

ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ

УДК: 551.83

ГЛОБАЛЬНЫЕ ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАННЕГО ПАЛЕОЗОЯ В СВЕТЕ НОВЕЙШИХ ДАННЫХ

© Рубан Д.А.

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», г. Ростов-на-Дону

DOI:10.24412/1997-8316-2024-113-30-41

Аннотация: появление большого количества новых данных об особенностях палеогеографического развития кембрийского, ордовикского и силурийского периодов требует их систематизации. В настоящей работе внимание обращается на температурный режим, содержание кислорода и углекислого газа в атмосфере, параметры и конфигурацию элементов палеопространства, вулканизм, импакты и биоразнообразие. Данные периоды характеризуются своеобразием и принципиальными отличиями от современных условий. Однако соответствующая информация часто отличается неопределенностью. Проведенный анализ новейших данных показывает, что их получение в значительной мере меняет представления о глобальных палеогеографических особенностях раннего палеозоя, которые следует учитывать в геологических исследованиях и образовании.

Ключевые слова: глобальная среда, кембрий, ордовик, силур, эволюция Земли.

E-mail: ruban-d@mail.ru

GLOBAL PALAEOGEOGRAPHICAL PECULIARITIES OF THE EARLY PALEOZOIC IN THE LIGHT OF THE NEWEST DATA

© Ruban D.

Southern Federal University, Rostov-on-Don

Abstract: The appearance of the huge amount of new data on the peculiarities of the Cambrian, Ordovician, and Silurian periods requires their systematization. The present work pays attention to temperature regime, atmospheric oxygen and carbon dioxide concentrations, parameters and configuration of palaeospace elements, volcanism, impacts, and biodiversity. These periods are characterized by specifics and principal differences from the modern conditions. However, the relevant information is distinguished by uncertainty. The undertaken analysis of the newest data shows that their generation has altered significantly the understanding of the global palaeogeographical peculiarities of the Early Paleozoic, which should be considered in the geological research and education.

Key words: global environment, Cambrian, Ordovician, Silurian, evolution of Earth.

ВВЕДЕНИЕ

Знания о глобальных палеогеографических особенностях крупных интервалов геологического времени (эпохи, периоды, эры) были и остаются востребованными. Прежде всего, они необходимы для корректной интерпретации результатов различных исследований (не только сугубо геологических), касающихся прошлого Земли. Не менее важны они и для практических целей и, в частности, прогнозирования месторождений полезных ископаемых, а также реализации геоконсервационных и геотуристических мероприятий. Наконец, получение этих знаний является неотъемлемой частью современного геологического образования. Высокое качество решения всех перечисленных задач необходимо для обеспечения конкурентоспособности, мирового лидерства и проактивного видения в геологической науке и практике. Это тем более актуально с учетом реализации действительно амбициозных планов по обеспечению прорывного социально-экономического развития России [5].

Не вдаваясь в концептуальные и терминологические дискуссии, отметим, что в отечественной и зарубежной литературе фигурирует понятие «глобальная палеогеография» [2, 11, 46]. Оно кажется отчасти условным и используемым интуитивно для обозначения совокупности различных аспектов палеосреды (климат, состав атмосферы, уровень моря и т.п.), присущих планете в целом на том или ином интервале геологического времени. Изменение этих аспектов на протяжении истории Земли определяет проявление их особенностей (как по отдельности, так и суммарно) для конкретных интервалов. Начало XXI века ознаменовалось серией прорывов в понимании геологического прошлого планеты в целом, при этом интенсивность соответствующих исследований, по всей видимости, даже возросла в течение последних пяти лет. Накоплен огромный объем знаний,

часть которых отличается фундаментальной новизной. Приходится констатировать, что имеющиеся справочники и учебники, несмотря на все их несомненные достоинства, уже устарели, подчас значительно (при текущей интенсивности исследований) устаревание становится заметным уже через пять лет). Однако новые знания рассеяны в громадном количестве источников научной информации и прежде всего многочисленных статьях в международных научных журналах. Последние не всегда доступны для ознакомления, а выбор подходящих статей не так легко осуществить даже с использованием «продвинутых» библиографических баз данных. Существует острая потребность в обобщении этих знаний, в том числе для обеспечения широких научных интерпретаций и должного качества соответствующих дисциплин в вузовских образовательных программах.

Целью настоящей работы является краткая характеристика некоторых основных палеогеографических особенностей первых трех периодов палеозоя (кембрийского, ордовикского и силурийского). При этом сделана попытка использовать максимально широкий спектр новейших данных, а описания сделать простыми и однородными. Безусловно, выбор параметров глобальной палеосреды и соответствующих источников информации является субъективным и в той или иной степени будет неполным. Автор стремился обращаться к наиболее принципиальным и свежим публикациям авторитетных специалистов и, где необходимо и возможно, учитывать альтернативные интерпретации. Работа задумывалась таким образом, чтобы выступить также в качестве указателя ключевой литературы по рассматриваемой проблематике. В ней использовались современные шкалы геологического времени, в частности разработки Межведомственного стратиграфического комитета России [4] и Международной комиссии по стратиграфии [24, 29]. Понятие «ранний

палеозой» использовано для удобства обозначения трех периодов и безотносительно дискуссий о его точном стратиграфическом содержании. Интерпретация компилируемой информации проводилась таким образом, чтобы представить обобщенное описание рассматриваемых периодов как самостоятельных временных единиц.

