



УДК 550.2:551.763.3:550.384

Циклостратиграфический анализ петромагнитных данных по маастрихту долины р. Бодрак (Юго-Западный Крым)

А. М. Суринский, А. Ю. Гужиков

Суринский Арсений Михайлович, кандидат геолого-минералогических наук, ассистент, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, arsur91@yandex.ru

Гужиков Андрей Юрьевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, aguzhikov@yandex.ru

Проведено измерение удельной магнитной восприимчивости у 2232 образцов, отобранных в разрезах маастрихта Чахамалы и Такма (Юго-Западный Крым, долина р. Бодрак) через каждые 20 см мощности. Путем Фурье-преобразования и вейвлет-анализа вертикальных последовательностей петромагнитных данных выявлены циклы, предположительно соответствующие периодам большого и малого эксцентриситетов земной орбиты, и изменение угла наклона земной оси относительно эклиптики. Рассчитана средняя скорость формирования изученных отложений – 11.7 см/тыс. лет.

Ключевые слова: верхний мел, маастрихт, циклостратиграфия, петромагнетизм, магнитная восприимчивость, циклы Миланковича, Фурье-преобразование, вейвлет-анализ, Крым.

Cyclostratigraphic Analysis of the Rock Magnetic Data on Maastrichtian of the Bodrak River (SW Crimea)

A. M. Surinskiy, A. Yu. Guzhikov

Arseniy M. Surinskiy, <https://orcid.org/0000-0003-4892-3392>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, arsur91@yandex.ru

Andrey Yu. Guzhikov, <https://orcid.org/0000-0002-0579-3981>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, aguzhikov@yandex.ru

Measurements of mass magnetic susceptibility of 2 232 samples, collected in Takma and Chakhmakhly sections (SW Crimea, Bodrak river) through every 20 cm of thickness were conducted. The cycles, supposedly corresponding to the periods of long and short eccentricities of Earth orbit and its axis obliquity were detected by Fourier transform and wavelet analysis of obtained data. The average sedimentation rate (11.7 cm/kyr) was calculated.

Key words: Upper Cretaceous, Maastrichtian, cyclostratigraphy, rock magnetism, magnetic susceptibility, Milankovitch cycles, Fourier transform, wavelet analysis, Crimea.

DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-3-206-211>

Введение

В 2016–2018 гг. проведено детальное петромагнитное изучение двух разрезов маастрихта



Юго-Западного Крыма – Чахамалы и Такма – с целью выявления в стратиграфической летописи астрономических циклов известной длительности. Оба разреза расположены в пределах Внутренней (Второй) гряды Крымских гор в долине р. Бодрак на территории Бахчисарайского района (рис. 1).

Разрез Чахамалы (обнажение 3111: 4°46'58" с.ш., 33°57'52.3" в.д.) находится близ с. Трудолюбовка, сложен белыми мелоподобными мергелями в нижней части и светло-серыми слабоалевритистыми мергелями – в верхней. Подробное литологическое описание разреза и обоснование возраста пород опубликовано ранее А. С. Алексеевым (Alekseev) и Л. Ф. Копаевич (Kopaevich) [1].

Разрез Такма (обнажение 3110: 44°48'21" с.ш., 34°00'03" в.д.) находится у с. Скалистое Бахчисарайского района примерно в 4 км к северо-востоку от разреза Чахамалы. Оба разреза очень схожи в литологическом отношении. Детальное описание разреза Такма приведено в работе Б. И. Сизанова, А. В. Рудаковой, Р. Р. Габдуллина [2].

Магнитостратиграфическое изучение этих разрезов ранее было проведено А. А. Гужиковой [3]. В процессе палеомагнитных исследований проводилось также измерения магнитной восприимчивости, которое, однако, оказалось нерепрезентативным с точки зрения циклостратиграфического анализа данных. Поэтому в 2016–2017 гг. в разрезах Чахамалы и Такма был проведен повторный, более детальный отбор неориентированных образцов, предназначенных для измерения только магнитной восприимчивости.

