторых местах глауконит представлен мелко-

кристаллическим цементом, отмечено ожелезнение. К ЛТ3 относятся породы, заполняющие трещины в верхней части меловых пород. Идентичность образцов маастрихтских пород и литокластов седиментационной брекчии может указывать на их разновозрастность.

ЛТ4 (шлифы 5/1, 5/2, 7/1, 8/1, 8/2). Известняк нуммулитовый глауконитовый (вак-пакстоун), биоморфный, большую часть породы составляют обломки и целые раковины крупных (20%) и единичные мелких бентосных фораминифер (от 0,1 до 22 мм, в среднем 0,9 мм), редкие крупные (более 2 см) остатки раковин двустворок, единичные обломки криноидей. Материал сгружен, плохо сортирован, присутствуют средне- и плохо окатанные зерна глауконита (40%) размером от 0,1 до 1 мм (в среднем 0,3–0,5 мм). Цемент (30%) микритовый, комковато-сгустковый, цианобактериально-водорослевый. Пористость от 5–7 до 20–30%, частично открытая и залеченная среднекристаллическим кальцитом (5–7%). К ЛТ4 относится материал, заполняющий трещины, и породы базального горизонта эоцена.

ЛТ5 (шлиф 6/1). Известняк нуммулитовый, органогенно-обломочный, с примесью глауконита (пакстоун). Структура крупно- и органогенно-обломочная, присутствуют целые раковины крупных бентосных фораминифер и их обломки (от 0,2 до 2 мм, в среднем 0,8 мм; 65–70%), обломки раковин брахиопод, зерна глауконита (0,1–0,7 мм, в среднем 0,3–0,4 мм; 2–3%). Цемент (20–25%) микритовый, комковато-сгустковый, цианобактериально-водорослевый. Отмечены следы ожелезнения по всей площади шлифа. К ЛТ5 относятся эоценовые породы, перекрывающие все вышеописанные образования.

Отложения ЛТ3, ЛТ4 и ЛТ5 накапливались на незначительной глубине (несколько десятков метров) в море с нормальной соленостью [Уилсон, 1980].

Целью проведения **рентгенофазового анализа** было уточнение и сравнение минерального состава заполняющего трещины материала и пород маастрихта. Для этого было отобрано 6 образцов из трещин, один образец из верхней части разреза маастрихта и 2 образца из базального горизонта эоценовых отложений (рис. 3, 4). В процессе анализа определялся валовый минеральный состав проб. Съёмка производилась на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М в лаборатории кафедры нефтегазовой седиментологии и морской геологии МГУ имени М.В. Ломоносова.

**Рентгено-флуоресцентный анализ.** Валовой химический состав исследованных образцов анализировали в лаборатории грунтоведения и технической мелиорации кафедры инженерной и экологической геологии МГУ имени М.В. Ломоносова. Анализ выполнен на приборе СПЕКТРОСКАН МАХ-GV (НПО «СПЕКТРОН», г. Санкт-Петербург, заводской № 4164) согласно методике выполнения измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в по-

