

УДК 551.583: 551.763.3(470.44)

Р.Р. Габдуллин¹, А.Ю. Пузик², С.И. Меренкова³, И.Р. Мигранов⁴,
Н.В. Бадудина⁵, А.В. Иванов⁶, М.Д. Казуров⁷

ЛИТОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕРХНЕМЕЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЭПИКОНТИНЕНТАЛЬНОГО БАССЕЙНА РУССКОЙ ПЛИТЫ В РАЙОНЕ УЛЬЯНОВСКО-САРАТОВСКОГО ПРОГИБА

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»,
614090, Пермь, ул. Генкеля, 4

Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, 36

Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29

ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени С. Орджоникидзе»,
117485, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 392000, Тамбов, Советская ул., 106

Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

Perm State National Research University, 614990, Perm, Genkel st., 4

Shirshov Institute of Oceanology RAS, 117997, Moscow, Nahimovskiy prospekt, 36

Institute of Geography RAS, 119017, Moscow, Staromonetny per., 29

S. Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University, 117485, Moscow, Miklukho-Maklaya st., 23

Tambov State technical University, 392000, Tambov, Sovetskaya st., 106

Приведены результаты геохимического исследования и их палеогеографическая, палеоклиматическая интерпретация для циклично построенного разреза верхнемеловых отложений у г. Вольск (Саратовская область). Элементарные пластовые циклиты и циклические вариации ряда определенных параметров были связаны с астрономо-климатическими циклами Миланковича. Построены кривые изменения палеотемпературы, влажности, палеобатиметрии. На основе индекса выветривания (CIA) получены значения палеотемпературы земной поверхности в областях денудации. В турон-кампанском интервале выделена климатическая цикличность, включающая эпохи относительного похолодания (турон–коньяк) с палеотемпературой около 20 °С, эпоху относительно потепления в середине позднего кампана (20–24 °С), эпоху похолодания в конце позднего кампана (19–21 °С) и эпоху потепления на рубеже кампана и маастрихта и в раннем маастрихте. В маастрихте выделены два климатических цикла, начинающихся со времени относительного похолодания (~19 °С) и заканчивающихся временем относительного потепления (около 20 °С, в конце маастрихта до 25 °С). Также определены циклы изменения влажности климата: два цикла в кампанское время, три цикла — в раннем маастрихте, один цикл — в позднем маастрихте.

Границе раннего и позднего маастрихта соответствует смена аридных условий на гумидные. На кривых палеобатиметрии выделены трансгрессивно-регрессивные циклы: один в позднетурон-коньякское время, два в позднекампанское время, пять в ранне-маастрихтское время, один в позднемаастрихтское время. Оценены вариации глубины: в турон-коньякское время в диапазоне 70–80 м, в кампан-маастрихтское время палеоглубина последовательно увеличивалась и изменялась от 100 до 200 м (в среднем около

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, доцент; *e-mail: mosgorsun@rambler.ru*

² Пермский государственный национальный исследовательский университет, Естественнонаучный институт, лаборатория биогеохимии техногенных ландшафтов, мл. науч. с.; Пермский государственный национальный исследовательский университет, Естественнонаучный институт, кафедра минералогии и петрографии, ст. преп.; Пермский государственный национальный исследовательский университет, естественнонаучный институт, сектор наноминералогии, инженер; *e-mail: alex.puzik@mail.ru*

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, аспирант; Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, лаборатория палеоэкологии и биостратиграфии, мл. науч. с.; *e-mail: koshelevasof@mail.ru*

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, студент; *e-mail: iskandermig@mail.ru*

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, ст. науч. с.; *e-mail: nvbadulina@mail.ru*

⁶ Институт географии РАН, отдел физической географии и проблем природопользования, ст. науч. с.; Российский государственный геологоразведочный университет имени С. Орджоникидзе, геологоразведочный факультет, кафедра палеонтологии и региональной геологии, доцент; Тамбовский государственный технический университет, кафедра природопользования и защиты окружающей среды, доцент; *e-mail: yashkovia@mail.ru*

⁷ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, аспирант; *e-mail: max.kazurov@yandex.ru*

150 м). Полученные результаты дают представление о миграции границ аридного пояса в позднем мелу и в целом климатической зональности, что важно для региональных и глобальных палеоклиматических реконструкций, а также для истории развития эпиконтинентальных морей, покрывавших Русскую плиту в районе Ульяновско-Саратовского прогиба.

Ключевые слова: меловой период, цикличность, геохимия, климат, Вольск.

The results of a geochemical study and paleogeographic, paleoclimatic interpretation for a cyclically constructed section of upper Cretaceous deposits near Volsk city, Saratov region, are presented. Elementary formation cyclites and cyclic variations of a number of certain parameters were associated with the Milankovich astronomical-climatic cycles. The curves of changes of paleotemperature, humidity, paleobathymetry were compiled. The results obtained give an idea of the migration of the arid belt boundaries in the upper Cretaceous and the overall climatic zonation, which is important for regional and global paleoclimatic reconstructions, as well as the history of the development of shelf seas that covered the Russian plate (especially Ulyanovsk-Saratov trough). Paleotemperatures of the land surface in the denudation areas are obtained from the chemical index of alteration (CIA). In the Turonian-Campanian interval selected climatic cyclicity, including period of relative cooling (Turonian-Coniacian) with paleotemperature about 20 °C, the period of relative warming in the mid-late Campanian (20–24 °C), the cooling time at the end of the late Campanian (19–21 °C) and the period of warming at the turn of the Campanian and Maastrichtian and in the early Maastrichtian time. In Maastrichtian age, there are two climatic cycles, beginning with a time of relative cooling (about 19 °C) and ending with a time of relative warming (about 20° C, at the end of Maastrichtian to 25 °C). The cycles of climate humidity change are also determined: two cycles in Campanian time, three cycles in early Maastrichtian, and one cycle in late Maastrichtian. The boundary of the early and late Maastrichtian corresponds to the change of arid conditions to humid ones. The paleobathymetry curves show transgressive-regressive cycles: one in the late Turonian-Coniacian time, two in the late Campanian time, five in the early Maastrichtian time, and one in the late Maastrichtian time. Depth variations were estimated: in the Turonian-Coniacian time in the range of 70–80 m, in the Campanian-Maastrichtian time, the paleobathymetry consistently increased and changed from 100 to 200 m (on average about 150 m). The results obtained give an idea of the migration of the boundaries of the arid belt in the Late Cretaceous and main features of the climatic zonation, which is important for regional and global paleoclimatic reconstructions, as well as for the history of the development the Russian plate in the Ulyanovsk-Saratov region.

Key words: Cretaceous, cyclicity, geochemistry, climate, Volsk.

Введение. Разрез карьера цементного завода «Большевик» в г. Вольск Саратовской области содержит как циклические, так и визуально ациклические интервалы (рис. 1). Ранее в [Габдуллин, 2002; Габдуллин, Иванов, 2002; Габдуллин и др., 2014; Бадулина и др., 2016; Сельцер и др., 2016] этот разрез был изучен комплексом методов, определены ключевые факторы, генерировавшие цикличность, а также циклы: а) биопродуктивности (для кампан-маастрихтского интервала), б) разбавления (для конца раннего маастрихта и для позднего маастрихта), в) вызванные вариациями эксцентриситета орбиты Земли второго порядка (продолжительностью около 400 тыс. лет), третьего порядка (около 1290 тыс. лет) и четвертого порядка (около 2030 тыс. лет). В указанных работах были предложены модели формирования этих отложений и оценены отдельные параметры (соленость, глубина, температура) либо качественно (за исключением палеоглубины), либо количественно, но для отдельных интервалов разреза, например, значения палеотемпературы для маастрихта. Количественные значения приводились для пачек в целом, как правило, осредненно. В статье приведены кривые изменения температуры, глубины, солености и типа климата для всего интервала верхнемеловой части разреза на существенно более

детальном уровне. Эти данные ранее не публиковались и интересны с позиции реконструкции климатической и палеогеографической истории развития эпиконтинентальных морей, покрывавших Русскую плиту в районе Ульяновско-Саратовского прогиба. Кроме того, полученные величины дают представление о миграции границ аридного пояса в позднемеловое время и в целом о климатической зональности, что важно для региональных и глобальных палеоклиматических реконструкций.

Материалы и методы исследований. Указанный выше геологический разрез был ранее изучен комплексом методов. Обзор результатов этих исследований и их интерпретации опубликован ранее в [Габдуллин и др., 2014] и содержит список основных наших публикаций и других научных коллективов, изучавших объект.

Акцент нашей работы сделан на результатах геохимических исследований изучаемого разреза по 37 образцам горных пород, ранее отобраным Р.Р. Габдуллиным, и их палеогеографической и палеоклиматической интерпретации.

Полный геохимический анализ элементов для этих 37 образцов, собранных из визуально нециклических туронских и коньякских отложений, циклично построенных кампанских и маастрихтских отложений разреза проведен на волнодиспер-

сионном рентгенофлуоресцентном спектрометре последовательного типа действия S8 «Tiger» фирмы «BRUKER» (аналитик А.Ю. Пузик).