Методика работ

В основе циклостратиграфических исследований лежит принцип, подразумевающий наличие связи между процессами осадконакопления и вариациями орбитальных параметров Земли, известных как циклы Миланковича [4]. Наличие подобной связи определяется климатическими изменениями, которые, будучи обусловленными перераспределением инсоляции вследствие астрономических факторов, влияют на характер седиментации.

Использование петромагнитных данных как индикаторов циклов Миланковича популярно при анализе разрезов осадочных толщ благодаря оптимальному сочетанию их высокой геологической информативности с экспрессностью определе-

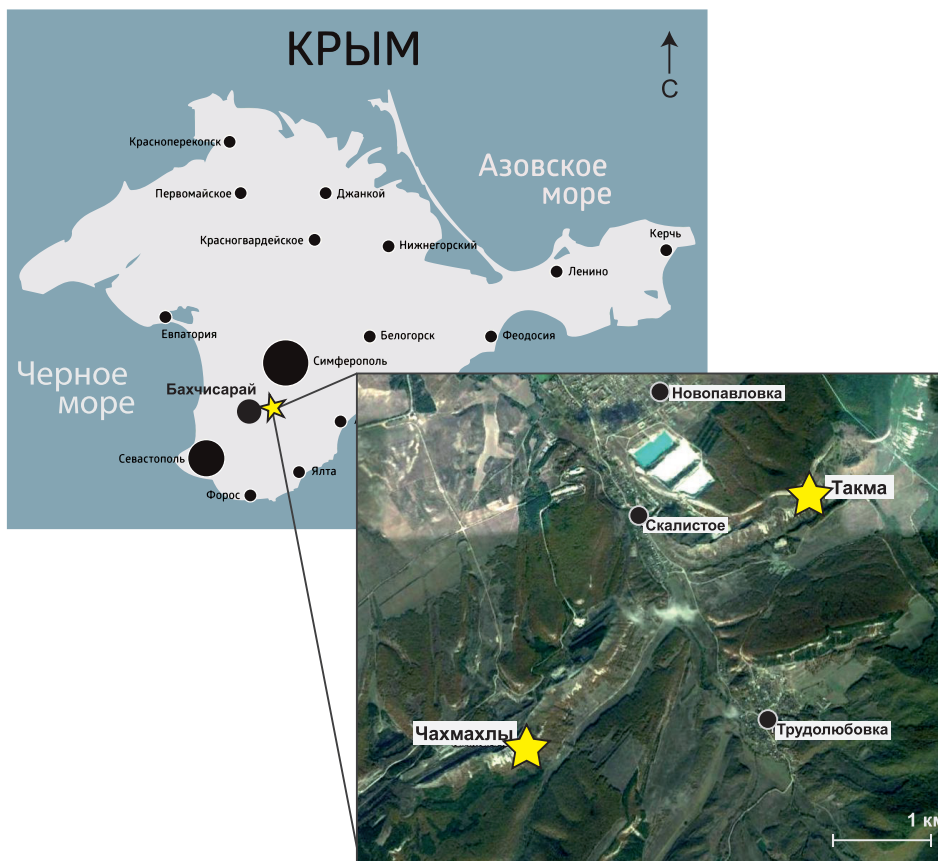


Рис. 1. Схема расположения изученных разрезов маастрихта (разрезы обозначены звездочками)

ний [5, 6]. Магнитная восприимчивость (K) – величина, пропорциональная концентрации пара- и ферромагнитных минералов в породе. Как было установлено ранее [3], в карбонатных отложениях, слагающих разрезы Чухмахлы и Такма, значения K определяются в основном концентрацией ферромагнитного материала пелитовой размерности космогенного генезиса. Петромагнитные вариации по разрезам связаны с изменением активности аллотигенного привноса и/или разной степенью разубоживания метеоритной пыли в карбонатной матрице за счет колебаний скорости образования кальцита [7]. Алевритистость мергелей указывает на наличие расположенной неподалеку суши, поэтому в данном случае при циклостратиграфической интерпретации данных за основу принята модель, в которой вариации магнитной восприимчивости обусловлены главным образом изменениями интенсивности терригенного привноса вследствие колебаний уровня моря.