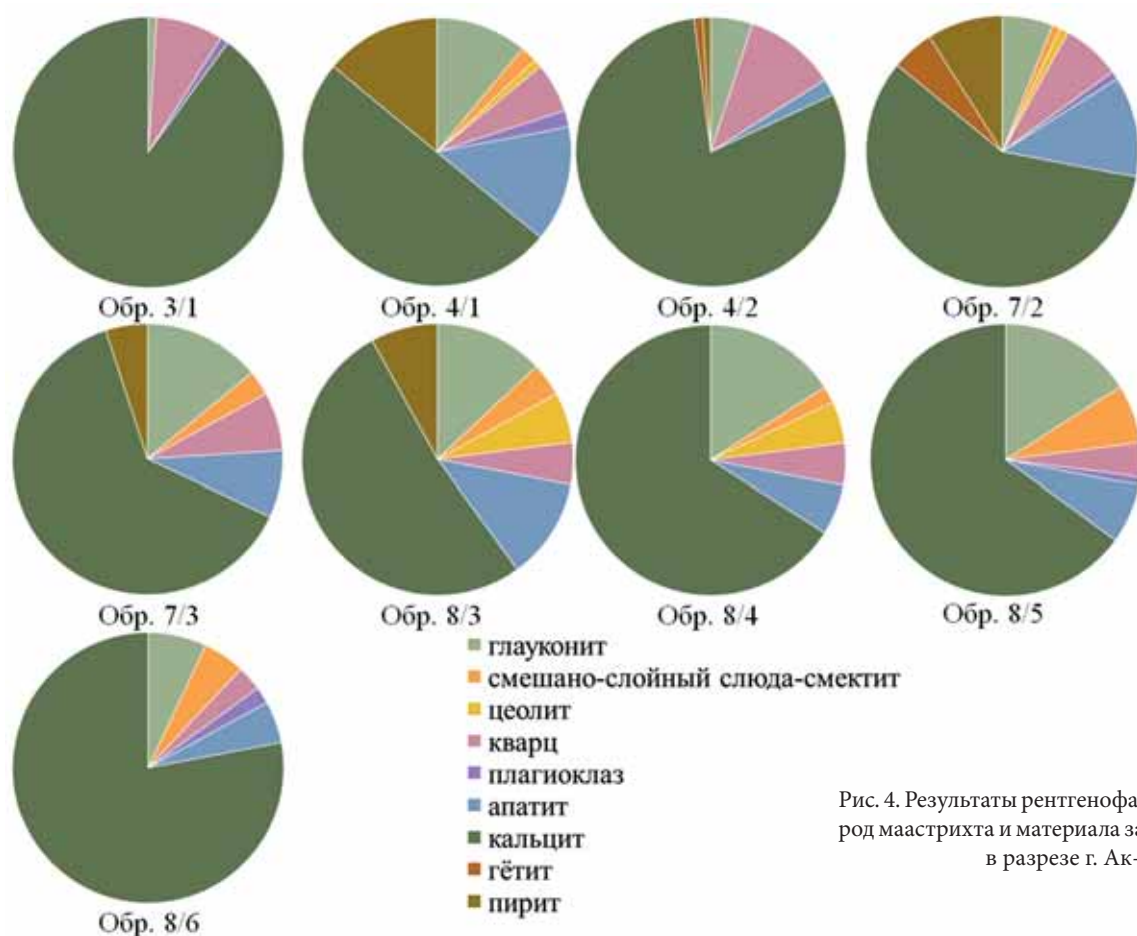


Рис. 4. Результаты рентгенофазового анализа пород маастрихта и материала заполнения трещин в разрезе г. Ак-Кая

Таблица 1

Результаты рентгено-флуоресцентного анализа маастрихтских пород и материала заполнения трещин в разрезе г. Ак-Кая

Оксиды, элементы	Единицы измерения	Номера образцов						
		7-1	7-2	7-3	3-1	4-1	4-2	4-3
SiO <sub>2</sub>	%	3,91	4,72	3,34	3,36	4,12	2,87	6,89
TiO <sub>2</sub>		0,54	0,77	0,42	0,78	0,54	0,53	0,41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		9,10	6,93	9,50	5,48	8,30	5,04	6,52
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		6,06	2,62	6,92	1,96	5,42	2,73	4,30
MnO		0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,08	0,04
CaO		29,79	27,03	30,65	46,98	40,43	44,74	42,24
MgO		1,69	1,19	1,63	0,24	1,50	1,23	1,19
K <sub>2</sub> O		3,00	2,50	3,02	2,37	2,94	1,89	2,40
Na <sub>2</sub> O		2,68	4,43	0,93	2,49	2,40	2,54	2,03
CO <sub>2</sub>		23,41	21,24	24,08	36,91	31,76	35,15	33,19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		9,66	0,23	4,42	0,16	1,38	0,81	0,86
S		0,17	0,23	0,08	0,33	0,15	0,15	0,10
summ		92,90	77,68	85,01	101,09	98,97	97,76	100,15

рошковых пробах пород методом рентгено-флуоресцентного анализа, регламентированной в методике М049-П/04 и аттестованной в соответствии с ГОСТ Р 8.563-2009 9. По данным анализа получены следующие результаты (табл. 1).

Оксиды, элементы	Единицы измерения	Номера образцов						
		7-1	7-2	7-3	3-1	4-1	4-2	4-3
Ba	ppm	–	54	–	187	–	–	–
Cr		306	370	247	388	312	259	220
Cs		9,5	11,2	9,5	13,5	12,6	9,5	7,1
Rb		77	46	97	29	75	33	58
Sc		38,5	12,7	28,8	12,7	27,9	10,0	17,1
Sr		693	439	535	650	336	309	339
V		15	11	23	18	27	11	26
Co		11,7	4,5	15,0	10,0	3,8	3,8	6,2
Cu		92	30	89	46	62	64	68
Mo		4,1	2,7	3,9	1,8	2,8	2,8	2,8
Ni		104	38	99	53	73	71	78
Zn		143	108	114	98	105	75	73
Cd		1,06	0,26	0,13	0,30	0,72	0,48	0,63
Hg		0,134	0,060	0,118	0,080	0,069	0,047	0,084
As		14,4	10,8	11,8	11,0	10,2	6,0	11,4
Sn		–	–	–	–	–	–	–
Pb	85	34	56	10	41	21	21	