По полученным результатам подсчитаны соотношения и содержание некоторых химических элементов, указывающих на изменение условий осадконакопления (глубина бассейна, гидродинамика, климат и др.), что позволило уточнить сформулированные ранее представления о режиме седиментации.

Для анализа **вариации значений палеотемпературы** использованы следующие значения концентрации элементов и их отношения: V, Ca, Ni, Ca/Sr, титановый модуль (ТМ), Mn, Si/Al. Вариации температуры также можно оценить с помощью отношений Ca/Mg, Sr/Ba, Zn/Nb, (Ce, Nd, La, Ba)/Yb (Y, Zr).

Рост концентрации Ca, Sr, Mg может указывать на аридный тип климата, а увеличение содержания Sc, Ni, Zn, Y, W, U, Cu, V и редкоземельных элементов (РЗЭ) — на гумидные условия седиментации.

Титановый модуль (ТМ) — отношение содержания TiO_2 и Al_2O_3 — зависит как от динамической фации седиментации, так и от титанистости петрофонда, поэтому если зафиксировать фациальный фактор, ТМ служит отличным индикатором петрофонда основного или кислого состава. Различие значений ТМ свидетельствует о разной климатической обстановке. Сформировавшиеся в условиях гумидного климата песчано-алевритовые породы характеризуются более высокими значениями ТМ, чем аридные. Такое же соотношение наблюдается и для глинистых пород. Использование этого модуля для восстановления климатических особенностей возможно лишь в условиях постоянства источника сноса. В ряде случаев динамическая сортировка материала и состав петрофонда влияют на величину ТМ гораздо сильнее, чем климатический фактор. Резюмируя, можно сказать, что его величина возрастает при переходе из аридной зоны в гумидную, а в пределах последней — по мере движения от глубоководных зон к прибрежно-морским и континентальным [Енгальчев, Панова, 2011].

К **показателям изменения глубины бассейна** относятся отношения Fe/Mn, Ti/Mn, титановый модуль (ТМ), натриевый модуль (НМ), калиевый модуль (КМ), а также элементы Zn, Pb, Al, Mn, Cu, Sr, Ba, показывающие смещение фаций.

Отношение Fe/Mn. Уменьшение этого отношения соответствует увеличению глубины, а также переходу от шельфовых фаций к пелагическим. Тенденция к уменьшению этого отношения с глубиной осадконакопления обусловлена поглощением осадочными отложениями марганца из морских вод, которое сильнее проявляется в глубоководных условиях. По значению отношения Fe/Mn осадочные породы можно разделить

на глубоководные (<40), мелководные (<80) и мелководно-прибрежные с преимущественно терригенным источником сноса (>160). Отношение Fe/Mn хорошо применимо к глинистым или глиносодержащим отложениям, и в меньшей степени — к карбонатным [Скляр, 2001].

Калиевый модуль (КМ = K_2O/Al_2O_3) определяется интенсивностью процессов химического выветривания в области размыва. Калий входит в состав полевых шпатов и накапливается при их разрушении в континентальных отложениях в условиях засушливого климата. Во влажном климате он переносится в виде растворов и взвеси и концентрируется в морских и озерных осадках. Алюминий связан с глинистой частью пород, его содержание в осадках увеличивается в сторону открытого бассейна. Низкие значения калиевого модуля характерны для континентальных осадков, тогда как в прибрежно-морских и пелагических отложениях его значения увеличиваются [Енгальчев, Панова, 2011].

Натриевый модуль (НМ = Na_2O/Al_2O_3). Натрий обычно переносится в виде растворов и взвеси; максимальная его концентрация наблюдается в континентальных отложениях в условиях засушливого климата, а также и в морских и озерных осадках в условиях влажного климата. Наиболее бедны натрием прибрежно-морские образования [Енгальчев, Панова, 2011].

Содержание Sr и Ba. Увеличение содержания стронция свидетельствует об удаленности от источника сноса терригенного материала, а повышение концентрации бария, наоборот, — о приближении источника сноса. С ростом глубины бассейна Ba все сильнее растворяется, однако при этом на глубине 4–5 км его концентрация может достигать максимальных значений, так как он вступает в реакцию с окружающей средой и выпадает в осадок.

Содержание Pb и Zn. Увеличение концентрации свинца и цинка вызвано приближением к источнику сноса и/или увеличением солёности бассейна.

Для **анализа изменения солёности** использованы значения отношений Sr/Ba и Ca/Sr. При нарушении физико-химического равновесия солёного раствора, что обусловлено его захоронением, одни минералы в этой системе растворяются (например, кальцит), другие — формируются (доломит), что ведет к глубокой трансформации состава рассолов. При этом в растворе происходит избирательное концентрирование химических элементов, среди которых Ca, Sr, Ba. Это также хорошо видно в суперсолёных растворах, где содержание Ca сводится практически к нулю, так как при увеличении солёности он замещается на Mg, содержащийся до этого в осадке. Следовательно, увеличение показателей Sr/Ba, Ca/Sr свидетельствует о повышении солёности раствора.

Концентрация В, Ва, S, Cr, Cu, Ga, Ni и V в морских осадках выше, чем в пресноводных.

Zn и Cu — также показатели солёности раствора, подвижность этих элементов напрямую зависит от солёности. В речных водах содержание Cu практически всегда постоянно, поэтому, когда речная вода перемешивается с морской, скорость выпадения Cu в осадок уменьшается с повышением солёности получаемого раствора. Подвижность Zn также уменьшается с повышением солёности.

Определение значений палеотемпературы по индексу выветривания. Индексы выветривания обычно показывают степень истощения пород подвижными элементами относительно неподвижных в процессе химического выветривания. Индекс CIA был впервые предложен в работе [Nesbitt, Young, 1982] и широко используется как показатель интенсивности химического выветривания:

$$\text{CIA} = 100 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}),$$

где CaO^* — некарбонатный CaO , все переменные представляют молярные количества оксидов основных элементов. CaO^* представляет собой долю CaO в силикатных минералах, которая используется вместо общего CaO во избежание вклада CaO из карбонатных и фосфатных минералов, которые не связаны с процессами выветривания [Nesbitt, Young, 1982].

В отложениях, содержащих большое количество карбонатов или фосфатов, необходимо оценить количество CaO^* . Обычно это выполняется путем вычисления поправок на измеренное содержание CO_2 и P_2O_5 . При отсутствии измеренных значений CO_2 поправки могут быть вычислены исходя из соотношения Ca/Na в силикатном материале. Для этого значения CaO корректируют на P_2O_5 . Если скорректированное на фосфаты значение CaO^* превышает концентрацию Na_2O (также в молярных долях), CaO^* устанавливается равным Na_2O [McLennan, 1993]. С увеличением выветривания основания постепенно теряются, что приводит к высоким значениям CIA , которые приближаются к 100 в связи с накоплением Al_2O_3 в продуктах выветривания.

В качестве критерия для разграничения отложений, формирующихся в условиях теплого и холодного климата, принято считать значение индекса CIA, равное 70.

Относительно высокие значения температуры воздуха приводят к более интенсивному химическому выветриванию, которое потенциально можно измерить. В работе [Li, Yang, 2010] сделано предположение, что значения CIA взвешенных отложений в современных устьях крупных рек изменяются в зависимости от широты и температуры поверхности суши. Авторы работы [Yang et al., 2014] продемонстрировали, что температура земной поверхности изменяется линейно с CIA в

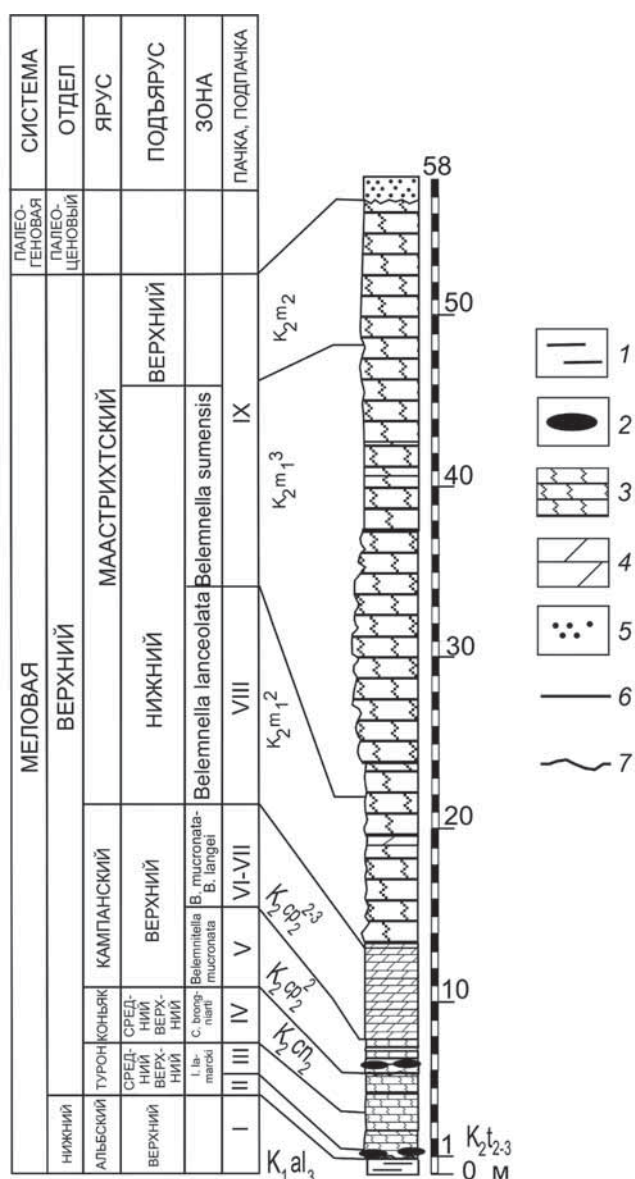


Рис. 1. Разрез верхнемеловых отложений карьера цементного завода «Большевик», г. Вольск, Саратовская обл.: 1 — глины; 2 — фосфориты; 3 — писчий мел; 4 — мергели; 5 — пески; 6 — согласные стратиграфические границы; 7 — несогласные стратиграфические границы