КЕМБРИЙСКИЙ ПЕРИОД

Кембрийский период знаменует начало не только палеозойской эры, но и всего фанерозойского зона. Длительность этого периода составила 53,4 млн лет [29], хотя в действительности могла быть несколько меньшей [62]. Стратиграфия соответствующей системы отличается сложностью и не-

достаточной разработанностью (рис. 1). До сих пор активно используются региональные ярусы, а некоторые из глобальных не имеют ни стратотипа, ни даже названия [24]. Многие вопросы, касающиеся глобальной палеогеографии кембрия, остаются открытыми, однако в последние годы достигнут значительный прогресс в понимании некоторых особенностей.

Рассматриваемый период характеризовался жарким климатом со средними температурами порядка 20–25°C [28, 51], то есть существенно больше современных значений. Возможно, это был самый жаркий период палеозоя. Согласно еще одной модели, в конце кембрия температуры в низких широтах могли достигать 50°C, что является

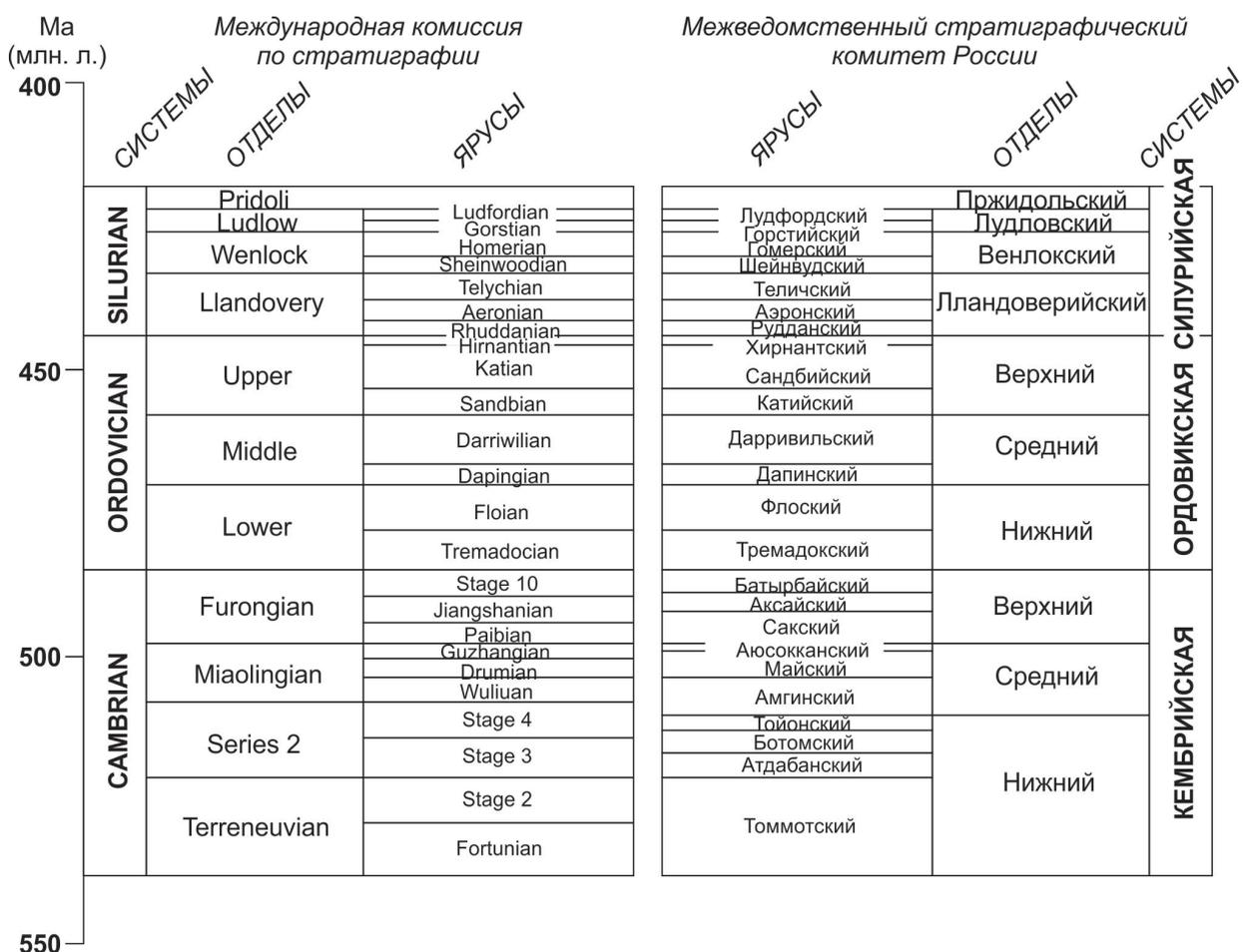


Рис. 1. Стратиграфическая шкала нижнего палеозоя (международный вариант с указанием названий единиц в оригинальной англоязычной версии и абсолютный возраст по [29], отечественный вариант по [4], корреляция кембрийских ярусов по [24])

экстремальным уровнем для всего фанерозоя и намного выше современных значений [25]. При этом надо отметить, что в начале кембрия вполне могли проявляться оледенения [35, 61].

Содержание кислорода в кембрийской атмосфере ниже, чем в настоящее время, и изменялось в интервале от <5% до 15% [34, 44], что согласуется с более поздней оценкой концентрации кислорода в 20–60% от современного уровня [30]. Однако, по другим данным, концентрация могла быть и выше, порядка 10–20% [6, 65]. Оценки содержания углекислого газа в атмосфере для кембрия существенно разнятся – от 2000 до 7000 ppm; современный уровень был намного превышен [40, 65]. Морские аноксические события происходили довольно часто в этом периоде [48, 64].

