

Моделирование в геологии

УДК 551.583.7

ВАРИАЦИИ ПАЛЕОКЛИМАТА ДОКЕМБРИЙСКОЙ ЕВРОПЫ В КОНТЕКСТЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2018 г. А. Б. Богачкин, О. И. Меркулов, С. А. Носова

АО "Нижне-Волжский НИИ геологии и геофизики"

Аннотация: выполнено обобщение результатов палеотемпературных определений. На основе реконструкций положения плит в различные периоды докембрийской эволюции Земли показана принципиальная широтная палеотемпературная зональность. Сводные данные демонстрируют изменения палеотемператур в пределах Европейской платформы в отдельные временные интервалы.

Ключевые слова: палеотемпература, реконструкция, геологическое моделирование.

Богачкин Алексей Борисович e-mail: bogachkin@yandex.ru

PALEOCLIMATE VARIATIONS OF PRECAMBRIAN EUROPE IN THE CONTEXT OF GEOLOGICAL MODELING

A. B. Bogachkin, O. I. Merkulov, S. A. Nosova

JSC "Lower-Volga Research Institute of Geology and Geophysics"

Abstract: Generalization of determined paleotemperature results is performed. The latitudinal paleotemperature zonality is proved based on reconstructions of plate position during different Precambrian periods of Earth evolution. Using this basis the paleotemperature forecast within the European platform was made.

Key words: paleotemperature, reconstruction, geological modeling.

Поверхностная палеотемпература является одной из важнейших характеристик при геологическом моделировании. Процессы формирования осадочных толщ, созревания РОВ и реализации нефтегазоматеринского потенциала находятся в прямой зависимости от температурного режима, который во многом определяется поверхностными условиями.

В современных программных продуктах, реализующих геологическое моделирование, существует несколько вариантов

прогноза термического режима недр: с использованием теплового потока, градиентов температур, температуры в верхней части мантии (термического основания) и температуры в основании осадочной толщи. Однако во всех этих вариантах для адекватного распределения поля пластовых температур требуются замеры современных и модельное распределение палеотемператур на поверхности. С математической точки зрения современная и палеоповерхностная температуры являются гра-

ническими условиями при решении соответствующих краевых задач, на которых основано построение термических моделей и их эволюция во времени.

Тепловой поток (являясь основным источником информации о тепловом состоянии Земли) в верхней части земной коры испытывает значительные вариации в зависимости от климатической обстановки на ее поверхности. В результате проведенных Головановой И. В. и др. [2, 3] исследований определено, что при расчете теплового потока необходимы поправки, учитывающие влияние палеоклимата. Последние могут составлять 20–40% плотности теплового потока в зависимости от глубины скважины (рис. 1) [2, 3].

Изучение эволюции палеоклимата, особенно в ранние этапы развития нашей планеты, сопряжено со значительными трудностями, связанными с отсутствием достоверных знаний о разнообразных геологических, атмосферных и астрономических процессах и явлениях, имевших место в далеком геологическом прошлом. Традиционно для изучения геологических явлений и процес-

сов используется принцип актуализма. Однако такой подход применим для изучения без существенных поправок геологической среды относительно недалекого прошлого, например кайнозоя. При углублении в геологическое прошлое нашей планеты прямая реализация принципа актуализма, очевидно, приведет к значительным отклонениям построенной модели от реальной геологической обстановки. Это касается в том числе и прогноза палеотемператур.

Палеоклиматические изменения являются квинтэссенцией взаимодействия двух глобальных факторов: астрономического и планетарного. Первый затрагивает «орбитальные» теории, в которых предполагается зависимость климата от изменения орбитальных характеристик Земли. Развитие этих теорий началось в XIX веке с работ Ж. Адемара [Adhemar, 1842], Дж. Кролля (1875). В начале XX века (1930 г.) была опубликована работа сербского ученого М. Миланковича «Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата». Фундаментальное исследование, проведенное этим ученым, настолько сильно

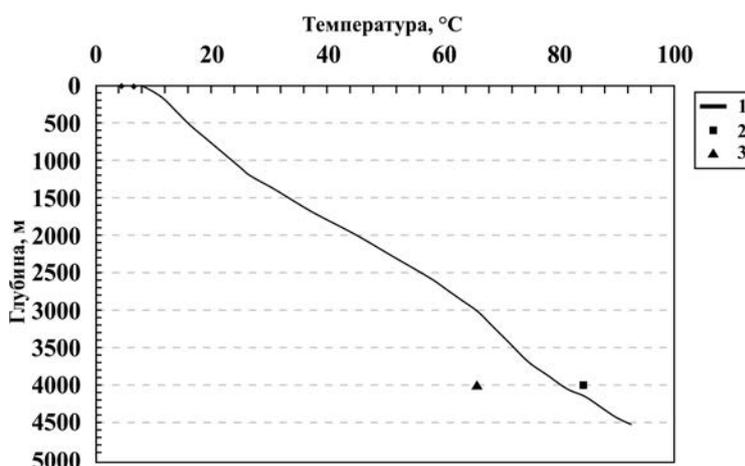


Рис. 1. Проверка метода расчета глубинных температур
(Голованова И. В., Сальманова Р. Ю. [2])

1 – термограмма скв.1 Леузинской; 2 – температура на глубине 4000 м, рассчитанная по исправленному на влияние палеоклимата значению плотности теплового потока (50 мВт/м²); 3 – температура на глубине 4000 м, рассчитанная по значению плотности теплового потока в интервале 470–1160 м (35 мВт/м²), полученного без учета влияния палеоклимата

повлияло на развитие «орбитальной» теории, что ее синонимом стало понятие «теория Миланковича».