глобальном масштабе. Это отношение выглядит следующим образом:

$$T = 0,56 \cdot \text{CIA} - 25,7 \quad (r^2 = 0,50),$$

где T — температура, °C. Было показано [Yang et al., 2014], что это соотношение устойчиво в диапазоне CIA от ~50 до 90, что соответствует диапазону палеотемпературы от ~3 до 25 °C. Полученные из CIA данные соответствуют палеотемпературе земной поверхности (но не воздуха!).

Литолого-палеонтологическая характеристика разреза. Разрез (рис. 1) расположен в северо-западном борту карьера цементного завода «Большевик». Разрезы окрестностей г. Вольска и карьеров цементных заводов детально изучены многими исследователями, их описание приводится в

десятках работ. Перечень этих публикаций приведен в работе [Габдуллин и др., 2014]. За основу стратиграфического расчленения верхнемеловых отложений Русской плиты взята схема А.С. Алексеева, А.Г. Олферьева и С.М. Шика [1995]. Распределение изученных параметров по разрезу приведено на рис. 2–10.

В забое карьера вскрыты глинистые отложения верхнего альба — *пачка I*. Выше по несогласной границе залегают верхнемеловые (туронские, коньякские, кампанские и маастрихтские) отложения.

Средний–верхний подъярусы туронского яруса.

Туронские отложения представлены карбонатными породами среднего–верхнего подъяруса с раковинами *Inoceramus lamarki* и панцирями морских ежей, эти породы с разрывом перекрывают альбские песчаные темно-серые глины.

Пачка II. Мергель с фосфоритовыми желваками и уровнями обломков призматического слоя инцефалов мощностью 2 м. Мощность «иноцерамовых горизонтов» убывает снизу вверх по разрезу от 0,1–0,25 до 0,04–0,05 м. Встречены ожелезненные обломки мела. В основании пачки наблюдается аналог «фосфоритовой плиты» (0,3 м). Мергель переполнен стяжениями фосфоритов разной формы, в основном полуокатанными. Их максимальная концентрация сосредоточена в средней части аналога «плиты».

Пачка III. Желтовато-серый мел, иногда кремнестый, мощность 2,5 м. Микроскопически порода представляет собой известняк биокристаллокластический. Отложения содержат *Inoceramus lamarki*, *In. apicalis*, *Micraster corbovis*, *M. leskei*, *M. corstetudinarium*, *Conulus subrotundus*, *C. subconicus*, *Holaster planus*, *Scaphites geitnitsi*, *Lewesiceras peramplum*. Среднетуронский возраст отложений устанавливается по присутствию зональных видов *Inoceramus lamarki*, *In. apicalis*, позднетуронский возраст — по находкам иглокожих *Micraster corstetudinarium*, *Holaster planus*. В работе М.Н. Матесовой [Матесова, 1930] из туронских отложений отмечены также массовые находки устриц, брахиопод, зубов и обызвествленных позвонков акуловых рыб — все эти ископаемые остатки встречены здесь также и нами. В туронских отложениях отмечены следы жизнедеятельности *Chondrites*, *Teichichnus* и *Planolites*. Визуально цикличность отсутствует.

Нижний подъярус коньякского яруса. Пачка IV. Желтовато-серый мел (микроскопически известняк биокристаллокластический) мощностью 1,5–2 м. В верхней части наблюдается зеленовато-серый мергелистый мел с фосфоритовыми стяжениями и глауконитом, мощность 0,5 м. Общая мощность коньякских отложений составляет 2–2,5 м. На принадлежность этих отложений к нижнему подъярусу указывают находки *Cremnoceras wandereri* Andert. Морские ежи в изобилии встречаются в разрезах района г. Вольск [Матесова,

1930, 1935; Герасимов и др., 1962]. Отмечены находки устриц и аммонитов [Матесова, 1930]. Визуально цикличность отсутствует.

Верхний подъярус кампанского яруса. Пачка V, «второй горизонт кампана», сложена рыхлым писчим мелом с обильными остатками морских ежей. Кремнистость к кровле усиливается. Мощность пачки 2–3 м. Породы содержат макрофоссилии *Belemnitella mucronata mucronata* Schlot., *Belemnitella mucronata senior*, *Isomicraster* sp. и др.

Отложения кампана несогласно, с разрывом перекрывают отложения коньяка. Амплитуда «волнистости» эрозионной поверхности может достигать до 5 см. Отложения представлены карбонатными породами верхнего кампана. Мощность 6 м.

Белый писчий мел (микроскопически биокристаллолитокластический известняк) с тонкими прослоями зеленовато-серого мелоподобного мергеля, или «полосчатый мел», по М.Н. Матесовой [1930], мощность 2 м. Граница между нижней и верхней пачками эрозионная. Отложения, составляющие пачку «полосчатого мела» ($K_2cp_1^1$), характеризуются в районе Вольска находками *Belemnitella mucronata mucronata* Schlot., *Isomicraster* sp. Они относятся к нижней зоне верхнего кампана *Belemnitella mucronata senior*. В районе Вольска эти отложения охарактеризованы находками *Echinocorys* sp., *In. dariensis*, *B. m. volgensis* [Герасимов и др., 1962].

Пачки VI, VII, «второй–третий горизонты кампана». Толща узловатых белых биокристаллокластических мергелей, заключенных в серо-зеленом биокристаллолитокластическом мергеле («брекчированный мел», по М.Н. Матесовой), мощность 4 м. В середине верхней пачки наблюдается эрозионная поверхность с закатившимися в эрозионные ниши панцирями морских ежей. Возможно, эта поверхность представляет собой границу пачек V и VI. Толща «брекчированного мела» ($K_2cp_2^{2-3}$) в Вольском районе содержит ростры *Belemnitella langei* Shatsk., *B. m. mucronata*, *B. m. senior*, а также морские ежи *Micraster grimmensis* Nietsch. и *Coraster cubanicus* Posi. Соответственно, она относится к верхнему кампану и представлена его вторым и третьим горизонтами [Герасимов и др., 1962]. Таким образом, рассматриваемый стратиграфический интервал разреза охарактеризован зонами *mucronata* и *langei*.

Из кампанских отложений в районе Вольска также отмечены находки родов головоногих (*Bostrychoceras*), двустворчатых (*Spondylus*) и лопатоногих моллюсков (*Dentalium*), брахиопод и одиночных кораллов (*Parasmilia*). Этот интервал разреза получил название «микрастрово кладбище» из-за обилия находок панцирей морских ежей [Матесова, 1930]. Кроме того, в Вольском разрезе установлены следы жизнедеятельности *Thallassinoides*, *Teichichnus* и *Planolites*.

Цикличность в толще «полосчатого мела» представлена 10 циклитами типа 1: мел (0,4–0,1 м) —

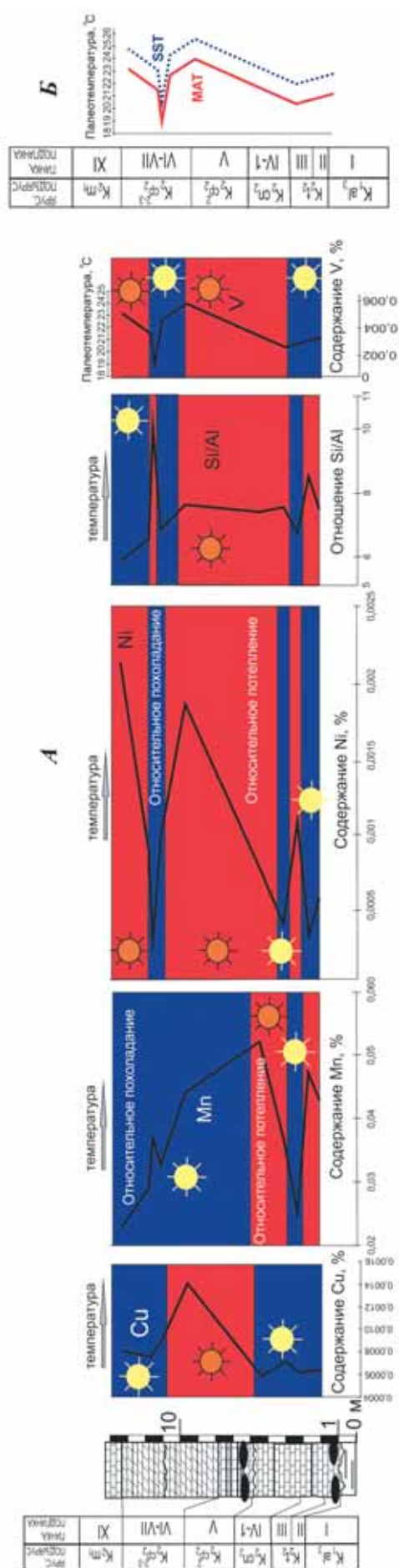


Рис. 2. Вариации палеотемпературы для верхнего турона—нижнего маастрихта: *A* — в областях денудации (получены нами по геохимическим данным), *B* — палеотемпературные кривые (MAT — среднегодовая, SST — поверхностных вод)