Нами измерена удельная магнитная восприимчивость у 2232 образцов, равномерно взятых с 457 и 287 уровня в разрезах Чухмахлы и Такма соответственно через каждые 20 см мощности. С каждого уровня было взято по три образца весом 6–12 г, по которым рассчитаны средние значения магнитной восприимчивости (K_{cp}). Измерение K проводилось на каппабридже МФК-1В, а взвешивание образцов – на электронных весах ВК-300.

Фурье-преобразованию и вейвлет-анализу были подвергнуты сглаженные вертикальные последовательности значений K_{cp} . Сглаживание путем осреднения в скользящем окне (размером от 40 до 120 см), перемещаемом по разрезу с шагом 20 см, проводилось с целью подавления шумов – единичных выбросов и нерегулярных высокочастотных колебаний. Оптимальным с точки зрения качества результатов спектрального анализа оказался размер окна 80 см. Перерывы в осадконакоплении произвольной длительности не сказываются существенно на спектральной характеристике ряда, если число гиатусов гораздо меньше количества циклов [6].

С учетом возможной разницы в темпах формирования отложений спектральный анализ проводился как по разрезам в целом, так и по разным их частям. В общей сложности были испробованы десятки вариантов разбиения сводной кривой K_{cp} по разрезу на интервалы, которые по отдельности подвергались Фурье-преобразованию и вейвлет-анализу. Для циклостратиграфической интерпретации использовались спектрограммы и вейвлет-диаграммы лучшего качества, но только в тех случаях, когда применение разных методов приводило к сходным результатам. Исключение трендов из последовательностей K_{cp} , выявляемых с помощью линейной регрессии, не приводило к улучшению результатов спектрального анализа,



что свидетельствует о преимущественно циклической природе петромагнитных вариаций по разрезам.

Результаты работ

По разрезу Чахмахлы лучшие результаты были получены при отдельном анализе данных по нижней и верхней частям разреза, граница между которыми отмечена наиболее резким изменением в характере петромагнитного графика (уровень образца 3111/276) – появлением устойчивого тренда к росту значений магнитной восприимчивости (рис. 2).

Спектрограммы по нижней и верхней частям разреза аналогичны друг другу в плане кратности частот трех главных пиков: в обоих случаях высокая частота превышает среднюю в 2–2.2 раза, которая, в свою очередь, превышает низкую частоту в 4–4.2 раза (таблица, см. рис. 2). Таким образом, наиболее длинные периоды, отвечающие этим частотам, соотносятся как ~4 : 1, что совпадает с кратностью циклов Миланковича, соответствующих большому (~400 000 лет) и малому (~100 000 лет) циклам эксцентриситета земной орбиты (E2 и E1 соответственно). Кратность более коротких периодов (2.2 и 2 в нижней и верхней частях разреза соответственно) отличается, но не сильно, от величины 2.5, представляющей собой отношение продолжительности цикла E1 к длительности цикла O (Obliquity) – наклона оси вращения Земли к эклиптике (~40 000 лет). Аналогичные частоты (и, соответственно, периоды) четко выделяются и на вейвлет-диаграммах (см. рис. 2). В отличие от спектрограмм, свидетельствующих лишь о наличии в спектре сигнала определенной частоты, вейвлет-диаграммы визуализируют интервалы разреза, в которых циклы проявлены наиболее или наименее отчетливо. Так, циклы E2 с одинаковой степенью выразительности прослеживаются по всей исследованной толще, а циклы E1 чуть хуже проявлены в нижней части разреза (см. рис. 2). Более высокочастотные (короткопериодные) сигналы, как правило, подавляются шумовыми помехами, но в данном случае цикличность, отождествляемая нами с изменением угла наклона земной оси, хорошо заметна (см. рис. 2). Разная степень отчетливости, с которой проявлены циклы O в разрезе, неудивительна, если учитывать множество реальных факторов, искажающих идеальные представления о равномерности скорости осадконакопления и единственном источнике ферромагнитного материала, на которых базируется принятая нами модель формирования отложений. Та же многофакторность, вероятно, является причиной существенного отличия показателей отношения длительности выявленных в разрезе циклов (2.0–2.2) от теоретической кратности E1 и O (2.5).