Согласно теории М. Миланковича, экстремальные климатические эпохи «укладывались» в рассчитанную им цикличность, которая определяется взаимным влиянием Солнца и планет Солнечной системы. Вариации орбитальных элементов Земли (угол наклона земной оси), сказываясь на уровне инсоляции, приводили к образованию климатических экскурсов. Несмотря на некоторые недостатки, предложенная сербским ученым теория (циклы Миланковича) по-прежнему остается актуальной и является «отправной точкой» ряда исследований, научных дискуссий и критики [1].

В последние годы в различных источниках появляются материалы исследований о палеопланетарных характеристиках Земли. Американским геологам Стиветсу Мейесу (Висконсинский университет) и Альберто Маливерно (Колумбийский университет) в результате исследования состава горных

пород формации Сяолин (1,4 млрд лет) удалось сопоставить полученные данные с палеоклиматическими изменениями. Оценив скорость седиментации, этим исследователям удалось рассчитать основные параметры орбиты Земли и расстояние до Луны. Согласно полученным результатам длительность суток в то время составила 18,7 часов, расстояние до Луны – 341 тыс. км (на настоящий момент – 384 тыс. км). Сравнительные тесты, проведенные этими исследователями для пород эоцена (55 млн лет, Китовый хребет), показали сопоставимые с современными параметры – длительность суток меньше на несколько минут, а расстояние до Луны меньше примерно на 1300 км. На рисунке 2 приведена эволюция длительности земных суток и расстояния от Земли до Луны согласно исследованиям С. Мейеса и А. Маливерно.

При прочих равных условиях изменения подобных планетарных характеристик должны повлиять не только на климатическую составляющую. Увеличение скорости

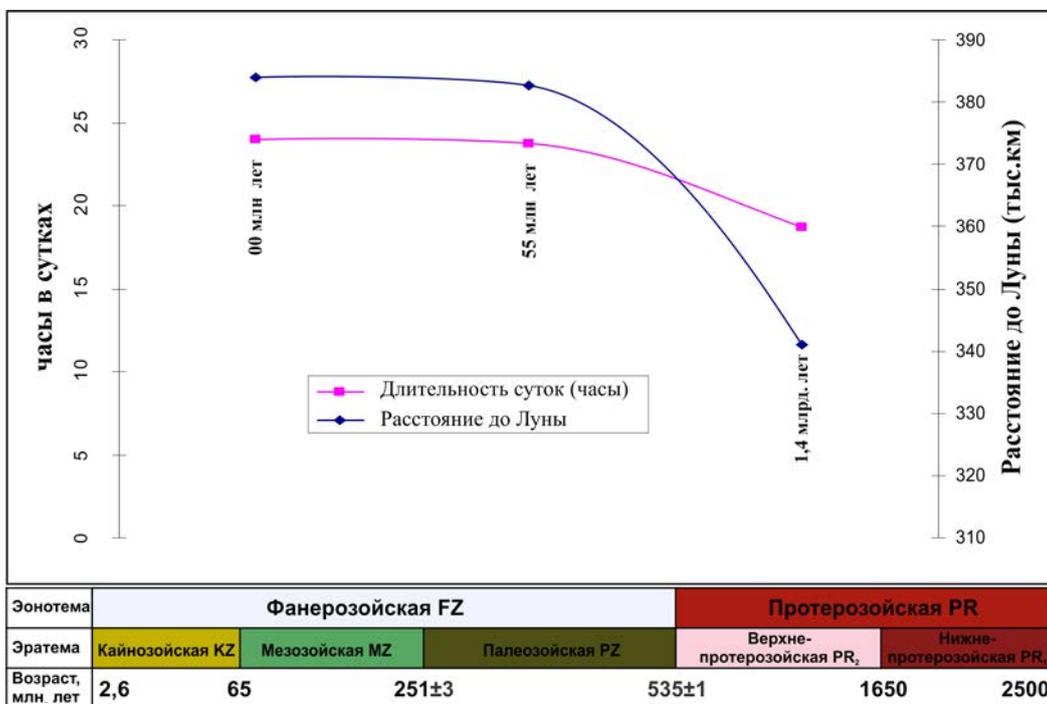


Рис. 2. Эволюция длительности земных суток и расстояния от Земли до Луны (по С. Мейес, А. Маливерно, 2018 г.)