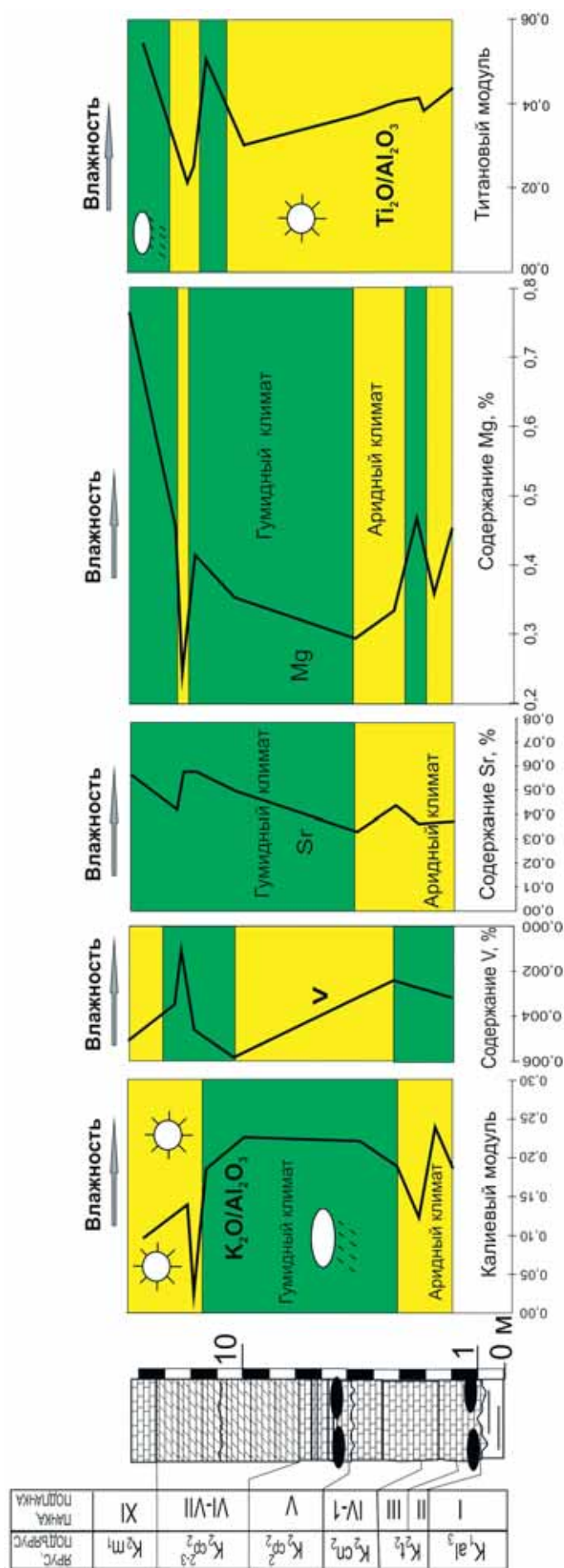


Рис. 3. Изменение типа климата (аридный/гумидный) на исследуемой территории в верхнем туроне—нижнем маастрихте

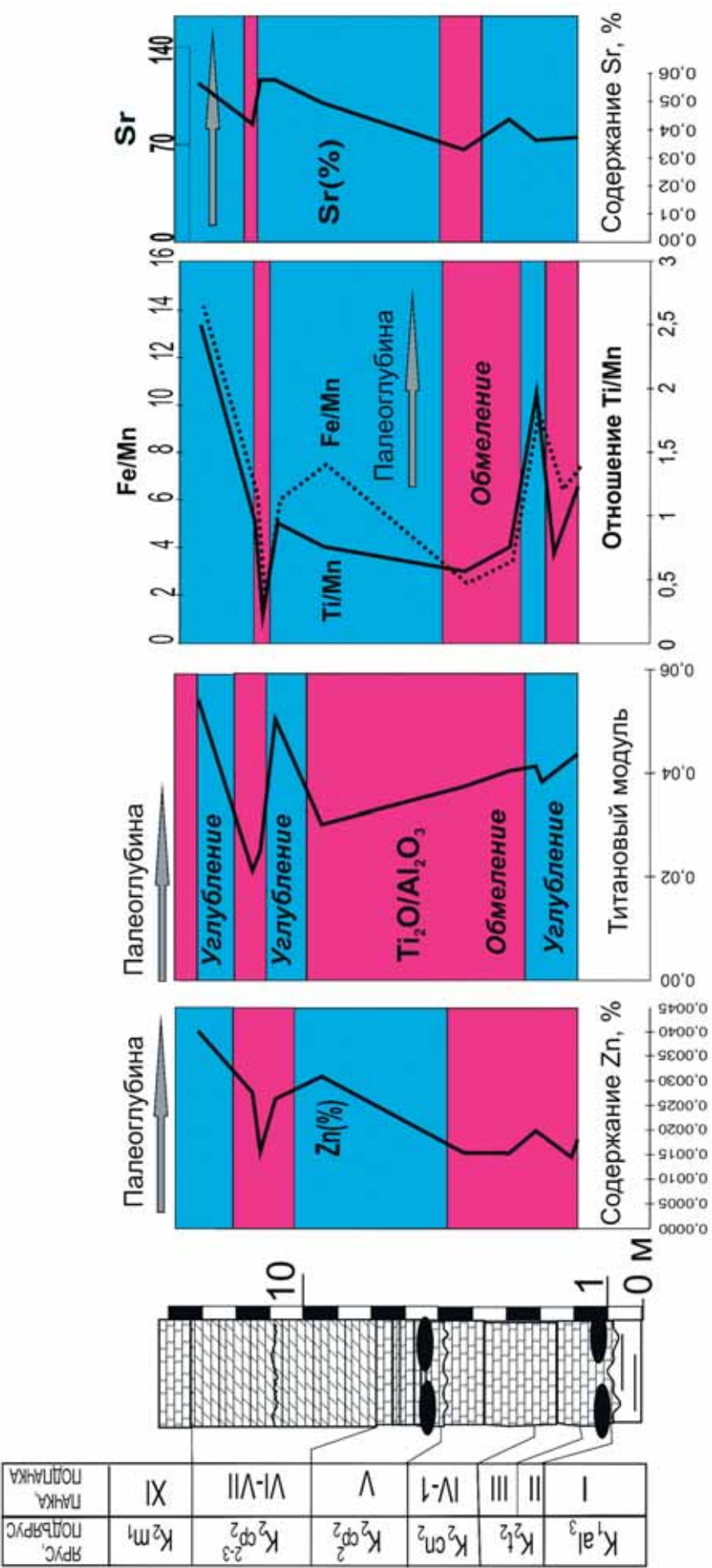


Рис. 4. Соотношение кривых палеобатиметрии для верхнего турона–нижнего маастрихта Ульяновско-Саратовского прогиба, полученных по геохимическим данным