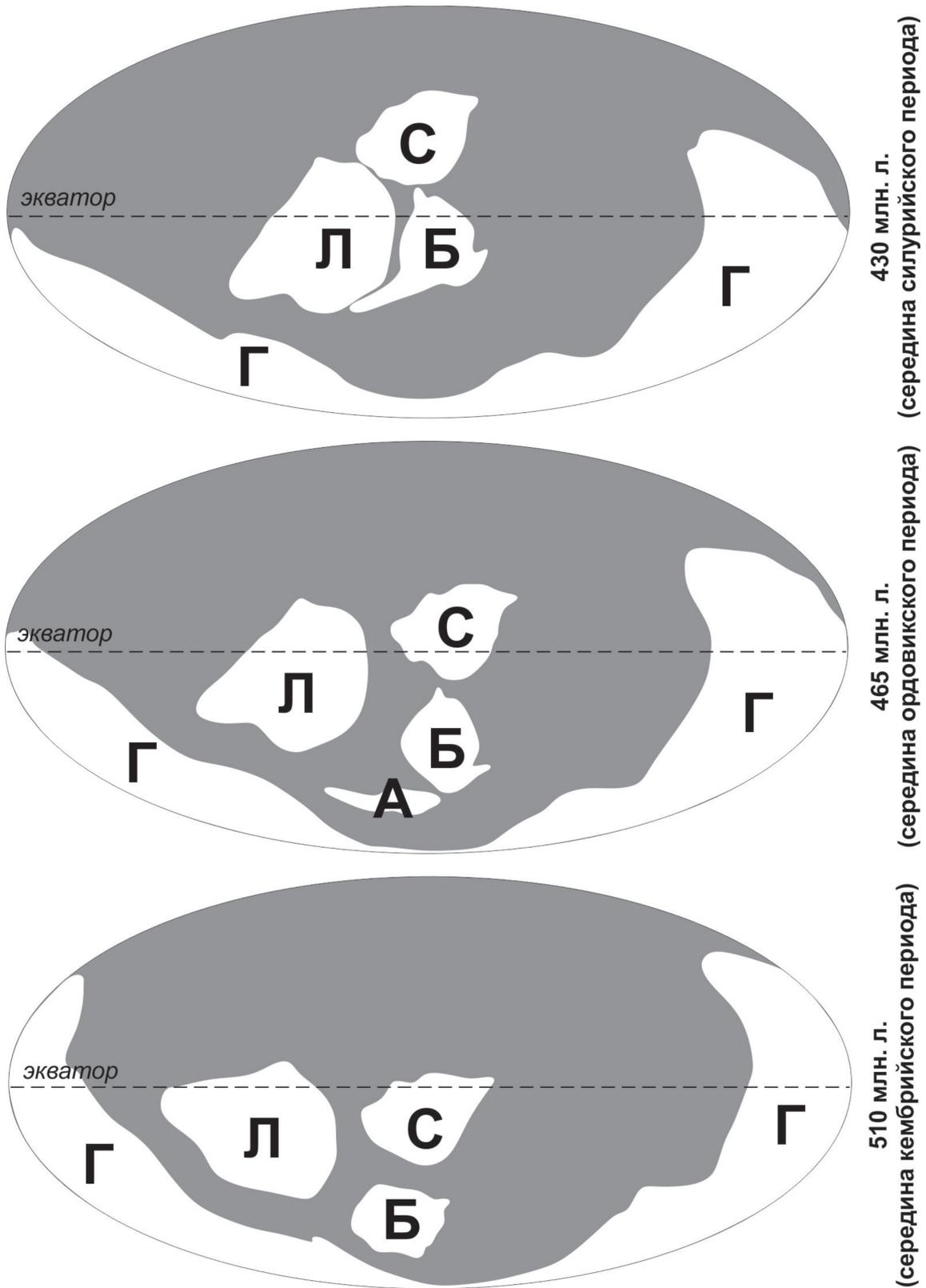
В кембрии площадь суши составляла 80 млн км², то есть почти вдвое меньше современной [40]. Площадь низменная со средними высотами порядка 250–350 м, также вдвое меньше, чем в настоящее время [33]. Суша занимала 15–20% поверхности Земли, а суммарная длина береговой линии составляла около 60 тыс. км [33]. Морское пространство однозначно доминировало. Согласно классической эвстатической кривой, глобальный уровень моря был несколько выше современного, а к концу периода превысил последний более чем на 150 м [26]. Одна из поздних моделей показывает, что этот уровень оставался высоким в течение всего кембрия, возможно превышая на 300 м современный [41], другая модель указывает на превышение последнего в несколько десятков метров [59]. В целом разница между существующими оценками положения уровня моря в этом периоде весьма значительна [59, 63]. Шельфовые области в кембрии были широко развиты (обширнее, чем сегодня), занимая более 15% общей площади планеты [33, 50].

Конфигурация континентов и океанов в кембрии отличалась простотой. Согласно одной из моделей [50], которую можно

признать базовой в силу популярности, простоты и тщательной привязки к широкому спектру геологических данных, существовал суперконтинент Гондвана, а также три менее крупные континентальные массы, а именно Балтика, Лаврентия и Сибирь (рис. 2). Фрагментация глобального палеопространства была сравнительно небольшой, а вышеотмеченные домены располагались большей частью в южном полушарии, в т.ч. в высоких широтах. Другие модели дают аналогичную характеристику, однако указывают на большую степень фрагментации палеопространства и наличие значительного количества самостоятельных, но относительно мелких доменов [43, 49, 54, 57, 60]. Такие отличия вполне объяснимы, т.к. базовая модель является в большей степени палеогеографической и соответствующим образом генерализованной, а прочие – палеотектоническими. В любом случае конфигурация принципиально отличалась от современной.