По разрезу Такма (рис. 3) хорошие с точки зрения циклостратиграфического анализа результаты получаются только при исключении

Циклостратиграфические характеристики разрезов маастрихта долины р. Болрак (Юго-Западный Крым)

Разрез	Интервал разреза	Данные о цикличности												V_{cp} (см/тыс. лет)
		E2 (t = 400 000 лет)			E1 (t = 100 000 лет)			O (t = 40 000 лет)			Кратность циклов			
		$T=1/v$ (м)	n	V (см/тыс. лет)	$T=1/v$ (м)	n	V (см/тыс. лет)	$T=1/v$ (м)	n	V (см/тыс. лет)	T_{E2}/T_{E1}	T_{E1}/T_O		
Чахмахлы (обн. 3111)	55.2–91.2 м (обр. 277–457)	33.3	1.1	8.3	8.0	4.5	8.0	4.0	9.0	10.0	4.2	2.0	8.7	
	0.0–55.2 м (обр. 1–276)	52.6	1.0	13.1	13.3	4.1	6.1	9.1	15.1	4.0	2.2	13.9		
Такма (обн. 3110)	0.0–49.8 м (обр. 1–249)	50.0	1.0	12.5	12.5	3.9	5.0	10.0	12.5	4.0	2.5	12.5	12.5	

Примечание. E2, E1, O – циклы Миланковича (большого эксцентриситета, малого эксцентриситета и изменения угла наклона земной оси соответственно); t – продолжительность цикла; T, v – период и частота цикла соответственно; n – количество циклов в разрезе; V – скорость осадконакопления, определяемая для каждого цикла как отношение мощности к произведению $n \times t$; $V_{cp} = (V_{E2} + V_{E1} + V_O)/3$ – средняя скорость осадконакопления.