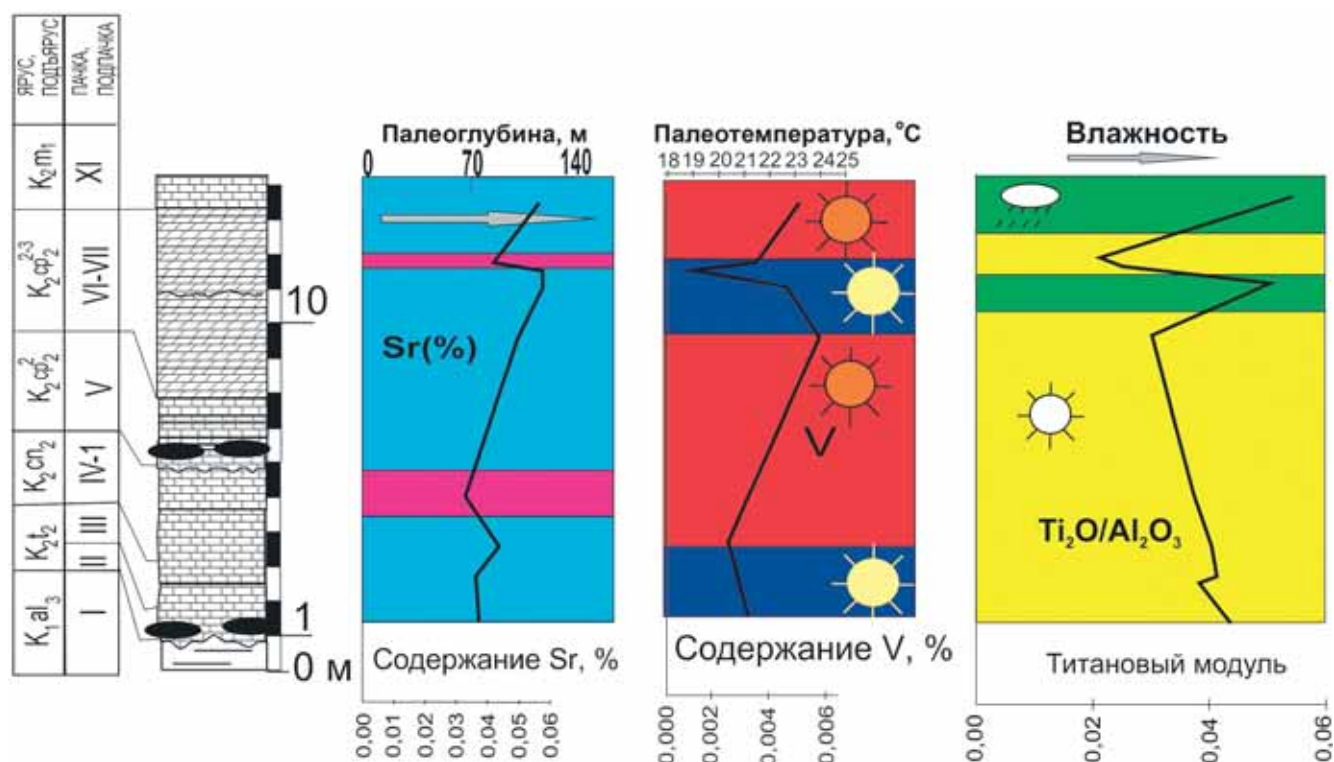


Рис. 5. Кривые изменения палеобатиметрии, палеотемпературы и влажности в отложениях верхнего турона—нижнего маастрихта Ульяновско-Саратовского прогиба, построенные по геохимическим данным

глинистый мергель (0,02–0,05 м). В кровле более карбонатных элементов ритма (БКЭР) — слоев мела — наблюдаются эрозионные поверхности. Ритмичность в «брекчированном меле» представляет собой переслаивание массивных (2,5–0,6 м) и глинистых (0,03–0,05 м) мергелей. Установлено 3 циклита, отнесенных к типу 2.

Нижний подъярус маастрихтского яруса. Мощность отложений этого интервала в Вольском районе составляет до 30–50 м. Отметим, что в разрезе карьера цементного завода «Коммунар», расположенного рядом (Вольск), присутствуют отложения самой первой подзоны (K₂m₁¹) — *Belemnella licharewii*, но не встречены в изученном разрезе. Эти породы представлены серовато-белым песчаным мелом с тонкими глинистыми прослоями (0,3–4 м).

Пачка VIII. Белый писчий мел с прослоями зеленовато-серого мергеля (10–15 м). Раннемаастрихтский возраст отложений подтверждается находками *Bel. lanceolata*, *Baculites anceps leopoldensis*, *Acanthoscaphites tridens*, *Hoploscaphites constrictus* [Герасимов и др., 1962]. Это сообщество форм характеризует среднюю подзону нижнего маастрихта (K₂m₁²).

Пачка содержит 8 циклитов типа 1: писчий мел (2,5–0,2 м) — глинистый мергель (0,03–0,17 м). Циклиты хорошо подчеркнуты профилем выветривания и не выдержаны по мощности (0,35–2,6 м).

Нижний–верхний подъярус маастрихтского яруса. Пачка IX. Писчий мел с прослоями гли и

мергелей, сверху сменяющийся глауконитовыми песчанстыми мергелями, мощность 30–57 м.

Пачка представлена белым писчим мелом (>30 м). Третья подзона нижнего маастрихта (K₂m₁³) устанавливается в исследованном разрезе по находкам *Bel. lanceolata sumensis*, *Bac. anceps leopoldensis*, *Asc. tridens*, *H. constrictus*, *In. balticus* Boehm. Выше вскрыты отложения верхнего маастрихта (K₂m₂), которые слагают верхние 10 м разреза.

Пачка представлена циклитами типа 1: писчий мел (1,1–2 м) — «глинистый мергель», «глина» (0,03–0,05 м). Рентгенофазовый анализ показывает, что визуально большинство глинистых прослоев представляют собой глинистый писчий мел. Циклиты хорошо проявляются в профиле выветривания и хорошо выдержаны по мощности (1,15–2,05 м). Более того, возможно выделение циклитов более высокого порядка путем группировки их по парам. Иными словами, закономерно чередуются циклиты мощностью 1 м с циклитами мощностью 2 м. Таким образом, возможно выделение 8 циклитов 3-го порядка и 4 циклитов 2-го порядка в интервале 12 м от основания пачки. Затем толща ациклична на протяжении 11 м, после чего наблюдаются два циклита мел–глина 3-го порядка (мощность ритмов 1–2,5 м) или 1 цикл 3-го порядка. Затем на протяжении 10 м толща также аритмична. Возможно, ациклические интервалы мощностью 10–12 м — элементы циклита 1-го порядка, чередующиеся с циклическими интервалами.

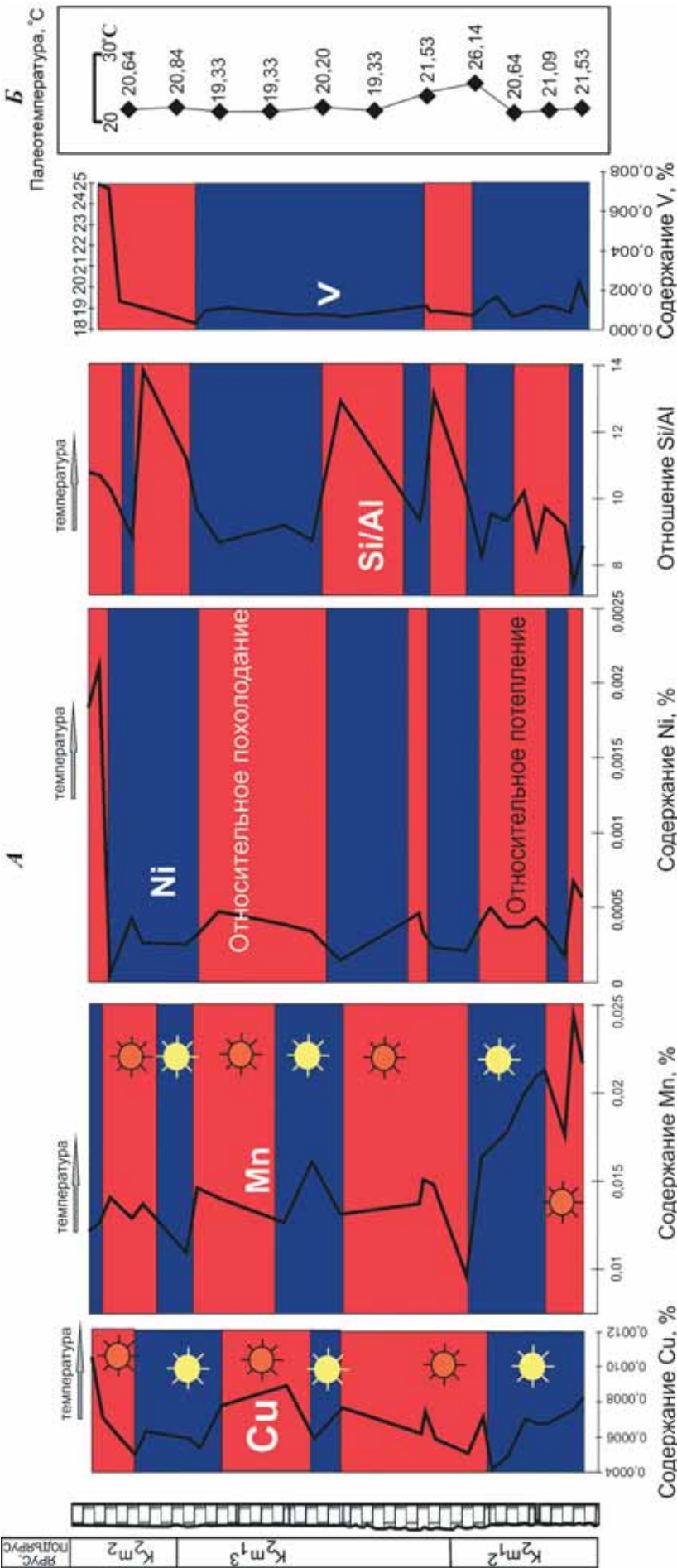


Рис. 6. Вариации значений палеотемпературы: А — в областях денудации (получены нами по геохимическим данным), В — палеотемпературная кривая по данным изотопной палеотермометрии по [Бадулина и др., 2016]

В маастрихтских породах в районе Вольска также содержатся ежи-цидароиды (*Cidaris*, *Salenia*), спатангоиды (*Echinocorys*), устрицы (*Pycnodonte*, *Hyotissa*, *Ostrea*), пектениды (*Spondylus*, *Chlamys*, *Janira*), губки (*Ventriculites*) и кораллы (*Cylicosmilia*); редко встречаются брахиоподы, брюхоногие моллюски (*Pleurotomaria*?) [Матесова, 1930, 1935]. В них установлены ихнофоссилии *Thalassinoides*, *Teichichnus* и *Planolites*.