В кембрии вулканизм проявлялся умеренно широко, в том числе в крупной провинции магматической активизации (трапповый вулканизм) Калкаринджи (Австралия) [18, 31, 45]. Судя по количеству импактных структур [22], для кембрия характерен умеренный уровень воздействия космических тел, хотя такой вывод, несомненно, носит условный и предварительный характер.

В кембрии достигнут принципиально более высокий уровень биоразнообразия (>2800 родов организмов), чем в докембрийское время, однако он был меньше, чем в большинстве периодов фанерозоя. При этом биоразнообразие отдельных веков достигало средних для палеозоя значений (см. <https://paleobiodb.org>). Несмотря на доминирование морских экосистем, имеются свидетельства заселения суши растениями и членистоногими [56]. Часто рассматриваемая в научной литературе кембрийская «вспышка» в настоящее время подвергается сомнению, т.к. предполагается долговре-



Обозначения:
А - Авалония, Б - Балтика, Г - Гондвана, Л - Лаврентия, С - Сибирь

Рис. 2. Основные континентальные массы в раннем палеозое
(контуры проведены по кромке шельфов по [50])

менная биотическая радиация с конца докембрия и до ордовика включительно [52]. Имели место несколько биотических кризисов [3, 13, 17], и в этом отношении кембрий сопоставим с отдельными периодами фанерозоя.

ОРДОВИКСКИЙ ПЕРИОД

Ордовикский период является вторым по счету в палеозойской эре и более коротким, чем предыдущий. Он длился 41,6 млн лет [29] или чуть больше [62]. Стратиграфия соответствующей системы очень хорошо разработана (рис. 1). Существует общепризнанное деление на ярусы, для которых выбраны стратотипы [24]. Благодаря интенсивным исследованиям глобальная палеогеография ордовика известна удовлетворительно, хотя по некоторым вопросам сохраняются разногласия.

Рассматриваемый период характеризовался теплым климатом со средними температурами около 18°C; однако они заметно изменялись в течение ордовика – от 24°C в начале до менее 10°C в конце [51]. Согласно другой модели, этот период лишь чуть менее жаркий, чем и предшествовавший ему кембрий, т.к. температуры в низких широтах были на уровне 30–45°C, что намного больше современных [25]. Конец ордовика ознаменовался крупным, но весьма кратковременным оледенением [20].

Содержание кислорода в атмосфере в этот период было небольшим, в основном <10% [34, 44], хотя другие модели указывают на высокую концентрацию, вплоть до настоящей и даже выше [9, 65]. В целом же создается впечатление более низких содержаний в сравнении с предшествующим и последующим периодами. Содержание углекислого газа в атмосфере было высоким. Значения, полученные с использованием разных моделей, находятся в интервале от 1500–2000 до 5500 ppm [40, 42, 65]. Концентрации как минимум в несколько раз превышали современные [37]. Морские аноксические события нехарактерны для

ордовика, наиболее известное из них относится к концу этого периода [48, 64].

В ордовике площадь суши оставалась сравнительно небольшой (порядка 80 млн км²), увеличившись к концу периода, но не достигнув 100 млн км² [40]. Она была низкой (в т.ч. в сравнении с кембрием и силуром), т.к. средние высоты <300 м. Именно на ордовик пришелся минимум средних высот за весь фанерозой [33]. Как и в кембрии, суша занимала 15–20% поверхности Земли, а вот суммарная длина береговой линии увеличилась до ~80 тыс. км [33]. Значительное доминирование морей и океанов сохранялось. Классическая эвстатическая кривая показывает, что глобальный уровень моря в ордовике был высоким и превышал современный примерно на 200 м [26]. Другие модели отчасти согласны с такой интерпретацией (особенно для второй половины периода), однако обозначают как более высокие, так и более низкие положения этого уровня [41, 59, 63]. Шельфовые области в ордовике весьма обширны, занимая до 20% (и даже больше на непродолжительных интервалах) общей площади планеты, т.е. гораздо больше, чем в настоящее время [33, 50].

Конфигурация континентов и океанов в ордовике характеризовалась большей сложностью. Согласно базовой (см. выше) модели [50], суперконтинент Гондвана продолжил доминировать; существовавшие одновременно с ним четыре крупных тектонических домена разделялись довольно широкими водными массами (рис. 2). Фрагментация глобального палеопространства была умеренной, а отмеченные домены тяготели к южному полушарию, в том числе высоким широтам. Прочие модели подтверждают такие характеристики, хотя и позволяют обозначить высокую фрагментацию палеопространства и самостоятельность большего числа доменов, в том числе и цепочек террейнов [16, 54, 60] (о причинах отличий см. выше). Реконструированная конфигурация принципиально отличалась от современной.

В отношении вулканизма ордовик весьма примечателен, с одной стороны, имеются свидетельства сильно выраженного пика вулканической деятельности (возможно крупнейшего), а с другой – провинции магматической активизации были немногочисленны и невелики, если вообще существовали [18, 31, 45]. Для ордовика характерно умеренное количество ударных структур [22], но именно на этот период пришлось единственное в фанерозое серьезное усиление микрометеоритного потока, связанное с неким космическим событием [55].

Биоразнообразие в ордовике (~3800 родов организмов) было существенно выше, чем в предыдущем и последующем периодах, однако ниже, чем на протяжении большей части фанерозоя; при этом в отдельные века именно этого периода оно достигало пиковых значений для всего палеозоя [https://paleobiodb.org]. По всей видимости, морские экосистемы сохраняли преимущественное значение для биоразнообразия, но развивались и своеобразные наземные экосистемы [10, 58]. Активно обсуждаемая специалистами ордовикская биодиверсификация в современном понимании интерпретируется не как отдельное событие, а как составляющая долговременной биотической радиации, зародившейся в конце докембрия и достигшей кульминации в ордовике [52]. Рассматриваемый период известен крупным (если не крупнейшим) массовым вымиранием, имевшем место в его конце, однако в течение этого периода имел место как минимум еще один биотический кризис [1, 3, 6, 38, 47]. В этом отношении ордовик довольно типичен для фанерозоя.