вращения Земли, влекущее за собой уменьшение гравитации на поверхности, должно было отразиться на процессах седиментации. Например, можно ожидать увеличение дальности переноса терригенного материала в бассейны седиментации. Последнее должно сказаться на расположении границ «привычных» геологам литолого-фациальных зон. Не исключено, что обозначенные планетарные изменения могли повлиять на температурную и климатическую зональность.

При прогнозировании температурного режима на поверхности планеты в архее и протерозое необходимо учитывать влияние открытого сравнительно недавно «парадокса слабого молодого солнца» [8, 9]. Согласно этой концепции, 4 млрд лет назад наше светило излучало приблизительно на 30% меньше энергии, чем сейчас. Два миллиарда лет назад наша планета все еще получала лишь 80% той солнечной энергии, что имеет сегодня. При таких условиях вода на поверхности планеты могла полностью замерзнуть, что, вероятно, привело бы к невозможности возникновения жизни в нашем понимании. В то же время исследования архейских и протерозойских пород показывают, что в это время на Земле были длительные периоды влажного и теплого климата. В настоящее время большинство ученых-палеоклиматологов объясняет этот парадокс наличием в атмосфере палеоземли большого количества парниковых газов – метана и углекислого.

Планетарные теории, рассматривающие изменения климата, базируются на «традиционных» (или ставших таковыми) взглядах и методиках. Для реконструкции палеозойской истории климата «базовым» является палеонтологический метод. Построение палеоклиматических реконструкций докембрия (протерозоя) требует сопоставления результатов, полученных разными методами (литологическим, литохимическим и

геохимическим). Учитывая высокую степень неопределенности при прогнозе палеотемператур для докембрийского периода, целесообразно рассматривать эти данные в комплексе с результатами реконструкций положения континентальных плит и щитов в различные временные периоды.

Реконструкция положения древних плит прочно «вплетена» в исследования климата различных геологических эпох. Для докембрийского времени это особенно актуально, так как палеомагнитные определения, используемые в качестве «базовых» при палинспастических реконструкциях более поздних эпох, – единичны, а их достоверность сомнительна и может быть использована только в качестве дополнительных данных.

Палеоклиматические реконструкции протерозойского времени предполагают использование литологических индикаторов. Приуроченность литологических особенностей терригенных образований к климатическим условиям показана в фундаментальных работах Страхова Н. М. (1960–1963 гг.). В последующие годы это направление палеоклиматологии развито в работах Синицына В. М. (1967 г.), Верзилина Н. Н. (1975 г., 1979 г.), Ясаманова Н. А. (1985 г., 1986 г., 1989 г.) и других ученых. Если литологические исследования восстанавливают информацию о палеоклимате в бассейнах седиментации, то интерпретация геохимических данных позволяет оценить (с некоторыми допущениями) изменения климата в областях размыва (Маслов А. В., 2003).

Широкое применение литохимических данных при палеоклиматических реконструкциях начато в 1960-х с работ Мигдисова (1960 г.), Юдовича (1981 г.) и др. Выделен ряд геохимических соотношений (модулей – гидролизатный (ГМ) – $Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3 + FeO/SiO_2$, алюмокремниевый (АМ) – Al_2O_3/SiO_2 , титановый (ТМ) – TiO_2/Al_2O_3 , натриевый (НМ) – Na_2O/Al_2O_3 ,

и др.), являющихся литохимическими индикаторами изменения палеоклиматических условий. Индикаторы активно используются в практике реконструкции палеоклиматических обстановок докембрийского времени (Янов, 1971 г.; Юдович, 1981 г.; Мележик, Предовский, 1982 г.; Сараев, 1983 г.; Ишерская, 1986 г. и др.). Однако результаты этих работ оценивают «полуколичественные» характеристики палеоклимата (влажный тропический, аридный, гумидный и т.д.) и не позволяют «выйти» на численные температурные параметры, столь необходимые при геологическом моделировании. Наиболее надежными в этом плане являются находки ледниковых образований, безальтернативно определяющие температуру поверхности земли ≤ 0 °С. Наглядно демонстрируют климатическую зональность реконструкции положения плит и континентов, выполненные с учетом областей распространения ледниковых отложений (тиллов и их производных). Учитывая более «широкую», по сравнению с климатическими поясами, температурную зональность, можно по разрозненным данным судить об изменении средней поверхностной температуры.

Палеотемпературные изменения внеледниковых областей в докембрийское время, в отличие от более поздних эпох, по-прежнему остаются малоизученными. Последнее связано как с недостаточной изученностью докембрийских пород, так и со степенью их преобразованности в последующие эпохи.

Предполагается, что формирование континентальной коры произошло в архее за счет вторичного переплавления базальтовых пластин океанической коры. Не вдаваясь в «механику» процесса образования первых разрозненных континентальных плит (форму и расположение которых в настоящее время установить не представляется возможным), остановимся на пред-

положении об образовании из этих разрозненных плит первого суперконтинента, названного Сорохтиным О.Г. и Ушаковым С.А. Моногеей (1989 г., 1993 г.), а Хаинным В.Е. и Божко А.Н. Пангеей (1988 г.).