Результаты исследования и их обсуждение.

Геохимическая характеристика разреза. Геохимические данные позволили рассчитать значения концентрации (ppm) для 29 элементов и соединений, а также 6 их отношений (модулей), необходимых для уточнения условий седиментации и генезиса цикличности. Описанию этой методики посвящено множество работ [Енгальчев, Панова, 2011; Климат..., 2004; Скляр, 2001]. Получаемые нами данные в контексте их палеогеографической интерпретации часто противоречивы, что требует их сравнения с результатами других исследований.

Кратко и выборочно охарактеризуем концентрацию элементов, соединений и их отношений.

Вариации значений палеотемпературы установлены по величине титанового модуля, содержанию ванадия, меди, марганца, никеля, отношению Si/Al (рис. 2, 6). Высокая степень корреляции характерна для ванадия и меди и ТМ. Концентрация марганца и никеля, отношение Si/Al между собой демонстрируют среднюю корреляцию. По ним можно выделить фазы потепления и похолодания климата. Установленные фазы относительного потепления климата отвечают повышению концентрации органического углерода (C_{org}) и карбоната кальция ($CaCO_3$) в турон-кампанском интервале рассматриваемого разреза и определены ранее [Габдуллин и др., 2014]. Вместе с тем в кампан-маастрихтском интервале разреза связь между повышением палеотемпературы и ростом содержания карбоната кальция не выявлена. Связь вариаций площади (объема) биотурбированных пород, числа их нотаксонов и диаметра их нор с изменениями температуры не установлена. За кривую вариации температуры была взята кривая изменения содержания V.

Перейти от «качественного» графика к количественным значениям стало возможно по результатам определения значений палеотемпературы по индексу выветривания (таблица). Полученный диапазон палеотемпературы земной поверхности на палеоподнятиях (в областях денудации) — 19–25 °С — близок к диапазону значений, ранее полученных методами изотопной палеотермометрии [Тейс, Найдин, 1973] (рис. 2, Б; 6, Б; 7), для сравнительно глубоководных эпиконтинентальных бассейнов Русской плиты во второй половине турона (14–15 °С), второй половине коньяка (13–15 °С), второй половине кампана (13–14 °С). Установленный диапазон значений палеотем-

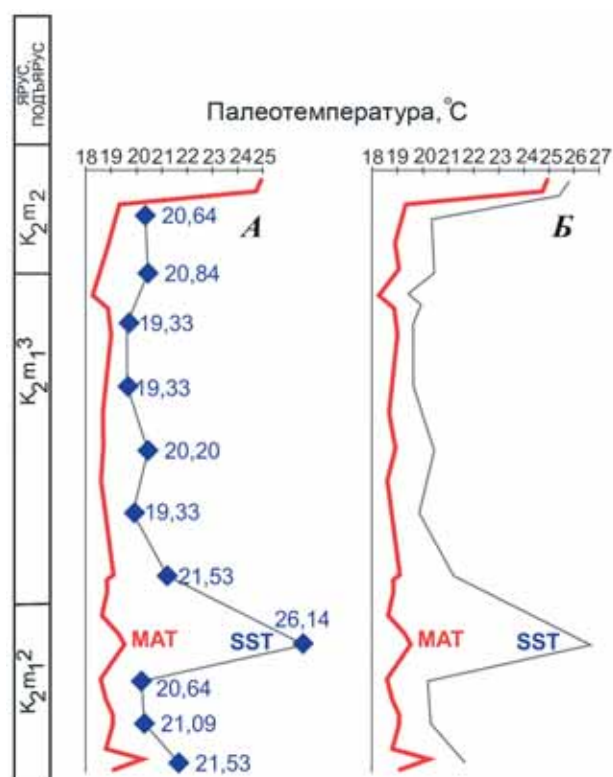


Рис. 7. Палеотемпературные кривые для маастрихта (MAT — среднегодовая, SST — поверхностных вод): А — получена нами по индексу выветривания по геохимическим данным (слева) и по данным изотопной палеотермометрии [Бадулина и др., 2016] (справа); Б — скорректированные версии этих же палеотемпературных кривых

пературы по индексу выветривания (19–25 °С) хорошо соотносится с значениями (19–26 °С), полученными ранее методом изотопного анализа состава стабильных изотопов кислорода на приборе «Delta V Advantage» для маастрихтского интервала разреза [Бадулина и др., 2016], а также по организмам-индикаторам палеотемпературы. В частности, для маастрихтского интервала разреза характерны кораллы (*Cylicosmilia* sp.), обитающие в воде с температурой выше 20 °С и двустворчатые моллюски пектениды (*Janira* sp.), живущие в водах с температурой не менее 23,5 °С [Габдуллин, Иванов, 2002]. Относительно прохладные воды туронского времени постепенно нагревались к коньякскому времени (на это указывают содержание и отношение Ca и Mg) [Габдуллин и др., 2014].

В турон-кампанском интервале можно выделить климатическую цикличность, включающую в себя эпохи относительного похолодания (турон-коньяк) с палеотемпературой около 20 °С, эпоху относительного потепления в середине позднего кампана (20–24 °С), эпоху похолодания в конце позднего кампана (19–21 °С) и эпоху потепления на рубеже кампана и маастрихта и в раннем маастрихте. В маастрихте выделено два климатических цикла, начинающихся со времени относительного похолодания (около 19 °С) и заканчивающихся временем относительного потепления (около 20 °С, в конце маастрихта до 25 °С). Рассчитанные

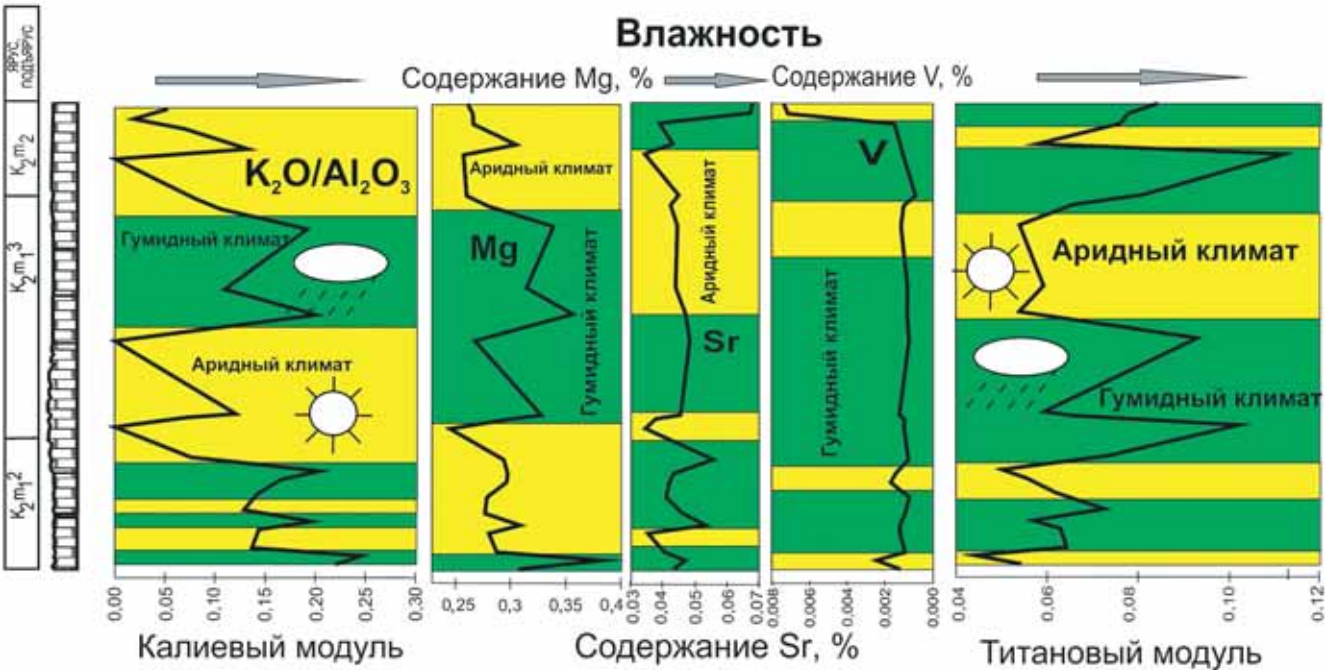


Рис. 8. Изменение типа климата (аридный/гумидный) на исследуемой территории в маастрихте

значения палеотемпературы по индексу выветривания можно отождествить со средней годовой температурой (MAT), а температуру поверхностных вод (SST) можно предположительно оценить, как имеющую значения на 1–2 °С выше, чем MAT.