Таблица 2

Результаты изотопного анализа пород маастрихта (1), эоцена (2) и материала заполнения трещин (3) в разрезе г. Ак-Кая

Номер п/п	Лабораторный номер образца	$\delta^{13}\text{C}$ , ‰, VPDB	$\delta^{18}\text{O}$ , ‰, VPDB	T пересчета	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ , 5 T, °C	S, ‰	Примечание
1	1/1	1,74	-1,63	21	-3,63	31	1
2	2/2	0,66	-2,34	25	-4,33	30	1
3	3/1	2,97	-1,02	19	-3,01	33	1
4	4/2	0,72	-1,72	22	-3,71	31	1
5	5/2	-0,16	-4,83	38	-6,82	26	2 (базальный горизонт)
6	5/2-1	0,54	-3,10	29	-5,09	29	2 (раковина)
7	5/2-2	0,40	-3,55	31	-5,54	28	2 (базальный горизонт)
8	6/1	2,36	-2,08	24	-4,07	31	2
9	7/1	1,15	-2,57	26	-4,56	30	3
10	7/2	2,45	-1,44	21	-3,43	32	3
11	8/2	1,08	-2,70	27	-4,69	29	3

Примечания. Значения солености и изотопного состава кислорода  $\delta^{18}\text{O}$  по [Bauch et al., 1995; Brezgunov et al., 1983; Brezgunov, 1990; Létolle et al., 1993].

**Изотопный состав углерода и кислорода.** Пробы отбирали точно из каждой выделяемой разности, в зависимости от количества карбонатного материала навеску брали массой от 100 до 500 мкг. Проба подверглась обработке 105% полифосфорной кислотой на линии пробоподготовки Gas Bench II, подключенной непосредственно к масс-спектрометру. Углекислый газ, выделившийся в результате реакции карбоната с кислотой, поступал в камеру масс-спектрометра, где анализировался изотопный состав углерода и кислорода в нем. Для расчета изотопного состава углерода и кислорода анализируемых образцов использован стандартный газ  $\text{CO}_2$  с известным изотопным составом. Для карбонатов изотопные значения как углерода ( $\delta^{13}\text{C}$ ), так и кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$ ) указываются в промилле относительно VPDB — аналог PDB (Pee Dee Belemnite, Belemnite Americana из известняковой формации Pee Dee, Южная Каролина). Точность измерений контролировалась по международным стандартам NBS-18 и NBS-19 с известными значениями  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ . Каждый образец анализировали 2 раза. Воспроизводимость результатов анализа, включая полный цикл пробоподготовки образцов, не вышла в среднем за пределы  $\pm 0,2\%$ . Исследования проводились в лаборатории кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых МГУ имени М.В. Ломоносова. Результаты изотопного анализа представлены в табл. 2.

На распределении изотопа  $^{18}\text{O}$  между кислородом воды и минерала, т.е. на наличии изотопного обмена между этими двумя компонентами, основан метод изотопной термометрии. Это распределение зависит от температуры осаждения: чем ниже температура, тем больше  $\delta^{18}\text{O}$  содержится в соединении, а чем выше температура, тем меньше будет отличаться изотопный состав кислорода минерала от

кислорода воды того водного резервуара, с которым он связан [Тейс, Найдин, 1973].

Значения палеотемпературы рассчитывали с использованием уравнения Эпштейна [Epstein et al., 1953] с измененными температурными коэффициентами, рассчитанными для лабораторного неорганического осаждения кальцита [Kim et al., 1997].

Увеличение содержания  $\delta^{13}\text{C}$  в изученных образцах свидетельствует о увеличении роли органического вещества в бассейне, так как живые организмы для фотосинтеза используют легкий изотоп  $^{12}\text{C}$ , а тяжелый изотоп  $^{13}\text{C}$  остается в воде и идет на постройку карбонатов, т.е. чем больше  $\delta^{13}\text{C}$ , тем выше была биопродуктивность бассейна [Галимов, 1968].