Согласно сложившейся в настоящее время модели (Монин А.С., 1988 г.), асимметрия в расположении центра тяжести тела Земли (смещение формировавшегося в этот период твердого ядра и начало образования континентальных плит) искажала траекторию ее вращения. Таким образом, расположение ранних суперконтинентов в этих условиях становилось возможным только в экваториальной зоне. Очевидно, этим и объясняется отсутствие (или ненахождение) следов отложений ледниковых покровов, приуроченных к территориям Мегатеи, Мезогееи или Пангееи (Чумаков Н.М., 1978 г.). При этом не исключается существование высокогорных оледенений.

Для позднего архея (3,5–2,6 млрд лет) температурные условия укладываются в диапазон $\sim +70 - +90 - 150$ °С. Низкие (70 °С) температуры получены по результатам соотношения изотопов кислорода к водороду в кремнистых породах серии Фиг–Три. Более высокие показатели (90–150 °С) получены по результатам изучения сланцев серии Иисуса (Ясаманов Н.А., 1994 г.). Кроме того, наличие в отложениях архея следов живых организмов (строматолиты, онколиты, органогенные образования микробиот) свидетельствует об отсутствии критических для развития жизни микроорганизмов температур (Ясаманов Н.А., 1994 г.).

Глобальное (Гуровское) оледенение приурочено к временному интервалу 2,5–2,3 млрд лет и затронуло большинство континентальных платформ на суперконтиненте Моногея. При существующей модели вращения Земли механизм его образования неоднозначен. Единственное правдоподобное объяснение – это высокогорное оледенение на континенте, расположенном в тро-

пической зоне (аналогом могут быть формации Витватерсранд в Ю. Африке).

Согласно предлагаемому сценарию приблизительно 2,4 млрд лет назад произошла смена средних температур земной поверхности от +50...+60 до +7...+8 °С (средняя поверхностная температура современной Земли +14,8 °С). Столь значительное уменьшение температуры приурочено к моменту образования серпентинитового слоя океанической коры и развитию активных реакций связывания CO₂ в карбонатах. Последнее привело к значительному снижению парникового эффекта (существовавшего до этого в архее в связи с плотной углекислотной атмосферой) и средней температуры земной поверхности (Сорохтин О. Г., 2002 г.).

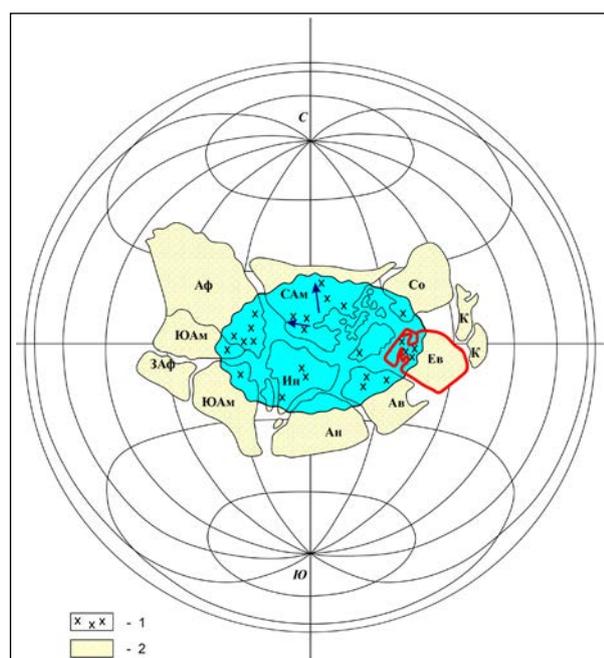


Рис. 3. Реконструкция Моногеи на время около 2,5–2,4 млрд лет назад в проекции Ламберта
(по Сорохтину О. Г. и Ушакову С. А., 2002 г. [5] с дополнениями)

1 – тиллиты и тиллоиды; 2 – консолидированная континентальная кора; стрелками на Канадском щите показаны выявленные направления ледниковой штриховки; белым цветом – область покровного оледенения. Ав – Австралия; САМ и ЮАм – Северная и Южная Америка; Ан – Антарктида; ЗАф, – Западная Африка; Аф – Африка; Ев – Европа; Ин – Индия; К – Северный и Южный Китай; Сб – Сибирь

Реконструкция положения Моногеи Сорохтина О. Г. и Ушакова С. А. согласуется с предложенной моделью и указывает на распространение отложений ледникового генезиса (рис. 3). Весьма осторожно следует подходить к оценке температур в областях оледенения, учитывая отличающиеся от современных планетарные характеристики – скорость вращения, атмосферное давление, состав атмосферы. Вполне вероятно, что оледенение могло появиться и при положительных температурах, но в иных атмосферных условиях.