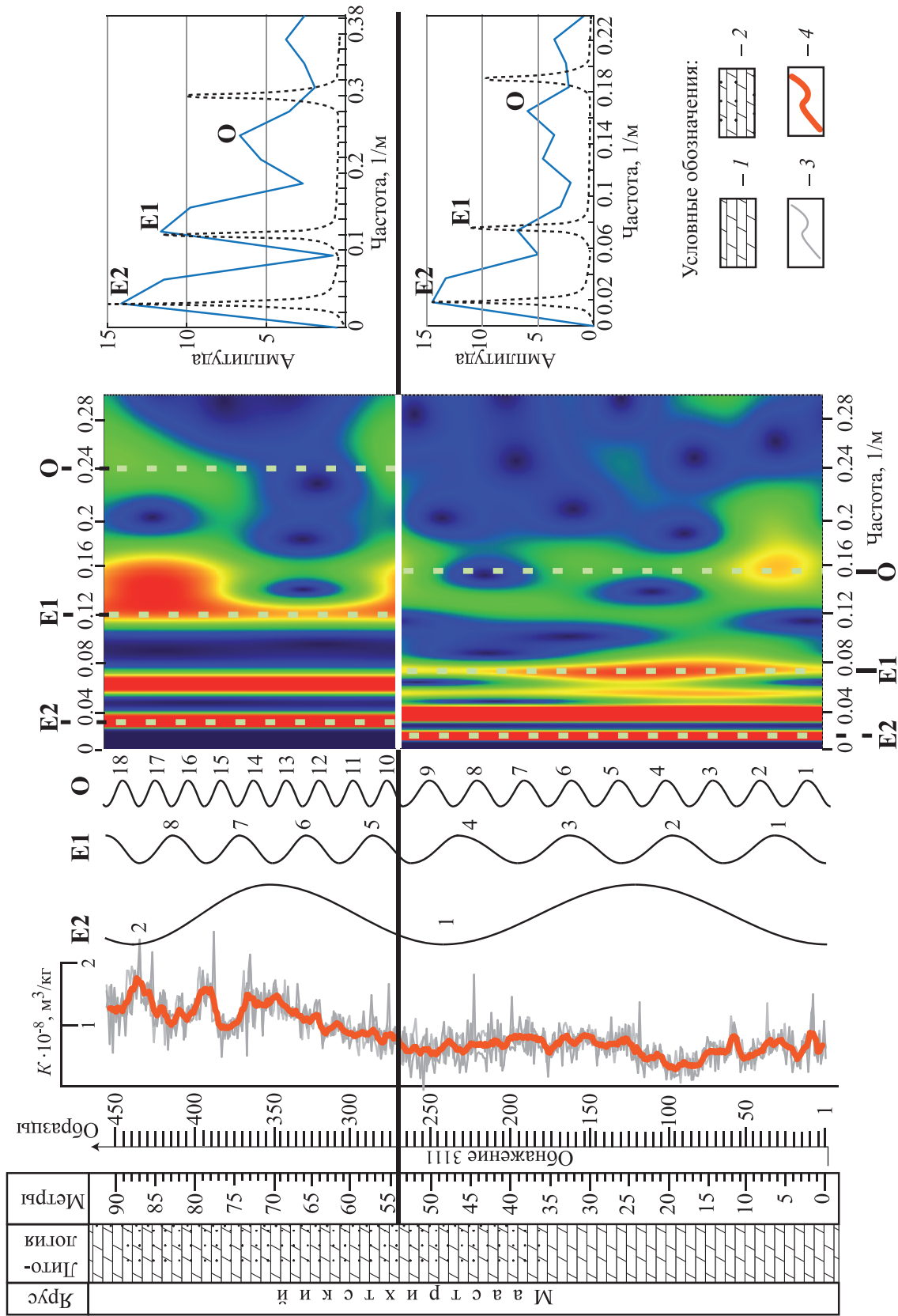


Рис. 2. Петромагнитная, циклостратиграфическая и спектральная (вейвлет-диаграмма и спектральные при анализе вертикальных рядов K_{cp}) характеристика разреза маастрихта Чахмахлы. На спектрограммах пунктиром вынесены спектры функции, являющейся суммой идеальных циклов **E1**, **E2** и **O1** с кратностью частот (1 : 4 : 10): 1 – мергель; 2 – алевролитистый мергель; графики удельной магнитной восприимчивости; 3 – измеренных значений K ; 4 – осредненных значений K .