СИЛУРИЙСКИЙ ПЕРИОД

Силурийский период – третий в составе палеозойской эры, при этом самый короткий по абсолютной длительности. Его продолжительность составила лишь 24,6 млн л. [29] или даже немного меньше [62]. Стратиграфия соответствующей системы разработана очень подробно (рис. 1). Яру-

сы, для которых установлены стратотипы, объединены в четыре отдела [24]. При этом в пржидольском отделе ярусы не выделяются, однако соответствующие возможности обсуждаются [39]. Глобальная палеогеография силура известна удовлетворительно, хотя сравнительная краткость периода способствовала ее рассмотрению в меньшем количестве временных срезов.

Силур характеризовался умеренно теплым климатом со средними температурами порядка 16–18°C, однако в самом начале они существенно меньше [51]. Другая модель показывает, что период оставался весьма жарким: температуры в низких широтах на уровне 30–40°C, и это существенно больше современных [55]. Имеются свидетельства силурийских оледенений, при этом не только связанных с продолжением позднеордовикского события [8, 15, 19].

Содержание кислорода в атмосфере выросло в сравнении с предыдущими периодами. Оно находилось на уровне 10–20% [34, 44] или даже выше с максимумом в >25% [9, 65]. Отметим, что прочие геологические данные дают различные оценки концентрации кислорода в этом периоде, которая могла быть как относительно низкой [27], так и сравнительно высокой [21]. Содержание углекислого газа в атмосфере снизилось, в сравнении с ордовиком, незначительно, т.к. разные модели указывают на интервал 1500–5000 ppm [40, 65]. Крупные морские аноксии нехарактерны для силура [48, 65], однако заметные события такого рода все-таки известны [14, 64]. Отличительной особенностью данного периода является довольно частое циклическое изменение состояния океанической среды, и некоторые эпизоды способствовали обеднению морской воды кислородом [32].

В силуре площадь суши менялась в диапазоне от ~90 млн км² до <80 млн км² [40] и оставалась весьма низменной со средней высотой 250–300 м [33]. Если не брать во внимание непродолжительное расширение суши на переходе от ордовика к силуру,

можно говорить о том, что она оставалась сходной на протяжении этих двух периодов. Принципиальных изменений в доле суши в сравнении с двумя предыдущими периодами не произошло (15–20% поверхности Земли), тогда как суммарная длина береговой линии продолжила расти и превысила 100 тыс. км [33]. Таким образом, Мировой океан доминировал, но конфигурация водного пространства, по всей видимости, усложнялась. Классическая эвстатическая кривая показывает высокое положение глобального уровня моря в силуре, который превышал современный на 150–200 м [26]. Позднее предложенные модели выявляют возможность достижения таких же и даже более высоких отметок [41, 63], хотя еще одна модель указывает на превышение современного уровня только на 50–100 м [59]. Неопределенность интерпретаций значительна. При этом многие модели так или иначе отражают падение глобального уровня моря (не ниже современного положения) на переходе от ордовика к силуру, когда имело место вышеупомянутое оледенение. Именно в силуре размер шельфовых областей был максимальным, хотя пиковые значения до 20% общей площади планеты и даже более, что почти вдвое превышает современное значение, достигались на некоторое время в предшествующем и последующем периодах. В силуре они сохранялись на протяжении почти половины периода, чего больше не случалось во всем фанерозое [33, 50].

Конфигурация континентов и океанов в силуре изменилась в сравнении с предыдущими периодами. Согласно базовой (см. пояснения выше) модели [50], в южном полушарии доминировал суперконтинент Гондвана, который при этом сдвинулся в высокие широты, тогда как в приэкваториальной области сгруппировались Балтика, Лаврентия и Сибирь (рис. 2). Фрагментация глобального пространства стала как будто меньше. Другие модели отчасти позволяют дать схожее описание, указывая на несколь-

ко большую фрагментацию палеопространства и больший суммарный размер континентальных боков и террейнов в низких широтах северного полушария [23, 54, 57, 60]. Описанная конфигурация полностью отличалась от современной.

В силуре вулканическая деятельность сократилась, и при этом провинций магматической активизации по сути не было (развитие очень небольших областей траппового вулканизма могло охватывать самое начало и конец этого периода) [18, 31, 45]. Количество импактных структур в силуре невелико, однако в этом периоде поток микрометеоритов все еще оставался аномально высоким, хотя уже не таким, как в ордовике [55].

Силур является единственным периодом фанерозоя, когда биоразнообразие (~2500 родов организмов) сократилось до показателей, ниже кембрийского. Это фиксируется и на уровне отдельных веков, хотя отличия от типичных для всего палеозоя уровней не столь велики [<https://paleobiodb.org>]. Лучше известны морские экосистемы рассматриваемого периода, но развитие наземной растительности и становление экосистем суши (даже в пустынях) приобрели существенное значение в силуре [12, 53]. В самом начале этого периода завершилось крупное массовое вымирание, начавшееся в конце ордовика, за чем последовал ряд биотических кризисов [3, 7, 36]. С учетом небольшой продолжительности периода такая концентрация катастрофических событий может считаться значительной, в сравнении со многими периодами фанерозоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщение новейших данных позволило охарактеризовать некоторые глобальные палеогеографические особенности периодов раннего палеозоя. Это дает основание для трех принципиальных выводов. Во-первых, некоторые глобальные палеогеографические особенности менялись постепенно в течение раннего палеозоя, но при этом

кембрий, ордовик и силур явно отличны друг от друга. Во-вторых, глобальные палеогеографические условия раннего палеозоя значительно (даже принципиально) отличались от современных, что ставит вопрос о возможной ограниченности применения актуалистических подходов при их изучении. В-третьих, неопределенность характеристики многих глобальных палеогеографических особенностей значительна и сохраняется (возможно даже усиливается) по мере накопления новой информации, в том числе получаемой с помощью инновационных методов и подходов (например, компьютерное моделирование динамики литосферных плит и построение сложных моделей состава атмосферного воздуха).