Около 2,3 млрд лет назад в результате эндогенных процессов суперконтинент Моногея распался с образованием отдельных кратонов. Согласно реконструкции, представленной Сорохтиным О. Г., эти «осколки» достаточно равномерно расположились в приэкваториальной зоне низких широт (рис. 4). Около 1,9–1,8 млрд лет назад отдельные осколки Моногеи образовали антиподный ему континент – Мегагею (на противоположной стороне Земли).

По оценке В. Е. Хаина (2001 г.), таких обособленных плит, слагающих новый континент, тогда могло быть более 30. Сросшиеся в новый континент осколки обрамлены карельской и одновозрастной ей складчатостью и областями активизации и переработки архейской коры (рис. 5). Хаин В. Е. и Божко Н. А. (1988 г.) предполагают появление суперконтинента к рубежу 1,7 млрд лет и обозначают этот континент как Пангея I, в отличие от более поздней вегенеровской Пангеи II. Широкое распространение в это время красноцветных кор выветривания (Анатольева, 1978 г.) может свидетельствовать о нахождении этого континента в низких широтах, а абсолютные отметки его рельефа были существенно ниже снеговой линии на экваторе.

На территории Урала к нижнему рифею относят саткинскую свиту. В составе последней присутствуют строматолитовые

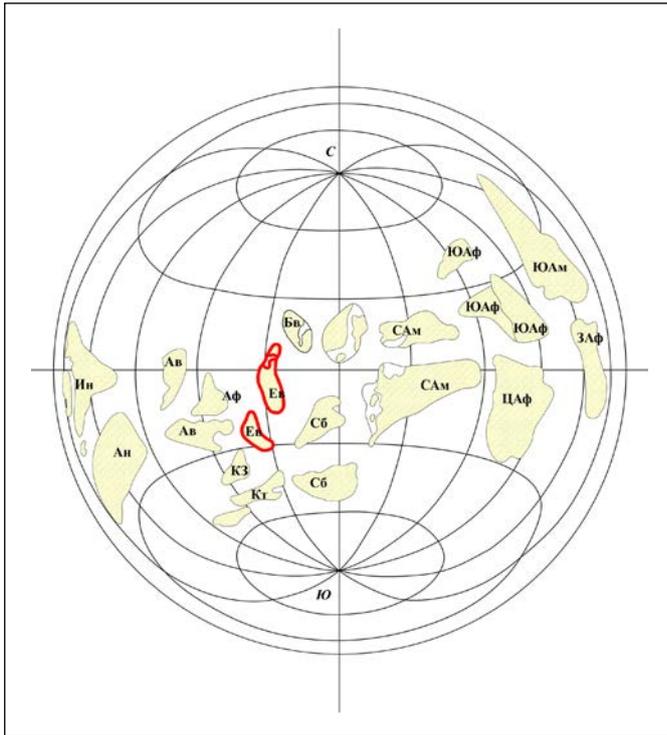


Рис. 4. Распад Могогеи около 2,2 млрд лет назад

Кз – Казахстан; ЮАф – Южная Африка; ЦАф – Центральная Африка; Кт – Китай; остальные обозначения (рис. 3)

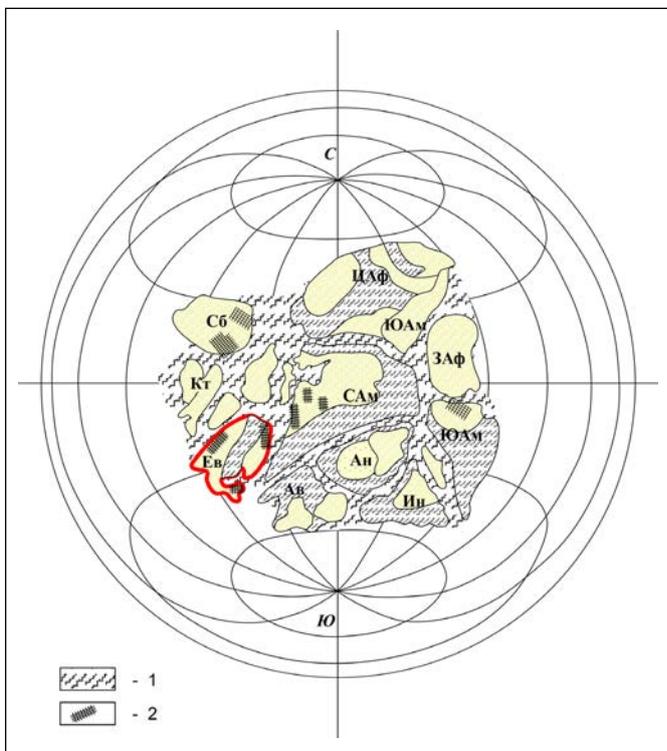


Рис. 5. Могогея 1,8 млрд лет назад

1 – складчатые пояса; 2 – красноцветы; остальные обозначения (рис. 3 и 4)

отложения, образование которых связано с жизнедеятельностью сине-зеленых водорослей (кусиела, омахтения, тиссагенида). Здесь по высокому соотношению кальция к магнию предполагают, что образование этого комплекса отложений происходило при средних температурах 50–55 °С [7].