**Характеристика трещиноватости.** Вдоль всего склона горы кровля меловых пород нарушена многочисленными трещинами. Большинство из них немые, т.е. не несут признаков смещений. Кроме того, установлены структуры отрывного типа, а также сколы, сопровождающиеся зеркалами скольжения с различным направлением смещений. Для восстановления полей напряжений использованы результаты статистической обработки массовых замеров ориентировки трещин, разрывных нарушений и жильных тел с применением методики парагенетического анализа дизъюнктивных структур [Расцветаев, 1987 и др.], который позволяет выделять среди структур разрушения их определенные парагенетические семейства, связанные общностью условий формирования и отвечающие определенным этапам развития. Статистическая обработка проведена с помощью построения структурных диаграмм по стандартной методике [Курдин, 2000]. Диаграмма трещиноватости изученных отложений указывает на присутствие нескольких систем трещинных дизъюнктивов:

– послойные трещины пологого северного падения;

– различно ориентированные крутопадающие трещины неясной кинематики, ортогональные слоистости;

– две системы структур отрывного типа: крутопадающие отрывы север-северо-восточного простираения, часто сопровождающиеся дроблением и заполненные материалом, который визуально близок базальному горизонту эоцена; маломощные крутопадающие субширотные жилы;

– две системы сколовых трещин: правые сдвиги север-северо-восточного и левые сдвиги север-северо-западного простираения.

#### Результаты исследований и их обсуждение.

По результатам рентгенофазового анализа породам свойственны следующие вариации состава (рис. 4).

В образце из верхней части маастрихта (3/1) зафиксировано максимальное количество кальцита (90%). Встречается кварц (8%), отмечено минимальное количество глауконита и плагиоклаза.

В образцах из кровли маастрихта (обр. 4/1 и 4/2) количество кальцита варьирует от 50 до 80%, глауконита — от 5 до 11%, кварца — от 6 до 11%, апатита — от 2 до 14%, пирита от 1 до 14%. Максимальное количество апатита, пирита и глауконита встречено в образце 4/1, где и визуально, и в шлифах определено большое количество темноцветных зерен.

В образцах из материала, заполняющего трещины (обр. 7/2, 7/3, 8/3, 8/4, 8/5, 8/6), количество кальцита варьирует от 52 до 66%, глауконита — от 6 до 16%, кварца — от 3 до 7%, апатита — от 5 до 12%, пирита от 0 до 9%. В образцах 8/2, 8/3 определено 5–6% цеолита и 2–7% слюды-сметита.

Таким образом, породы маастрихта отличаются по валовому минеральному составу от пород заполнения трещин. По данным изотопного анализа последние наиболее близки по составу к породам базального горизонта эоценовых отложений. Наличие глауконита и апатита свидетельствует о размыве перед началом накопления эоценовых отложений, а присутствие алевритовых зерен кварца — об относительной близости источника сноса терригенного материала. Цеолит мог появиться вследствие вторичных изменений вещества при подвижках по трещинам.

Данные рентгено-флуоресцентного анализа 7 образцов из верхней части разреза маастрихта (обр. 3/1, 4/1–4/3) и материала заполнения трещин (обр. 7/1, 7/3 взяты из основной массы, обр. 7/2 — из крупного обломка, скорее всего, маастрихтского возраста) включают рассчитанные значения концентрации (ppm) 18 элементов и 11 петрогенных оксидов (масс. %, табл. 1). Для оксидов также выполнен пересчет в элементную форму. Эти данные позволили вычислить ряд отношений химических элементов и петрохимических модулей (отношений оксидов элементов), которые традиционно используются для анализа условий осадконакопления [Юдович,

Кетрис, 2000; Скляр, 2001]. Несмотря на то что изучение карбонатных отложений на основе модулей считается малоэффективным вследствие незначительного содержания большинства петрогенных оксидов и их ограниченного набора [Скляр, 2001], полученные данные позволили сравнить породы и уточнить условия среды их формирования.

Были выбраны следующие отношения элементов и петрохимические модули, для характеристики геохимии изученных пород (табл. 3): Mg/Ca, Ca/Sr, титановый (ТМ), натриевый (НМ), железный (ЖМ) модули.

По схожести модулей изученные образцы можно объединить в две группы (табл. 3): 1) породы маастрихта (образцы 3/1, 4/2, 7/2) и 2) материал заполнения трещин (образцы 7/1, 7/3, 4/1, 4/3). Последние два образца представляют собой значительно переработанные фрагменты зрелой поверхности твердого дна в кровле маастрихтских пород. По схожести значений отношения химических элементов породы также объединены в две группы: 1) материал заполнения трещин (образцы 7/1–7/3) и 2) породы маастрихта (образцы 3/1, 4/1–4/3).

Таблица 3

Отношения некоторых петрогенных оксидов и химических элементов в породах маастрихта и материале заполнения трещин в разрезе г. Ак-Кая

Показатель	Номера образцов						
	7/1	7/2	7/3	3/1	4/1	4/2	4/3
Петрохимические модули							
ТМ	0,06	0,11	0,04	0,14	0,06	0,10	0,06
НМ	0,29	0,64	0,10	0,46	0,29	0,50	0,31
ЖМ	0,63	0,34	0,70	0,32	0,62	0,51	0,63
Отношение химических элементов							
Mg/Ca	0,048	0,037	0,045	0,004	0,031	0,023	0,024
Ca/Sr	0,031	0,044	0,041	0,052	0,086	0,103	0,089

Примечания. Петрохимические модули: ТМ — титановый, НМ — натриевый, КМ — калиевый, ЖМ — железный.