Большое количество новейших данных и вышеотмеченная неопределенность интерпретаций делают их периодические и при

этом систематические обобщения исключительно важными в современных геологических исследованиях. Представленные в настоящей работе описания периодов кажутся подчас сильно отличными (вплоть до противоположных) от традиционных представлений, не столько дополняя и корректируя, сколько трансформируя последние. В этой связи актуальность учета новейших данных, касающихся глобальных палеогеографических условий, в современной геологии (как в сугубо научном, так и в образовательном процессе) исключительно важна. При этом стоит понимать, что данные не являются обязательно точными и верными лишь по причине своей новизны или продвинутости методик их генерации. С большой долей вероятности они будут скорректированы или даже полностью пересмотрены в ходе последующих исследований.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Бараш М.С. Массовое вымирание морской биоты на рубеже ордовика и сисура в связи с изменениями условий среды // *Океанология*. – 2014. – № 6. – С. 825–832.
2. Гриненко В.С., Баранов В.В. Глобальная палеогеография и палеобиогеография позднего триаса (карний-рэт) по брахиоподам // *Отечественная геология*. – 2019. – № 2. – С. 66–72.
3. Рубан Д.А. Неравнозначность массовых вымираний в истории жизни на Земле: новый подход к ранжированию // *Вестник Псковского государственного университета. Серия "Естественные и физико-математические науки"*. – 2022. – № 3. – С. 49–59.
4. Стратиграфический кодекс России. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2019. – 96 с.
5. Тетенькин Д.Д., Гермаханов А.А., Каспаров О.С., Герт А.А., Романюк В.Б. Федеральный проект «Геология – возрождение легенды» - управление реализацией и оценка эффективности // *Недропользование XXI век*. – 2022. – № 1. – С. 4–11.
6. Algeo T.J., Shen J. Theory and classification of mass extinction causation // *National Science Review*. – 2024. – V. 11. – P. nwad237.
7. Bowman C.N., Lindskog A., Kozik N.P., Richbourg C.G., Owens J.D., Young S.A. Integrated sedimentary, biotic, and paleoredox dynamics from multiple localities in southern Laurentia during the late Silurian (Ludfordian) extinction event // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2020. – V. 553. – P. 109799.
8. Barrera I.A.R., Nogueira A.C.R., Bandeira J. The Silurian glaciation in the eastern Parnaíba Basin, Brazil: paleoenvironment, sequence stratigraphy and insights for the evolution and paleogeography of West Gondwana // *Sedimentary Geology*. – 2020. – V. 406. – P. 105714.
9. Brand U., Davis A.M., Shaver K.K., Blamey N.J.F., Heizler M., Lecuyer C. Atmospheric oxygen of the Paleozoic // *Earth-Science Reviews*. – 2021. – V. 216. – P. 103560.
10. Buatois L.A., Davies N.S., Gibling M.R., Krapovickas V., Labandeira C.C., Macnaughton R.B., Mangano M.G., Minter N.J., Shillito A.P. The Invasion of the Land in Deep Time: Integrating Paleozoic Records of Paleobiology, Ichology, Sedimentology, and Geomorphology // *Integrative and Comparative Biology*. – 2022. – V. 62. – P. 297–331.
11. Cao W., Zahirovic S., Flament N., Williams S., Golonka J., Müller R.D. Improving global paleogeography since the late Paleozoic using paleobiology // *Biogeosciences*. – 2017. – V. 14. – P. 5425–5439.
12. Capel E., Cleal C.J., Servais T., Cascales-Minana B. New insights into Silurian–Devonian palaeophytogeography // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2023. – V. 613. – P. 111393.
13. Chang C., Hu W., Huang K.-J., Wang Z., Zhang X. Mass Extinction Coincided With Expanded Continental Margin Euxinia During the Cambrian Age 4 // *Geophysical Research Letters*. – 2023. – V. 50. – P. e2023GL105560.
14. Chen L., Xiong M., Tan X., Chen X., Zheng J., Yang Y., Jing C., Wang G. Coupling mechanism between sea level changes and pore heterogeneity of marine shale reservoirs driven by astronomical orbital cycles: Lower Silurian Longmaxi shale in the Upper Yangtze area, South China // *Marine and Petroleum Geology*. – 2024. – V. 160. – P. 106590.
15. Clayer F., Desrochers A. The stratigraphic imprint of a mid-Telychian (Llandovery, early Silurian) glaciation on far-field shallow-water carbonates, Anticosti Island, Eastern Canada // *Estonian Journal of Earth Sciences*. – 2014. – V. 63. – P. 207–213.
16. Cocks L.R.M., Torsvik T.H. Ordovician palaeogeography and climate change // *Gondwana Research*. – 2021. – V. 100. – P. 53–72.
17. Darroch S.A.F., Smith E.F., Laflamme M., Erwin D.H. Ediacaran Extinction and Cambrian Explosion // *Trends in Ecology and Evolution*. – 2018. – V. 33. – P. 653–663.
18. Ernst R.E., Bond D.P.G., Zhang S.-H., Buchan K.L., Grasby S.E., Youbi N., El Bilali H., Bekker A., Doucet L.S. Large Igneous Province Record Through Time and Implications for Secular Environmental Changes and Geological Time-Scale Boundaries // *Geophysical Monograph Series*. – 2021. – V. 255. – P. 4–26.
19. Frýda J., Lehnert O., Joachimski M.M., Mannik P., Kubajko M., Mergl M., Farkaš J., Frýdová B. The Mid-Ludfordian (late Silurian) Glaciation: A link with global changes in ocean chemistry and ecosystem overturns // *Earth-Science Reviews*. – 2021. – V. 220. – P. 103652.
20. Ghienne J.-F., Desrochers A., Vandenbroucke T.R.A., Achab A., Asselin E., Dabard M.-P., Farley C., Loi A., Paris F., Wickson S., Veizer J. A Cenozoic-style scenario for the end-Ordovician glaciations // *Nature Communications*. – 2014. – V. 5. – P. 4485.
21. Glasspool I.J., Gastaldo R.A. Silurian wildfire proxies and atmospheric oxygen // *Geology*. – 2022. – V. 50. – P. 1048–1052.
22. Glikson A.Y., Pirajno F. Asteroids Impacts, Crustal Evolution and Related Mineral Systems with Special Reference to Australia. – Cham: Springer, 2018. – 215 p.
23. Golonka J., Porebski S.J., Waskowska A. Silurian paleogeography in the framework of global plate tectonics // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2023. – V. 622. – P. 111597.