На рубеже 1,5–1,4 млрд лет обнаруживаются признаки распада континента Могогея. Процесс сопровождался образованием рифтогенных трогов и многочисленных авлакогенов. Из окраинных рифтовых структур формируются анорогенные вулканоплутонические пояса. Возможно, фрагменты Могогеи центробежно дрейфовали в разные стороны от центра тяжести бывшего суперконтинента (рис. 6). Учитывая приуроченность Европейской плиты (ЕвП) в ранне-среднерифейское время к экваториальной зоне (рис. 6), становится очевидным, что предполагаемый Ясомановым Н. А. температурный режим (50–55 °С) распространен на всей территории ЕвП.

Сорохтиным О. Г. предложена реконструкция следующего суперконтинента – Мезогее (рис. 7). При реконструкции положения плит он учитывал палеомагнитные данные (заимствованные из реконструкций Зоненштайна Л. П. и др. 1986 год), «унаследованность» движений континентов и данные о распространении красноцветных кор выветривания в среднем рифее (Анатольева, 1978 г.).

Интенсивное образование карбонатов (высокомагнезиальных известняков и доломитов), приуроченное к среднему рифею, может свидетельствовать о развитии обширных шельфовых пространств и морского те-

Распад Мезогеи обозначился на рубеже 900 млн лет назад, когда произошло перераспределение «слипшихся» плит в два континентальных блока: северного – Лавразию и южного – Гондвану (рис. 8 А).

Между ними (около 850 млн лет) возник океанический бассейн – Прототетис. Образованные континенты с ростом океана смещались к северному и южному полюсам, занимая приполярные области. О последнем свидетельствуют находки тиллитов и тиллоидов позднего рифея на этих континентах (Чумаков Н.М., 1978). Подобное географическое расположение материковых образований способствовало развитию во второй половине позднего рифея Африкано-Австралийского оледенения Гондваны и Канадского оледенения в Лавразии, а также обширного Лапландского оледенения Европы, Казахстана и Китая в терминальном рифее и (или) венде.

По данным Ясаманова Н.А., следы оледенений возрастом около 950 млн лет обнаружены в Гренландии, Норвегии и на Шпицбергене. Следы присутствия ледниковых отложений (Стуртианское оледенение – 750 млн лет назад) обнаружены в Австралии, Китае и на юго-западе Африки.

Около 750 млн лет назад практически одновременно существовали ледниковые покровы в Южной и Центральной Африке, в Австралии и на востоке Южной Америки (Чумаков Н.М., 1978 г.). Представленные Сорохтиным О.Г. реконструкции позволяют оценить ширину охватывающего экватор Земли океана Прототетис в 6–10 тыс. км, а Япетус (для венда) в 2000 км (рис. 8 Б). К этому временному интервалу следует отнести наиболее выраженное Врангинское оледенение (660–680 млн лет), выявленное по ледниковым образованиям в Северной Америке, Гренландии, на Шпиц-

бергене, Британских островах, Скандинавии, Франции, Китае, Австралии, Африке, Южной Америке и северо-востоке СССР [6].

Наряду с ледниковыми «маркерами», отмечающими ледниковые эпизоды, в архейско-протерозойское время (особенно в позднем протерозое) обнаруживаются породы, свидетельствующие о существовании более теплых климатических условий. Эти периоды характеризуются присутствием в разрезах красноцветных образований, доломитов, органогенных известняков, сложенных фитолитами – продуктами жизнедеятельности сине-зеленых водорослей и бактерий, обитавших, вероятно, в тропических морях. В этот ранний период жизни Земли на ее поверхности существовали специфические ландшафты – примитивно-пустынные (Перельман А.И.) с отсутствием наземных форм растительности. При этом развитие элювиальных, эоловых, пролювиально-делювиальных, аллювиальных и озерных образований позволяет получить представление о некоторой климатической зональности.

Согласно единичным температурным определениям, проведенным магниезильным методом по остаткам позднерифейских строматолитов Тимана, Афганистана и Восточного Саяна, средние поверхностные температуры в этот период охватывали диапазон 35–45 °С (Ясаманов Н.А.).

Исследования строматолитов из миньерской (Minjaria, Katavia) и укской (Linella) свит Урала показали значительный температурный «разброс» от 30–32 °С до 45–50 °С соответственно [7].