Образцы первой группы имеют повышенные значения *титанового модуля* ( $TiO_2/Al_2O_3$ , ТМ), что может указывать на относительно более влажный (гумидный) климат и/или приближенность к берегу в маастрихтское время [Енгальцев, Панова, 2011]. Низкие значения ТМ в образцах второй группы могут быть связаны с длительным переывом пород твердого дна и материала, заполняющего трещины и наиболее схожего по составу с базальным горизонтом эоцена, поскольку на величину модуля влияют еще два фактора: содержание Ti в материале, поступившем в осадок, и степень механической сортировки осадочного материала [Скляр, 2001].

*Натриевый модуль* ( $Na_2O/Al_2O_3$ , НМ) относится к показателям относительного изменения глубины бассейна. Образцы первой группы отличаются повышенными значениями НМ, но в целом более низким содержанием оксида алюминия, образцы

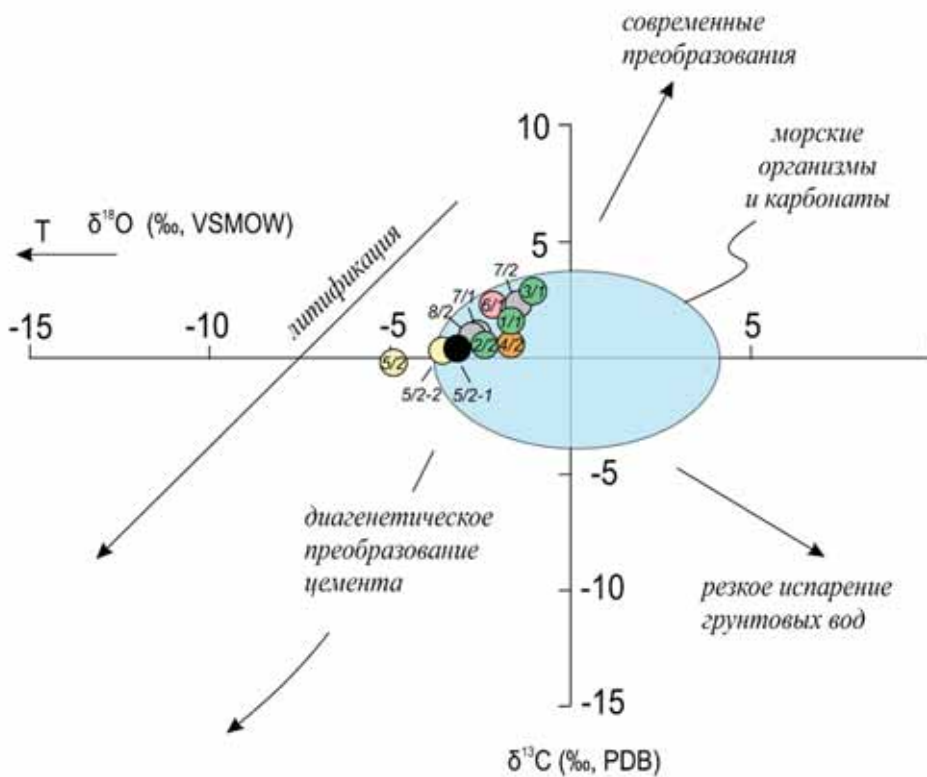


Рис. 5. График отношений изотопного состава  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  образцов маастрихтских, эоценовых пород и материала заполнения трещин в разрезе г. Ак-Кая в системе координат  $\delta^{13}\text{C}$ , ‰ / VPDB и  $\delta^{18}\text{O}$ , ‰ / VPDB. Цвет образцов: ЛТ1 — зеленый; ЛТ2 — рыжий; ЛТ4: желтый — базальный горизонт эоцена (основная масса), черный — обломки раковин двустворок из базального горизонта эоцена; серый — материал заполнения трещин (ЛТ3, ЛТ4); ЛТ5 — розовый

второй группы — примерно одинаковыми пониженными значениями НМ. Максимальные значения НМ могут характеризовать зоны открытого морского бассейна [Енгальчев, Панова, 2011].

На параметр **железного модуля** ( $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO}) / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)$ , ЖМ) могут значительно влиять железо или марганец, находящиеся в породе в сульфидной или карбонатной форме и связанные с образованием конкреций [Скляр, 2001]. Образцы второй группы обладают повышенными значениями модуля, что, скорее всего, характеризует процесс эпигенетической пиритизации при формировании зрелой поверхности твердого дна. Результаты согласуются с данными РФА.