Величины палеотемпературы, рассчитанные по индексу выветривания

Номер п/п	Номер лабораторного образца	Образец	CIA	T, °C
1	X10833	Вольск 10	83	21
2	X10834	Вольск 11	79	19
3	X10835	Вольск 13	88	24
4	X10836	Вольск 15	83	21
5	X10837	Вольск 18	81	19
6	X10838	Вольск 28	80	19
7	X10839	Вольск 33	83	21
8	X10841	Вольск 35	87	23
9	X10842	Вольск 43	91	25
10	X10844	Вольск 46	79	19

Примечание. В изучаемых отложениях для расчета CIA и значений палеотемпературы использованы образцы с наибольшим количеством терригенной примеси. В качестве критерия принято содержание SiO₂≥5% и Al₂O₃≥1%.

Вариации влажности климата прослеживаются на кривых ТМ, КМ, содержания ванадия, стронция и магния (рис. 3, 8). Эти графики слабо соотносятся между собой (только в отдельных интервалах). В качестве параметра для оценки влажности климата был выбран ТМ, который имеет высокую степень корреляции с содержанием С_{орг} и СаСО₃ и определен ранее в [Габдуллин и др., 2014]. В эпохи гумидизации климата в кампанское время увеличивалось содержание С_{орг} и СаСО₃, а

в эпохи аридизации эти показатели уменьшались. В турон-коньякское время максимуму содержания С_{орг} отвечал минимум СаСО₃ в условиях аридизации климата. В маастрихтское время вариации содержания С_{орг} и СаСО₃ были минимальны. На смену влажному типу климата в туроне к коньяку постепенно устанавливались аридные условия (ТМ, АМ, ЩМ, содержание Mg) [Габдуллин и др., 2014]. По вариациям кривой ТМ выделено два цикла изменения влажности климата в кампанское время и три цикла в раннем маастрихте, в позднем маастрихте — один цикл. Границе раннего и позднего маастрихта соответствует смена аридных условий на гумидные. По ТМ турон-коньякское время интерпретируется как аридное. По графикам других параметров можно выделить два цикла изменения влажности климата в турон-коньякском интервале (содержание магния) или один (концентрация стронция и ванадия).

Вариации значений палеосолёности прослеживаются на кривых отношения Sr/Ba (из-за литологической специфики отложений и связанного с этим низкого содержания терригенной примеси, с которой связан Ba, кривые можно построить только для фрагментов разреза). Присутствие иглокожих и брахиопод в туроне, ракообразных (следы *Thalassinoides*) и редких пелеципод в коньякских отложениях, а также отношение Ti/Mn для турон-коньякского интервала подтверждает нормальную солёность бассейна в указанный диапазон времени (рис. 4, 9). Для конца турона отмечено понижение солёности (отношение Sr/Ba), связанное с уменьшением глубины палеобассейна в сочетании с возможным увеличением речного стока, вызвавшим опреснение. О нормальной палеосолёности

в кампане свидетельствуют находки стеногалинных кораллов, иглокожих и ракообразных (следы *Thalassinoides*). Для маастрихтской части важными индикаторами условий нормальной солености служат стеногалинные плевротомарии, кораллы и устрицы рода *Rusnodonte* (12–30‰). В конце маастрихта на кривых элементов-индикаторов (Sr, Zn) фиксируется повышение солености.

Вариации значений палеоглубины видны на кривых изменения содержания Zn, Sr и титанового модуля (ТМ), а также на кривых отношений Ti/Mn и Fe/Mn (рис. 4, 9). Значения отношений Ti/Mn и Fe/Mn демонстрируют в целом хорошую сходимость и позволяют выделить общие тренды. Выделены интервалы относительного углубления и обмеления эпиконтинентального бассейна. Установлена корреляция увеличения палеоглубины (в условиях трансгрессии) по ряду параметров, определенных ранее [Габдуллин и др., 2014], в частности, по концентрации C_{org} и $CaCO_3$. Также с углублением бассейна отмечен рост площади (объема) биотурбированных пород, числа их нотаксонов и диаметра их нор. В целом условия во второй половине турона были относительно мелководные (менее 100 м), а в коньяке, кампане и маастрихте — относительно глубоководные, отвечающие пелагиали с глубиной более 100 м по [Габдуллин, 2002] или 130–200 м по [Бондаренко, 1990]. По графикам отношений Ti/Mn и Fe/Mn фиксируется уменьшение глубины бассейна в коньякское время и не менее трех эвстатических циклов в маастрихтское время.

Эпохи обмеления и углубления бассейна отчетливо выделяются на графиках содержания Zn, Sr и изменения ТМ. Так, на всех трех графиках выделяются регрессивные эпохи в конце коньяка, в конце кампана, в конце раннего и в конце позднего маастрихта.

Для оценки изменения палеобатиметрии было выбрано изменение концентрации Sr. На соответствующей кривой выделяются трансгрессивно-регрессивные циклы: в позднетурон-коньякское время — один, в позднекампанское время — два, в раннемаастрихтское время — 5, в позднемаастрихтское время — 1. Вариации глубины в изученном разрезе нами оценены в диапазоне 75–200 м. В турон-коньякское время палеоглубина бассейна оценивается в 70–80 м.

В туронский век здесь в сравнительно мелководно-морских условиях происходило накопление преимущественно карбонатных илов и терригенных фосфоритоносных осадков [Герасимов и др., 1962]. Бассейн был относительно мелководным, что подтверждается отношением Ti/Mn и ТМ. В коньякское время глубина бассейна немного увеличилась (подтверждено отношением Ti/Mn и ТМ), при этом в туроне и в коньяке происходили эвстатические колебания (НМ, ЩМ, ТМ, КМ, концентрация S) [Габдуллин и др., 2014]

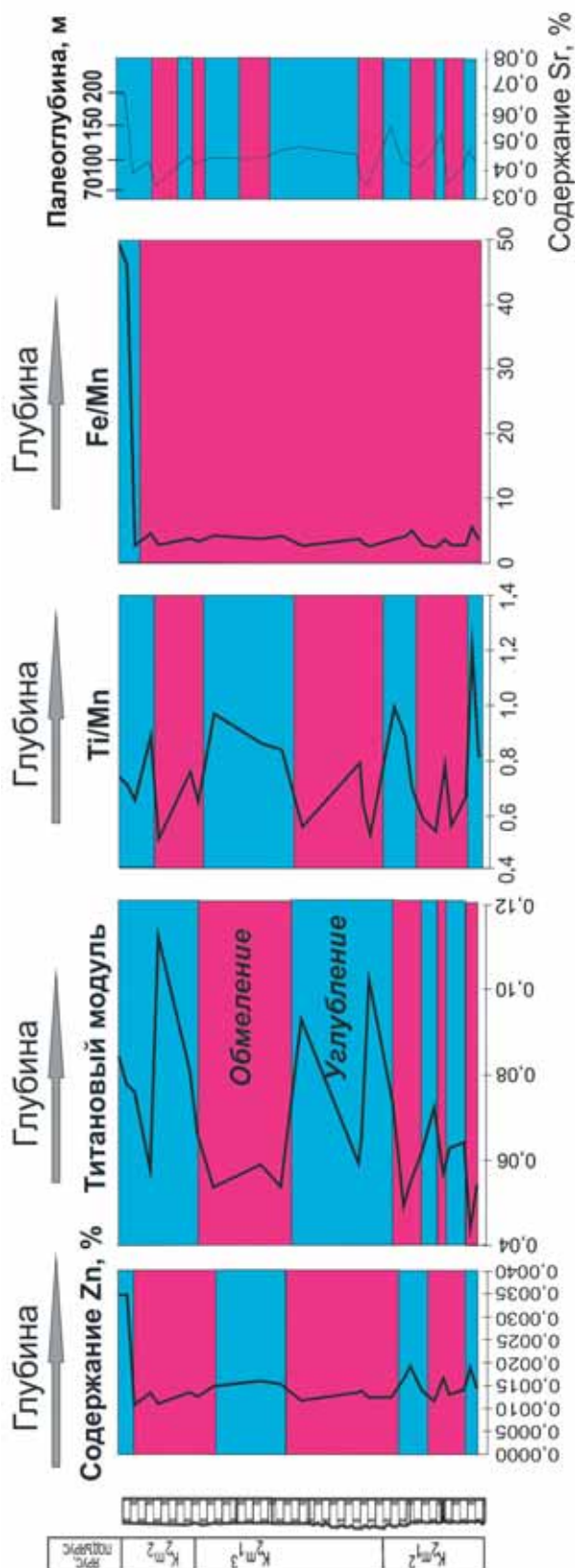


Рис. 9. Соотношение кривых палеобатиметрии для маастрихтской части разреза, полученных по геохимическим данным