Присутствие в глауконитах Укской свиты (основание верхнего рифея) Mg в содержаниях 0,4–0,45 ф. е. (Маслов А.В., Горожанин В.М., 1998) говорит о том, что формирование исходных осадков происходило

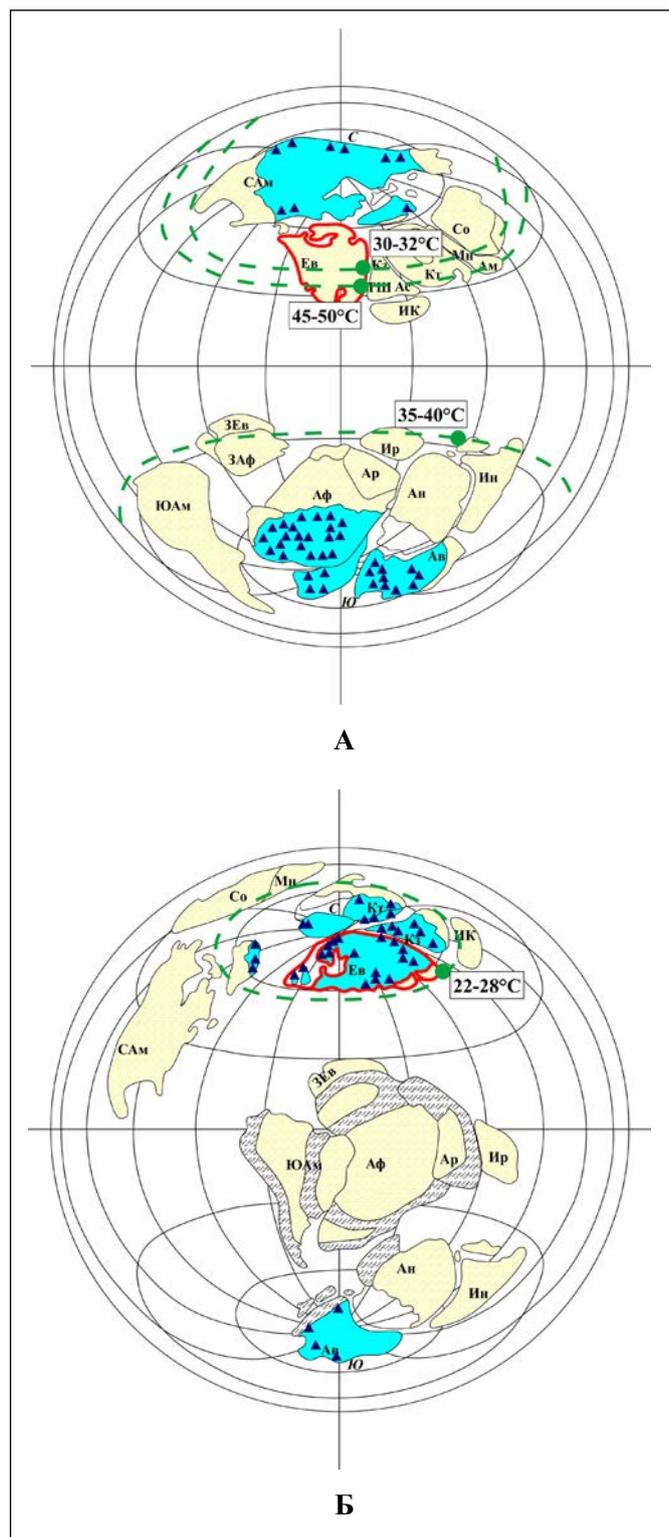


Рис. 8. Расположение Лавразии и Гондваны

А – 800–750 млн лет назад; Б – 650 млн лет назад (треугольниками отмечены местонахождения тиллитов и тиллоидов, по Н. М. Чумакову, 1978 г.): Мн – Монгольская плита; Ам – Амурская плита; Ир – Иранская плита (по Сорохтину О. Г. и Ушакову С. А. [5] с дополнениями)

в морском бассейне с температурой 22–28 °С [4].

Приведенные палеотемпературы могут свидетельствовать об установлении в предвендское время на территории Европейской платформы неустойчивого температурного режима с общим трендом в сторону похолодания, в сравнении с предыдущими эпохами. Об этом же свидетельствует сокращение объема карбонатонакопления и увеличение доли в осадочном чехле терригенных образований, в которых все больший объем захватывали полимиктовые разности (рис. 8 Б).

По данным Ясоманова Н. А., в раннем венде отмечается значительное снижение средних глобальных температур в сравнении с поздним рифеем. В это время обширные полярные и приполярные территории были заняты ледниками (рис. 8), а в достаточно узком экваториальном поясе средние температуры были немногим выше 30 °С. Поздний венд ознаменовался общим потеплением со средними глобальными температурами 25–30 °С и ослабленным тропическим климатом в полярных областях [7].

Около 550 млн лет назад завершилось существование континента Мезогоя и началось формирование палеозойской Гондваны. Не вдаваясь в подробности механизма «поворотных» этапов изменения положения континентов, описываемых в работе Сорохтина О. Г. [5], отметим все-таки стремительное перемещение континентальных масс из северных широт в экваториальные области (рис. 9).