Согласно данным работы [Chilingar, 1962], **отношение магния к кальцию** ( $\text{Mg}/\text{Ca}$ ) прямо пропорционально температуре воды, что выявлено и в искусственно осажденных карбонатах. Поскольку доломитизация в породах не отмечена (описание шлифов и данные РФА), равно как и присутствие других магнезиальных минералов, то можно предположить, что вариации отношения отражают разницу в палеотемпературных условиях осадконакопления: породы заполнения трещин (образцы 7/1–7/3) формировались при более высоких значениях температуры, чем породы маастрихта (образцы 4/1–4/3). Этот вывод соотносится с данными изотопного анализа.

Рост **отношения кальция к стронцию** ( $\text{Ca}/\text{Sr}$ ) показывает относительное увеличение солености водоема [Енгальчев, Панова, 2011]. По этому показателю схожи породы кровли маастрихта

(образцы 4/1–4/3) и материал заполнения трещин (образцы 7/1–7/3). Более высокое содержание Ca и более низкое Sr в образцах маастрихта согласуются с представлениями о мелководных условиях среды во время формирования поверхности твердого дна.

Полученные результаты **изотопного анализа** характеризуются узким интервалом значений изотопного состава кислорода ( $\delta^{18}\text{O} = -3,55 \div -1,02\%$  VPDB), изотопного состава углерода ( $\delta^{13}\text{C} = -0,16 \div +2,97\%$  VPDB) (рис. 5). Изотопный состав соответствует морским карбонатам [Фор, 1989]. Образец 5/2 имеет слабый сдвиг изотопного состава кислорода в область отрицательных значений ( $\delta^{18}\text{O} = -4,83 \div -0,16\%$  VPDB). Образец проанализирован несколько раз (5/2-1, 5/2-2): образец 5/2-1 характеризует обломки раковин двустворок, образцы 5/2 и 5/2-2 — основную массу. Изотопный состав раковин характеризуется наименее измененным составом и имеет незначительные следы литификации. По литологическому описанию образец относится к разнородному материалу с обломками раковин бентосных фораминифер, двустворок и криноидей, заполняющему трещины. Различия в изотопном составе основной массы (образцы 5/2 и 5/2-2) может фиксировать различную примесь раковин мелких бентосных фораминифер, которые могли отразить сдвиг к более морским организмам. Изотопный состав углерода близок к нулю и определяет низкую степень преобразования цемента в ходе диагенеза. Отсутствие следов литификации позволяет оценить условия образования изучаемых карбонатов. Изотопное отношение  $\delta^{18}\text{O}$  указывает на то, что



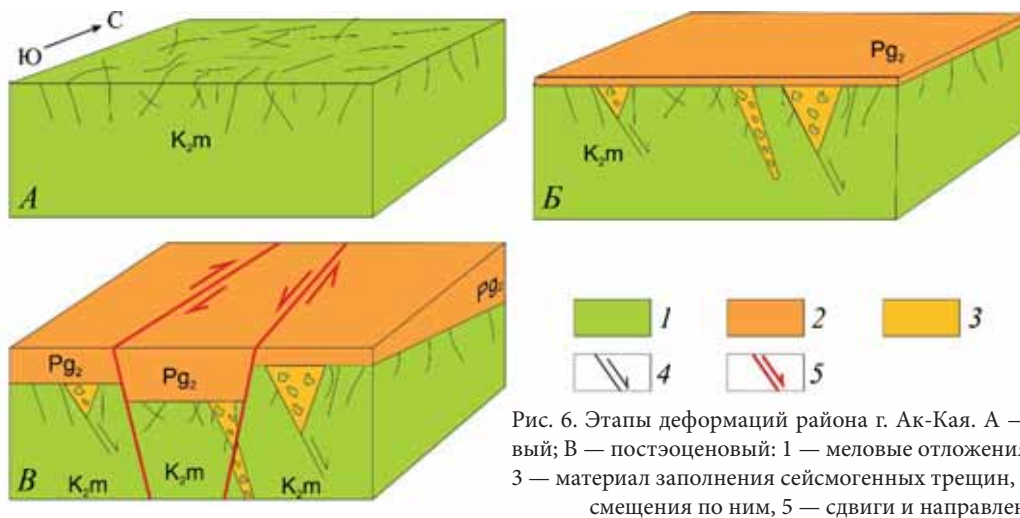


Рис. 6. Этапы деформаций района г. Ак-Кая. А — доэоценовый; Б — эоценовый; В — постэоценовый: 1 — меловые отложения, 2 — эоценовые отложения, 3 — материал заполнения сейсмогенных трещин, 4 — трещины и направления смещения по ним, 5 — сдвиги и направления смещения по ним