24. Gradstein F.M., Ogg J.G., Schmitz M., Ogg G. (Eds.). *Geologic Time Scale 2020*. – Elsevier: Amsterdam, 2020. – 1390 p.
25. Grossman E.L., Joachimski M.M. Ocean temperatures through the Phanerozoic reassessed // *Scientific Reports*. – 2022. – V. 12. – P. 8938.
26. Haq B.U., Schutter S.R. A Chronology of Paleozoic Sea-Level Changes // *Science*. – 2008. – V. 322. – P. 64–68.
27. Haxen E.R., Schovsbo N.H., Nielsen A.T., Richoz S., Loydell D.K., Posth N.R., Canfield D.E., Hammarlund E.U. “Hypoxic” Silurian oceans suggest early animals thrived in a low-O₂ world // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2023. – V. 622. – P. 118416.
28. Hearing T.W., Harvey T.H.P., Williams M., Leng M.J., Lamb A.L., Wilby P.R., Gabbott S.E., Pohl A., Donnadieu Y. An early Cambrian greenhouse climate // *Science Advances*. – 2018. – V. 4. – P. eaar5690.
29. International Commission on Stratigraphy. *International Stratigraphic Chart, v2023/09*. – ICS, 2023.
30. Jiang L., Zhao M., Shen A., Huang L., Chen D., Cai C. Pulses of atmosphere oxygenation during the Cambrian radiation of animals // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2022. – V. 590. – P. 117565.
31. Jiang Q., Jourdan F., Olierook H.K.H., Merle R.E. An appraisal of the ages of Phanerozoic large igneous provinces // *Earth-Science Reviews*. – 2023. – V. 237. – P. 104314.
32. Johnson M.E. Relationship of Silurian sea-level fluctuations to oceanic episodes and events // *GFF*. – 2006. – V. 128. – P. 115–121.
33. Kocsis A.T., Scotese C.R. Mapping paleocoastlines and continental flooding during the Phanerozoic // *Earth-Science Reviews*. – 2021. – V. 213. – P. 103463.
34. Krause A.J., Mills B.J.W., Zhang S., Planavsky N.J., Lenton T.M., Poulton S.W. Stepwise oxygenation of the Paleozoic atmosphere // *Nature Communications*. – 2018. – V. 9. – P. 4081.
35. Landing E., MacGabhann B.A. First evidence for Cambrian glaciation provided by sections in Avalonian New Brunswick and Ireland: Additional data for Avalon-Gondwana separation by the earliest Palaeozoic // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2010. – V. 285. – P. 174–185.
36. Lehnert O., Männik P., Joachimski M.M., Calner M., Fryda J. Palaeoclimate perturbations before the Sheinwoodian glaciation: A trigger for extinctions during the 'Ireviken Event' // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2010. – V. 296. – P. 320–331.
37. Liu L., Liang L., Wu Y., Zhou X., Jia L., Riding R. Ordovician cyanobacterial calcification: A marine fossil proxy for atmospheric CO₂ // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2020. – V. 530. – P. 115950.
38. Lu X., Edwards C.T., Kendall B. No evidence for expansion of global ocean euxinia during the base Stairsian mass extinction event (Tremadocian, Early Ordovician) // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2023. – V. 341. – P. 116–131.
39. Manda Š., Slavík L., Štorch P., Tasáryová Z., Čáp P. Division of Přídolí Series in Central Bohemia: graptolite and conodont biostratigraphy, faunal changes, and geochemical record // *Newsletters on Stratigraphy*. – 2023. – V. 56. – P. 89–123.
40. Marcilly C.M., Torsvik T.H., Domeier M., Royer D.L. New paleogeographic and degassing parameters for long-term carbon cycle models // *Gondwana Research*. – 2021. – V. 97. – P. 176–203.
41. Marcilly C.M., Torsvik T.H., Conrad C.P. Global Phanerozoic sea levels from paleogeographic flooding maps // *Gondwana research*. – 2022. – V. 110. – P. 128–142.
42. Marcilly C.M., Maffre P., Le Hir G., Pohl A., Fluteau F., Godderis Y., Donnadieu Y., Heimdal T.H., Torsvik T.H. Understanding the early Paleozoic carbon cycle balance and climate change from modeling // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2022. – V. 594. – P. 117717.
43. Merdith A.S., Williams S.E., Collins A.S., Tetley M.G., Mulder J.A., Blades M.L., Young A., Armistead S.E., Cannon J., Zahirovic S., Müller R.D. Extending full-plate tectonic models into deep time: Linking the Neoproterozoic and the Phanerozoic // *Earth-Science Reviews*. – 2021. – V. 214. – P. 103477.
44. Mills B.J.W., Krause A.J., Jarvis I., Cramer B.D. Evolution of Atmospheric O₂ Through the Phanerozoic, Revisited // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. – 2023. – V. 51. – P. 253–276.
45. Nechaev V.P., Sutherland F.L., Nechaeva E.V. Phanerozoic Evolution of Continental Large Igneous Provinces: Implications for Galactic Seasonality // *Minerals*. – 2022. – V. 12. – P. 1150.
46. Ogg J.G., Scotese C.R., Hou M., Chen A., Ogg, G.M., Zhong H. Global Paleogeography through the Proterozoic and Phanerozoic: Goals and Challenges // *Acta Geologica Sinica*. – 2019. – V. 93. – P. 59–60.
47. Rasmussen C.M.Ø., Vandenbroucke T.R.A., Nogues-Bravo D., Finnegan S. Was the Late Ordovician mass extinction truly exceptional? // *Trends in Ecology and Evolution*. – 2023. – V. 38. – P. 812–821.
48. Reershemius T., Planavsky N.J. What controls the duration and intensity of ocean anoxic events in the Paleozoic and the Mesozoic? // *Earth-Science Reviews*. – 2021. – V. 221. – P. 103787.
49. Robert B., Domeier M., Jakob J. On the origins of the Iapetus Ocean // *Earth-Science Reviews*. – 2021. – V. 221. – P. 103791.