Последнее привело к распространению теплого климата на большинст-

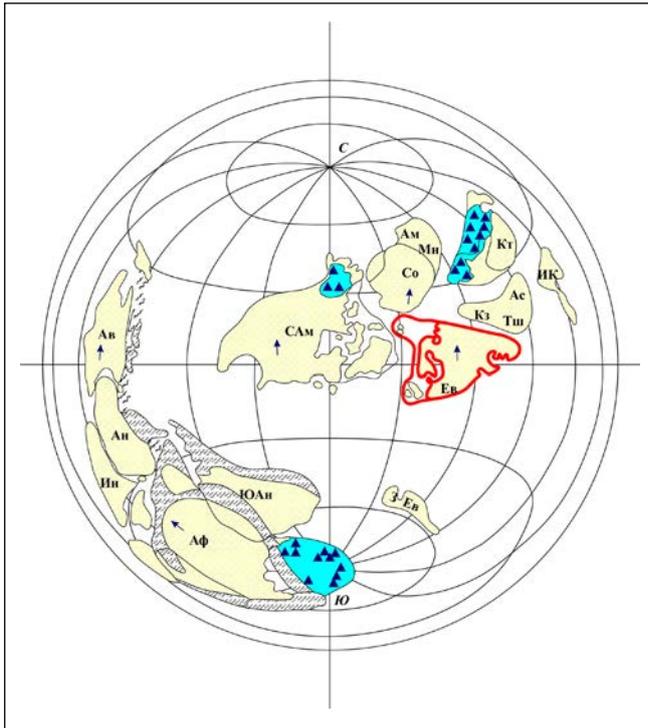


Рис. 9. Распад Мезогеи, ситуация на время около 550 млн лет назад

ве континентов, в том числе на территории Европейской платформы. Покровные оледенения зафиксированы лишь на ограниченной территории Западной Африки.

Выводы

Согласно доминирующим в настоящее время концепциям, в докембрийское время в пределах Восточно-Европейской платформы длительные периоды теплого климата сменялись периодами оледенений. Влияние на климатические изменения оказало сложное сочетание факторов астрономического и планетарного характера. При этом для рассматриваемого временного диапазона находки ледниковых образований (тиллитов и тиллоидов) являются единственным неоспоримым температурным свидетельством.

Значимое влияние на палеоклимат в пределах Восточно-Европейской платформы оказало географическое положение региона относительно полюсов. Образования ледникового генези-

са свидетельствуют о расположении в течение целого ряда геологических периодов изучаемой территории в полярных и приполярных областях. Эти периоды характеризуются наиболее резкими климатическими изменениями на планете. Более «плавная» климатическая дифференциация и общее (глобальное) потепление устанавливаются при доминировании в полярных областях океанов и морей. В такие периоды температурная разница между экватором и полюсами составляет 20–30 °С.

Завершившийся обширным похолоданием и развитием материкового оледенения протерозойский этап сменился в начале кембрия значительным потеплением. Практически на всех континентах установлены тропические условия. Тропический режим подтвержден распространением экстракарбонатных, сульфатно-карбонатных и эвапоритовых формаций, присутствием археоциатовой, коралловой, брахиоподовой и водорослевой фауны, а также развитием биогермных массивов, осадочных железных руд, фосфоритов и т.д. Согласно палеоклиматической реконструкции, территория Восточно-Европейской платформы, по редким находкам комплексов тропической фауны, соотносится в это время с тропическим и экваториальным поясами.

Приведенные выше обобщения позволяют дифференцировать докембрийскую палеоклиматическую эволюцию и обоснованно подойти к моделированию температурных полей и реализации нефтегазоматеринского потенциала древними осадочными толщами.

Л и т е р а т у р а

1. Большаков В. А. Новая концепция орбитальной теории палеоклимата. – М., 2003. – 256 с.
2. Голованова И. В., Сальманова Р. Ю. Учет искажающего влияния палеоклимата при оценке температур глубоких горизонтов западной части Республики Башкортостан // Актуальные вопросы инженерной геологии, гидрогеологии и рационального недропользования: материалы IX Университетских геологических чтений. – Минск: изд. Центр БГУ, 2015. – 180 с.
3. Голованова И. В., Сальманова Р. Ю., Демежко Д. Ю. Реконструкции климата на Урале по геотермическим данным // Геология и геофизика. – 2012. – № 12. – С. 1776–1785.
4. Маслов А. В., Крупенин М. Т., Гареев Э.З. Литологические, литохимические и геохимические индикаторы палеоклимата (на примере рифея южного Урала) // Литология и полезные ископаемые. – 2003. – № 5. – С. 502–525.
5. Сорохтин О. Г., Ушаков С. А. Развитие Земли. – М: изд-во МГУ, 2002. – 506 с.
6. Ясаманов Н. А. Древние климаты земли. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1985. – 161 с.
7. Ясоманов И. А. Климаты рифейского и вендского времени // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 1994. – № 2.
8. Feulner, Georg (2012). "The faint young Sun problem". *Reviews of Geophysics*. 50 (2).
9. <http://www.membrana.ru/particle/14380>.