температура осаждения карбонатного материала составляла около  $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ , это коррелирует с известным мировым событием понижения значений  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$  и увеличения температуры в начале эоцена (ЕЕСО) [Westerhold et al., 2020]. В сочетании с крайней мелководностью образования изученных пород это могло дать столь заметные повышенные значения палеотемпературы. В свою очередь это позволяет датировать и тектоническое событие, приведшее к появлению палеосейсмодислокаций, началом ипра, что согласуется с ранее высказанными выводами о проявлении фазы тектонической активности в это время в Центральном Крыму [Лыгина и др., 2019].

Данные изотопного анализа подтверждают литологические наблюдения, а результаты рентгено-флуоресцентного анализа и РФА — схожесть образцов заполнения трещин (образец 7/2) с породами маастрихта (например, образцы 1/1, 3/1).

Полученные значения температуры образования пород (данные о  $\delta^{18}\text{O}$ ) маастрихта (образцы 1/1, 2/2, 3/1, 4/2, 7/2) согласуются с данными ранее опубликованных работ [Бадулина и др., 2016] и составляют около  $19\text{--}22\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Разница в значениях  $\delta^{13}\text{C}$  в этих же образцах может отражать разную степень переработки/биотурбации осадка, что соответствует натурным наблюдениям. Более низкими значениями  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  отличается образец 2/2, который взят из обломка раковины двустворки. Породы маастрихта формировались в море с несколько пониженной соленостью ( $30\text{--}33\%$ ), что также хорошо коррелирует с рассчитанными значениями палеотемпературы.

Образец эоценовых пород из разреза (6/1) и два образца пород заполнения трещины (7/1, 8/2) характеризуются близкими значениями изотопного состава  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ , что доказывает предположение о заполнении трещин породами базального горизонта эоцена. Получившиеся колебания солености морских вод ( $29\text{--}31\%$ ) ниже, а температуры (около  $24\text{--}27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) выше, чем в маастрихте, что отвечает накоплению пород во время события ЕЕСО [Westerhold et al., 2020].

**Восстановление полей напряжений.** По результатам парагенетического структурного анализа [Расцветаев, 1987] выделено несколько парагенезисов трещин: 1) крутопадающие (ортогональные слоистости) трещины различной ориентировки; 2) крутопадающие трещины растяжения (в том числе кластические дайки) север-северо-восточного простирания; 3) крутопадающие сколовые правые сдвиги север-северо-восточного и левые сдвиги север-северо-западного простирания и дополняющие их субширотные отрывы.

Каждая выделенная группа трещин отвечает определенному этапу деформаций (рис. 6).

**Доэоценовый этап** — формирование трещиноватости меловых отложений, в том числе литогенетической трещиноватости пород в виде пояса ортогональных слоистости крутопадающих трещин различной ориентировки.

**Эоценовый этап** — формирование крутопадающих трещин отрыва субмеридиональной (север-северо-восточной) ориентировки в условиях субмеридионального сжатия и субширотного растяжения. Описываемые трещины близки к сейсмически индуцированным трещинам из эпицентральных областей древних и современных землетрясений [Лунина, 2016], их можно интерпретировать как древние сейсмогенные разрывы (палеосейсмодислокации), сформировавшиеся в результате сильного палеоземлетрясения. В это же время на фоне роста сооружения Горного Крыма, вероятно, формировались более крупные сбросо-раздвиговые системы в виде грабенов и полуграбенов. Этот этап может быть связан с формированием орогенного комплекса Понтид на севере современной Турции [Лыгина и др., 2019]. В эоцене в условиях максимальной компрессии началось формирование моноклиальной структуры Второй гряды Крымских гор [Никишин и др., 2001].

**Постэоценовый этап** — формирование сдвигающих эоценовые отложения двух сопряженных систем сдвигов и закономерно с ними связанных

отрывов осуществлялось в условиях пологих субширотного сжатия и субмеридионального растяжения на фоне продолжающегося новейшего роста сооружения Горного Крыма. Этап характеризуется формированием крупных грабенообразных структур.

**Выводы.** 1. Морфология и данные изучения материала заполнения крутых субмеридиональных трещин позволяют отнести их к палеосейсмодислокациям, возникшим в результате крупных землетрясений прошлого. Материал, заполняющий трещины, наиболее близок породам базального горизонта эоценовых отложений, что подтверждается данными микроскопического изучения, РФА, рентгено-флуоресцентного и изотопного анализов. Отдельные обломки аналогичны по составу породам кровли маастрихта. Эти данные свидетельствуют о заполнении крутых субмеридиональных трещин и, соответственно, о проявлении палеосейсмического события синхронно с накоплением базального горизонта эоцена.