50. Scotese C.R. An Atlas of Phanerozoic Paleogeographical Maps: The Seas Come In and the Seas Go Out // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. – 2021. – V. 49. – P. 679–728.
51. Scotese C.R., Song H., Mills B.J.W., van der Meer D.G. Phanerozoic paleotemperatures: The earth's changing climate during the last 540 million years // *Earth-Science Reviews*. – 2021. – V. 215. – P. 103503.
52. Servais T., Cascales-Minana B., Harper D.A.T., Lefebvre B., Munnecke A., Wang W., Zhang Y. No (Cambrian) explosion and no (Ordovician) event: A single long-term radiation in the early Paleozoic // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2023. – V. 623. – P. 111592.
53. Shillito A.P., Davies N.S. The Silurian inception of inland desert ecosystems: trace fossil evidence from the Mereenie Sandstone, Northern Territory, Australia // *Journal of the Geological Society*. – 2021. – V. 178. – P. jgs2020-243.
54. Stampfli G.M., Hochard C., Verard C., Wilhem C., von Raumer J. The formation of Panca // *Tectonophysics*. – 2013. – V. 593. – P. 1–19.
55. Terfelt F., Schmitz B. Asteroid break-ups and meteorite delivery to Earth the past 500 million years // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2021. – V. 118. – P. e2020977118.
56. Tihelka E., Howard R.J., Cai C., Lozano-Fernandez J. Was There a Cambrian Explosion on Land? The Case of Arthropod Terrestrialization // *Biology*. – 2022. – V. 11. – P. 1516.
57. Torsvik T.H. Earth history: A journey in time and space from base to top // *Tectonophysics*. – 2019. – V. 760. – P. 297–313.
58. Vajda V., Cavalcante L., Palmgren K., Krüger A., Ivarsson M. Prototaxites reinterpreted as mega-rhizomorphs, facilitating nutrient transport in early terrestrial ecosystems // *Canadian Journal of Microbiology*. – 2023. – V. 69. – P. 17–31.
59. van der Meer D.G., Scotese C.R., Mills B.J.W., Sluijs A., van der Berg van Sparoea A.-P., van de Weg R.M.B. Long-term Phanerozoic global mean sea level: Insights from strontium isotope variations and estimates of continental glaciation // *Gondwana Research*. – 2022. – V. 111. – P. 103–121.
60. Verard C. 888-444 Ma Global Plate Tectonic Reconstruction With Emphasis on the Formation of Gondwana // *Frontiers in Earth Science*. – 2021. – V. 9. – P. 666153.
61. Wang Y., Kuang H., Liu Y., Chen X., Zhao F., Le Heron D.P., Vandyk T.M., Peng N., Yang Z., Bai H. Composite sand-ice wedge pseudomorphs suggestive of a frosty Ediacaran–Cambrian transition // *Precambrian Research*. – 2022. – V. 382. – P. 106873.
62. Wu H., Fang Q., Hinnov L.A., Zhang S., Yang T., Shi M., Li H. Astronomical time scale for the Paleozoic Era // *Earth-Science Reviews*. – 2023. – V. 244. – P. 104510.
63. Young A., Flament N., Williams S.E., Merdith A., Cao X., Müller R.D. Long-term Phanerozoic sea level change from solid Earth processes // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2022. – V. 584. – P. 117451.
64. Zhang F., Frýda J., Fakhraee M., Lin Y.-B., Wei G.-Y., Cao M., Li N., Zhou J., Frydova B., Wei H., Shen S.-Z. Marine anoxia as a trigger for the largest Phanerozoic positive carbon isotope excursion: Evidence from carbonate barium isotope record // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2022. – V. 584. – P. 117421.
65. Zhang J., Edwards C.T., Diamond C.W., Lyons T.W., Zhang Y. Marine oxygenation, deoxygenation, and life during the Early Paleozoic: An overview // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2021. – V. 584. – P. 110715.