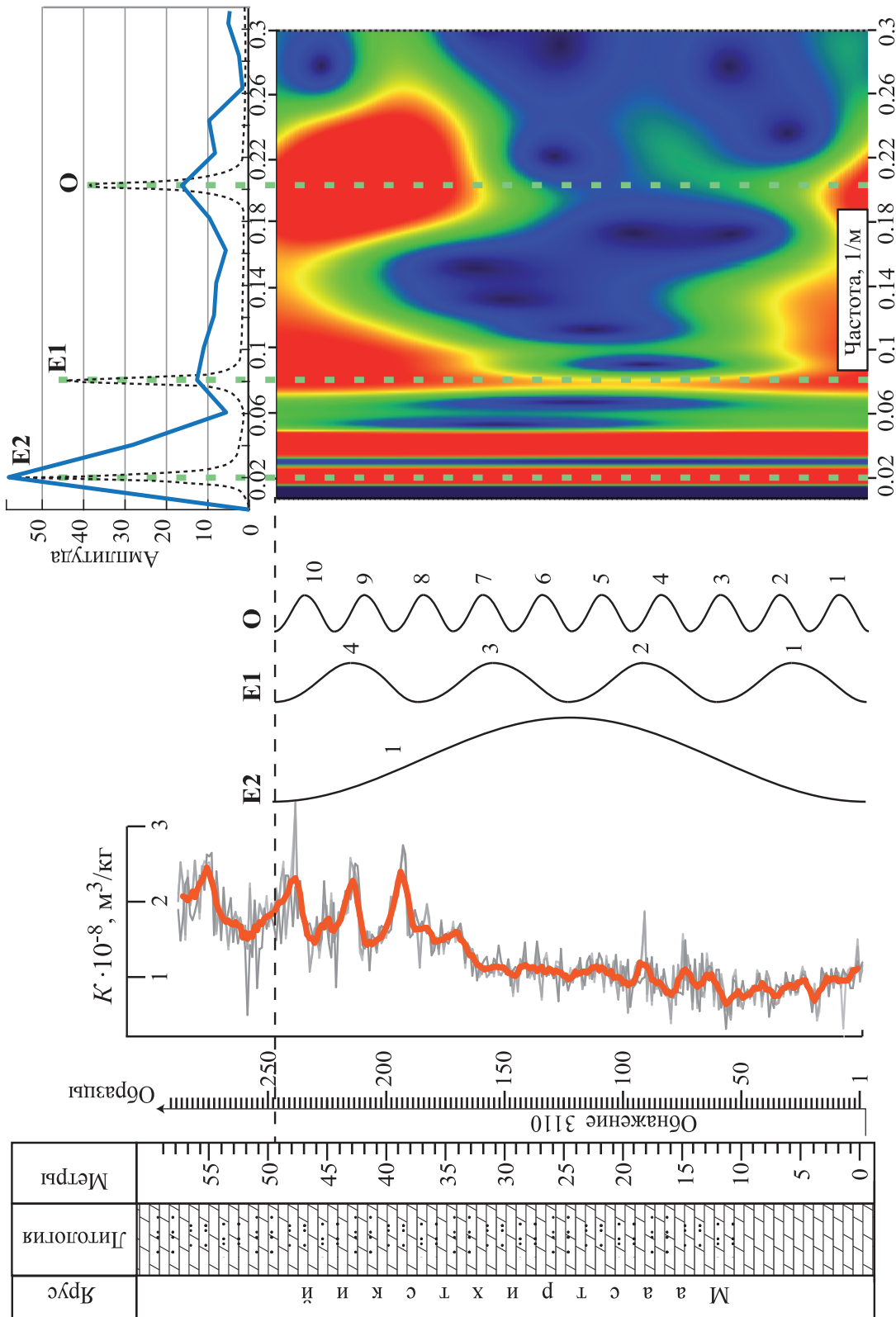


Рис. 3. Петромагнитная, циклостратиграфическая и спектральная (вейлет-диаграмма и спектрограмма, полученные при анализе вертикальных рядов K_{sp}) характеристистики разреза маастрихта Такма. На спектрограммах пунктиром вынесены спектры функции, являющейся суммой идеальных циклов E1, E2 и O1 с кратностью частот (1 : 4 : 10). Условные обозначения см. рис. 2



из рассмотрения петромагнитных данных по верхам разреза мощностью ~7 м (выше уровня обр. 3110/249). Причиной этого может быть значительное отличие скорости формирования верхов изученной толщи от среднего темпа седиментации, характерного для нижележащих отложений.

Результаты спектрального анализа значений K_{cp} по основной части разреза (уровень обр. 3110/1–3110/249) обнаруживают кратность периодов, соответствующих главным частотным пикам на спектрограммах, выражающуюся отношениями 4 : 1 и 2.5 : 1, что совпадает с теоретическими кратностями периодов **E2**, **E1** и **E1**, **O** соответственно (см. таблицу). Выявленные Фурье-преобразованием частоты весьма выразительно прослеживаются на вейвлет-диаграмме по всей толще. Качество сигнала, обусловленного изменением угла наклона земной оси, при этом предсказуемо хуже, чем у колебаний большого и малого эксцентриситетов, но гораздо лучше качества сигналов **O**, зарегистрированных в разрезе Чахмахлы.

Судя по результатам циклостратиграфической интерпретации данных спектрального анализа, отложения в интервале между уровнем образцов 1 и 249 в разрезе Такма образовались за период, почти равный длительности цикла **E2** или четырех циклов **E1**, или 10 циклов **O** (см. рис. 3), т. е. за ~0.4 млн лет. Поскольку кратности выявленных циклов совпали с теоретическими отношениями **E2** : **E1** и **E1** : **O** (4 : 1 и 2.5 : 1 соответственно), то и скорости осадконакопления, рассчитанные путем деления мощности исследуемой толщи на суммарную продолжительность **E2** либо **E1**, либо **O**, практически не отличаются друг от друга (см. таблицу). Средний темп формирования маастрихтской толщи мощностью 49.8 м получается при этом равным ~12.5 см/тыс. лет (см. таблицу).