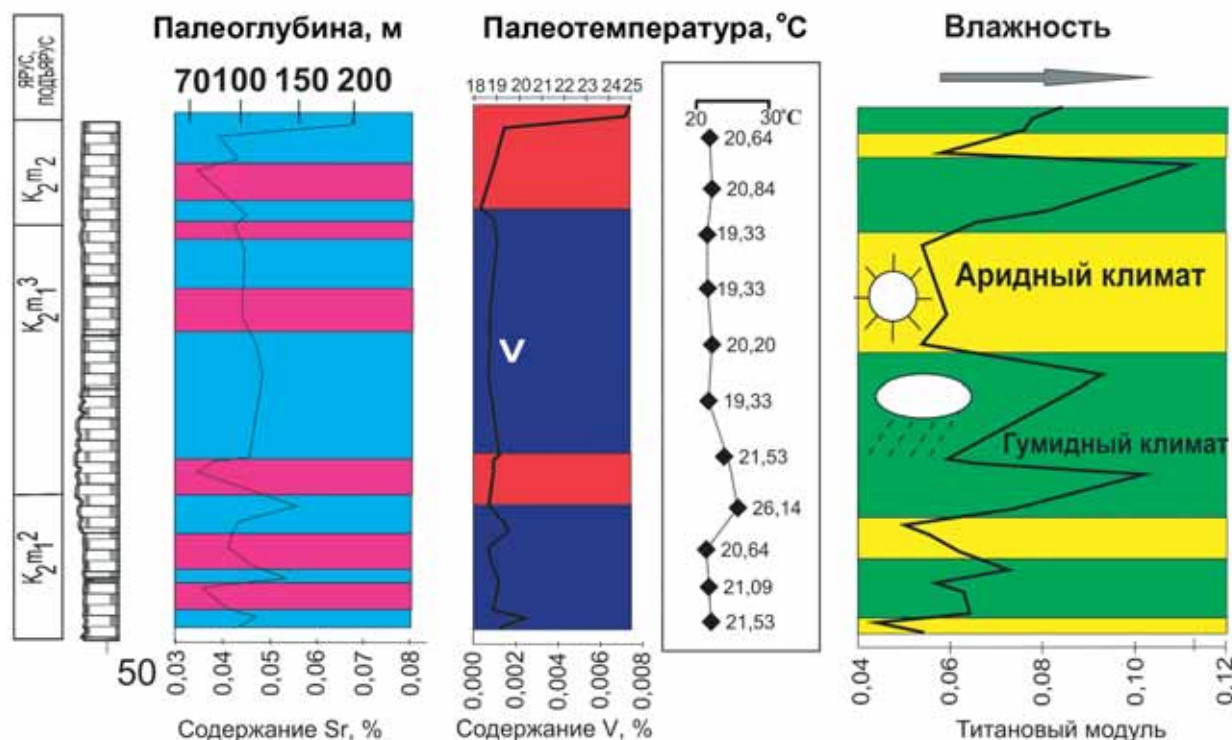


Рис. 10. Кривые изменения палеобатиметрии, палеотемпературы и влажности в отложениях маастрихта Ульяновско-Саратовского прогиба, построенные по геохимическим данным

В кампан-маастрихтское время палеоглубина последовательно увеличивалась и изменялась от 100 до 200 м (в среднем около 150 м). На это указывает низкое биоразнообразие палеоценоза, представленного двумя видами иноцеромов в кампанское время. Комплекс фауны представлен иглокожими, котры которые могли питаться губками (что указывает на возможность существования губок в этой части палеобассейна, несмотря на отсутствие их остатков). Все эти формы обитали на палеоглубине не менее 100 м (нижняя сублитораль-батиаль), а сравнительно мелководные формы — устрицы, двустворки-пектениды, очень малочисленные, как правило, угнетенные и, возможно, аллохтонные.

Заключение. В результате интерпретации геохимических данных получены качественные и количественные характеристики изменения основных палеогеографических параметров палеобассейна в районе Ульяновско-Саратовского прогиба и прилегающих к нему областей денудации (рис. 5, 10). Рассчитаны значения палеотемпературы земной поверхности в областях денудации и выделены соответствующие циклы. Так, в турон-кампанском интервале выделена климатическая цикличность, включающая эпохи относительного похолодания (турон-коньяк) с палеотемпературой около 20 °C, эпоху относительного потепления в середине позднего кампана (20–24 °C), эпоху похолодания в конце позднего кампана (19–21 °C) и эпоху потепления на рубеже кампана и маастрихта и в начале маастрихта.

В маастрихте выделено два климатических цикла, начинающихся со времени относительного похолодания (около 19 °C) и заканчивающихся временем относительного потепления (около 20 °C, в конце маастрихта до 25 °C). Также выявлены циклы изменения влажности климата: два цикла в кампанское время, три цикла — в раннем маастрихте, в позднем маастрихте — один цикл. Границе раннего и позднего маастрихта соответствует смена аридных условий на гумидные. На кривых палеобатиметрии выделены трансгрессивно-регрессивные циклы: один в позднетурон-коньякское время, два в позднекампанское время, пять в раннемаастрихтское время, один в позднемаастрихтское время. Оценены вариации глубины: в турон-коньякское время в диапазоне 70–80 м, в кампан-маастрихтское время палеоглубина изменялась от 100 до 200 м, в среднем около 150 м.

Финансирование. Работа поддержана РФФИ (проекты № 18-05-00503, 18-05-00495), частично выполнена в рамках научно-просветительской экспедиции «Флотилия плавучих университетов», частично — при поддержке Минобрнауки РФ (проект № 2019-0858) и Программы деятельности научно-образовательного центра мирового уровня «Рациональное недропользование» на 2019–2024 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (распоряжение Правительства РФ от 30 апреля 2019 г. № 537). Статья подготовлена по теме государственного задания Института географии РАН № 0148-2019-0007 «Оценка физико-географических, гидрологических и биотических

изменений окружающей среды и их последствий для создания основ устойчивого природопользования». Исследование выполнено при поддержке

Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Математические методы анализа сложных систем»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев А.С., Олферьев А.Г., Шик С.М. Объяснительная записка к унифицированным стратиграфическим схемам верхнего мела Восточно-Европейской платформы. СПб.: ВСЕГЕИ, 1995. С. 1–58.

Бадулина Н.В., Яковичина Е.В., Габдуллин Р.Р. и др. Литолого-геохимическая характеристика и условия формирования верхнемеловых разрезов Северного Перитетиса // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 2016. № 4–5. С. 136–147.

Бондаренко Н.А. Стратиграфия и условия седиментации сантонских, кампанских и маастрихтских отложений правобережья Нижнего Поволжья: Автореф. канд. дисс. Саратов, 1990. 22 с.

Габдуллин Р.Р. Ритмичность верхнемеловых отложений Русской плиты, Северо-Западного Кавказа и Юго-Западного Крыма. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. 304 с.

Габдуллин Р.Р., Иванов А.В. Ритмичность карбонатных толщ. Саратов: Изд-во Сарат. гос. ун-та, 2002. 52 с.

Габдуллин Р.Р., Самарин Е.Н., Иванов А.В. и др. Астрономо-климатические циклы в разрезе верхнемеловых отложений Саратовского Поволжья // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2014. № 5. С. 55–71.

Герасимов П.А., Мигачева Е.Е., Найдин Д.П., Стерлин Б.П. Юрские и меловые отложения Русской платформы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1962. 195 с.

Енгальцев С. Ю., Панова Е. Г. Геохимия и генезис песчаников восточной части главного девонского поля на северо-западе Русской плиты // Литосфера. 2011. № 5. С. 16–29.

Климат в эпохи крупных биосферных перестроек / Гл. редакторы М.А. Семихатов, Н.М. Чумаков. М.: Наука, 2004. 299 с. (Тр. ГИН РАН; Вып. 550).

Матесова М.Н. Геологические экскурсии в окрестности города Вольска // Тр. Вольского окружного научно-образовательного музея. Вып. 3. Вольск, 1930. 56 с.

Матесова М.Н. Полезные ископаемые Вольского Поволжья. Ч. 1 // Тр. Вольского окружного научно-образовательного музея. Вып. 4. Вольск, 1935. 68 с.

Сельцер В.Б., Иванов А.В., Яшков И.А. Очерк геологии и палеонтологии Саратовско-Вольского Поволжья // Путеводитель полевого семинара Всеросс. науч. конф. «Золотой век российской малакологии», посвященной 100-летию со дня рождения профессора В.Н. Шиманского. М.; Саратов: ПИН РАН, СГТУ, 2016. 28 с.

Склярёв Е.В. Интерпретация геохимических данных. М.: ИнтернетИнжиниринг, 2001. 288 с.

Тейс Р.В., Найдин Д.П. Палеотермометрия и изотопный состав кислорода органогенных карбонатов. М.: Наука, 1973. 254 с.

Li C., Yang S.Y. Is chemical index of alteration (CIA) a reliable proxy for chemical weathering in global drainage basins? // Amer. J. Science. 2010. Vol. 310, N 2. P. 111–127.

McLennan S.M. Weathering and Global Denudation // J. Geol. 1993. Vol. 101. P. 295–303.

Nesbitt H.W., Young G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // Nature. 1982. Vol. 299, N 5885. P. 715–717.

Yang J., Cawood P.A., Du Y. et al. Global continental weathering trends across the Early Permian glacial to postglacial transition: correlating high and low-paleolatitude sedimentary records // Geology. 2014. Vol. 42, N 10. P. 835–838.

Поступила в редакцию 08.12.2020

Поступила с доработки 14.01.2021

Принята к публикации 29.01.2021