2. Средняя температура формирования пород маастрихта составляла 19–22 °С, эоценовых пород — 24–27 °С. Зафиксированное повышение

средней температуры до 29–31 °С и даже до 38 °С во время формирования базального горизонта эоцена может быть связано с глобальным климатическим событием ЕЕСО. Это уточняет возраст накопления базального горизонта и, соответственно, время формирования палеосейсмодислокаций — самое начало эоцена, что совпадает с проявлением фазы тектонической активности в Понтидах (Восточная Турция).

3. В формировании современной структуры г. Ак-Кая выделено три крупных этапа деформаций: 1) доэоценовый — формирование в меловых отложениях исходной, в том числе литификационной трещиноватости; 2) эоценовый — формирование конседиментационных отрывов, в том числе палеосейсмодислокаций, в условиях субмеридионального сжатия; 3) постэоценовый — формирование грабенообразных структур при горизонтальных смещениях по крутым сдвигам в условиях субширотного сжатия и субмеридионального растяжения.

**Финансирование.** Работа выполнена с использованием материалов ЦКП Геопортал МГУ имени М.В. Ломоносова.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бадулина Н.В., Яковишина Е.В., Габдуллин Р.Р. и др. Литолого-геохимическая характеристика и условия формирования верхнемеловых отложений Северного Пирететиса // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 2016. Т. 91, вып. 4–5. С. 136–147.

Галимов Э.М. Геохимия стабильных изотопов углерода. М.: Недра, 1968. 226 с.

Курдин Н.Н. Структурные диаграммы (составление и основные приемы обработки; Учеб.-метод. пособие по курсу «Структурная геология и геологическое картирование»). М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 28 с.

Лунина О.В. Разломы и сейсмически индуцированные геологические процессы на юге Восточной Сибири и сопредельных территориях. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 226 с.

Лыгина Е.А., Никишин А.М., Тверитинова Т.Ю. и др. Эоценовые палеосейсмодислокации горы Ак-Кая (Белогорский район, Крым) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2019. № 1. С. 44–54.

Никишин А.М., Коротаев М.В., Болотов С.Н., Ершов А.В. Тектоническая история Черноморского бассейна // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 2001. Т. 76, вып. 3. С. 3–18.

Расцветов Л.М. Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений // Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. Ч. 2. М.: Наука, 1987. С. 173–229.

Уилсон Дж.Л. Карбонатные фации в геологической истории / Пер. с англ. М.: Недра, 1980, 463 с.

Фор Г. Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989, 590 с.

Bauch D., Schlosser P., Fairbanks R.F. Freshwater balance and the sources of deep and bottom waters in the Arctic Ocean

inferred from the distribution of  $H_2^{18}O$  // Progress Oceanogr. 1995. Vol. 35. P. 53–80.

Brezgunov V.S. Study of water exchange in sea-river water mixing zones using the isotopic composition-salinity diagram // Nuclear Geol. 1990. Vol. 4, N 1. P. 71–77.

Brezgunov V.S., Debolskii V.K., Nechaev V.V. et al. Characteristics of the formation of the oxygen isotope composition and salinity upon mixing of sea and river waters in the Barents and Kara Seas // Water Resour. (Transl. of Vodnye Resursy), 1982, N 9. P. 335–344; 1983, N 4. P. 3–14.

Chilingar G.V. Dependence on temperature of Ca/Mg ratio of skeletal structures of organisms and direct chemical precipitates out of sea water // Bull. S. Calif. Acad. Sci. 1962. Vol. 61. P. 45–60.

Epstein S., Mayeda T. Variations of  $^{18}O$  content of waters from natural sources // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1953. Vol. 4, N 5. P. 213–224.

Létolle R., Martin J., Thomas A. et al.  $^{18}O$  abundance and dissolved silicate in the Lena delta and Laptev Sea (Russia) // Marin. Chemistry. 1993. Vol. 43. P. 47–64.

Nikishin A.M., Okay A., Tüysüz O. et al. The Black Sea basins structure and history: New model based on new deep penetration regional seismic data. P. 2. Tectonic history and paleogeography // Marin. and Petrol. Geol. 2014. Vol. 59. P. 1–15. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.08.018>

Westerhold T., Marwan N., Drury A.J. et al. An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years // Science. 2020. Vol. 369. P. 1383–1387.

Статья поступила в редакцию 01.05.2021, одобрена после рецензирования 12.07.2021, принята к публикации 12.07.2022