Иная ситуация зафиксирована в разрезе Чахмахлы, где отношения длительностей разных периодов отличаются от теоретических значений, причем в случае **O** это отличие значительно (2–2.2 вместо 2.5) (см. таблицу). Поэтому при делении мощностей на продолжительность разных циклов и скорости осадконакопления будут получаться разными (см. таблицу). В качестве итоговых оценок скоростей формирования отложений нами взяты средние арифметические значения скоростей, рассчитанных по циклам **E2**, **E1** и **O** (см. таблицу). Средние скорости осадконакопления для нижних и верхних частей разреза Чахмахлы составили 13.9 см/тыс. лет и 8.7 см/тыс. лет соответственно (см. таблицу).

Выводы

Предложенные нами циклостратиграфические модели разрезов Чахмахлы и Такма, базирующиеся на результатах спектрального анализа вертикальных рядов магнитной восприимчивости, позволили выявить циклы Миланковича и дать количественную оценку скоростей формирования отложений. Согласно полученным данным, скорости карбонатного осадконакопления в маастрихте Юго-Западного Крыма варьируют от 8.7 до 13.9 см/тыс. лет, составляя в среднем 11.7 см/тыс. лет.

Благодарности

Авторы выражают благодарность А. С. Караваяеву (факультет нано- и биомедицинских технологий СГУ) за консультации при проведении математической обработки данных, а также В. А. Грищенко, А. А. Гужиковой, А. Г. Маникину (геологический факультет СГУ) за участие в левом изучении разрезов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-00784-а).

Библиографический список

1. Alekseev A. S., Kopaevich L. F. Foraminiferal biostratigraphy of the uppermost Campanian-Maastrichtian in SW Crimea (Bakhchisaray and Chakhmakhly sections) // Bull. Inst. Roy. Sci. Natur. Belgique. Sci. Terre. 1997. Vol. 67. P. 103–118.
2. Сизанов Б. И., Рудакова А. В., Габдуллин Р. Р. Новая методика выделения ритмов и интерпретация их генезиса на примере нижнемаастрихтских отложений оврага Такма (Юго-Западный Крым, Украина) // Вестник Московского университета. Сер. 4, Геология. 2006. № 3. С. 25–31.
3. Гужикова А. А. Первые магнитостратиграфические данные по маастрихту Горного Крыма (Бахчисарайский район) // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2018. Т. 18, вып. 1. С. 41–49. DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2018-18-1-41-49>
4. Strasser A., Higl F., Henkel P. Cyclostratigraphy – concepts, definitions and applications // Newsletters on Stratigraphy. 2006. Vol. 42, № 2. P. 75–114.
5. Kodama A., Hinnov L. Rock magnetic cyclostratigraphy. West Sussex : Wiley & Sons, 2015. 166 p.
6. Суринский А. М., Гужиков А. Ю. Опыт циклостратиграфического анализа петромагнитных данных по разрезу турона – маастрихта «Нижняя Банновка» (юг Саратовского Правобережья) // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2017. Т. 17, вып. 2. С. 117–124. DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2017-17-2-117-124>
7. Гужиков А. Ю. Геологическая информативность магнетизма керн и шлама осадочных пород, полученных при бурении разведочных скважин // Приборы и системы разведочной геофизики. 2013. № 4. С. 51–61.

Образец для цитирования:

Суринский А. М., Гужиков А. Ю. Циклостратиграфический анализ петромагнитных данных по маастрихту долины р. Бодрак (Юго-Западный Крым) // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2019. Т. 19, вып. 3. С. 206–211. DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-3-206-211>

Cite this article as:

Surinskiy A. M., Guzhikov A. Yu. Cyclostratigraphic Analysis of the Rock Magnetic Data on Maastrichtian of the Bodrak River (SW Crimea). *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Earth Sciences*, 2019, vol. 19, iss. 3, pp. 206–211 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-3-206-211>