

УДК 551.7

## ПЕРЕХОДНЫЙ ИНТЕРВАЛ ДОКЕМБРИЯ—КЕМБРИЯ НА ИГАРСКОМ ПОДНЯТИИ (северо-запад Сибирской платформы)

В.В. Марусин<sup>1,2</sup>, Б.Б. Кочнев<sup>1,2</sup>, Г.А. Карлова<sup>1,2</sup>, О.П. Изох<sup>1,2,3</sup>, Ж.А. Сарсембаев<sup>1,2</sup>, Н.А. Иванова<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

<sup>3</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

<sup>4</sup> АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья»,  
630091, Новосибирск, Красный просп., 67, Россия

Несмотря на глобальность и масштаб биотических перестроек на рубеже докембрия и кембрия, установление этого фундаментального рубежа в разнофациальных разрезах мира весьма затруднительно, даже с использованием всего разнообразия изотопно-геохимических и биостратиграфических методов. Так, обладающая, пожалуй, самой представительной хемостратиграфической летописью для этого интервала на Сибирской платформе верхневендская часть разреза Игарского поднятия (сухарихинская свита) до настоящего времени была крайне скудно охарактеризована палеонтологически, в отличие от многих ее стратиграфических аналогов. Нами детально изучены сухарихинская и вышележащая красно-порожская свиты в разрезах по рекам Сухариха и Кулумбэ, а также в скв. Хантайско-Сухотунгусская-1. Полученные хемо- и биостратиграфические данные позволяют не только провести детальную корреляцию этих разрезов, но и уточнить в них положение основания кембрия как в Международной стратиграфической шкале, так и в Общей стратиграфической шкале России. Показана значительная диахронность литологических границ и уровней первого появления томмотских комплексов мелких скелетных остатков в пределах палеобассейна. Полученные результаты позволяют детализировать положение основания томмотского яруса кембрия (в его широком понимании) в других опорных разрезах переходного интервала докембрия—кембрия Сибирской платформы.

*Стратиграфия, хемостратиграфия, мелкие скелетные остатки, верхний венд, нижний кембрий, Сибирская платформа*

## PRECAMBRIAN–CAMBRIAN TRANSITION AT THE IGARKA UPLIFT (Northwestern Siberian Platform)

V.V. Marusin, B.B. Kochnev, G.A. Karlova, O.P. Izokh, Zh.A. Sarsembaev, N.A. Ivanova

The Precambrian–Cambrian transition is one of the most fundamental evolutionary turnovers in the Earth's history. However, in many cases precise identification and correlation of this crucial boundary in lithologically contrasting sections is complicated, even if the whole spectrum of biostratigraphic and chemostratigraphic methods is applied. The Precambrian–Cambrian transitional strata of the Igarka Uplift (Sukharikha Formation) perfectly illustrate this problem. This unit has arguably one of the most detailed carbonate carbon isotope curves for this time interval (at least within the Siberian Platform). However, an extremely poor paleontological record previously reported from the Sukharikha Formation makes identification of major stratigraphic boundaries highly debatable. We present a detailed study of the Sukharikha and overlying Krasnyi Porog formations in three sections (Sukharikha River, Kulyumbe River, and Khantaisko-Sukhotungusskaya-1 well). Our chemostratigraphic and biostratigraphic data provide a correlation basis for these sections and identify the Cambrian boundary in terms of both the International Chronostratigraphic Chart and General Stratigraphic Scale of Russia. We show that lithologic boundaries and levels of the local first appearance of Tommotian small skeletal fossils are diachronous within the Igarka paleobasin. The latter is putatively caused by paleoecology of the early Cambrian biota and by taphonomic factors. Our data specify the location of the Tommotian Stage (sensu lato)/Cambrian Stage 2 boundary in other key Precambrian–Cambrian transitional sections of the Siberian Platform.

*Stratigraphy, chemostratigraphy, small skeletal fossils, Ediacaran, Cambrian, Siberian Platform*

## ВВЕДЕНИЕ

Начало кембрийского периода связано с беспрецедентным по своему масштабу обогащением ископаемой летописи остатками представителей большинства существующих ныне типов морских организмов [Conway Morris, 2000; Erwin et al., 2011]. Однако, несмотря на имеющиеся в распоряжении ис-

© Марусин В.В., Кочнев Б.Б., Карлова Г.А., Изох О.П., Сарсембаев Ж.А., Иванова Н.А., 2023

✉ e-mail: MarusinVV@ipgg.sbras.ru

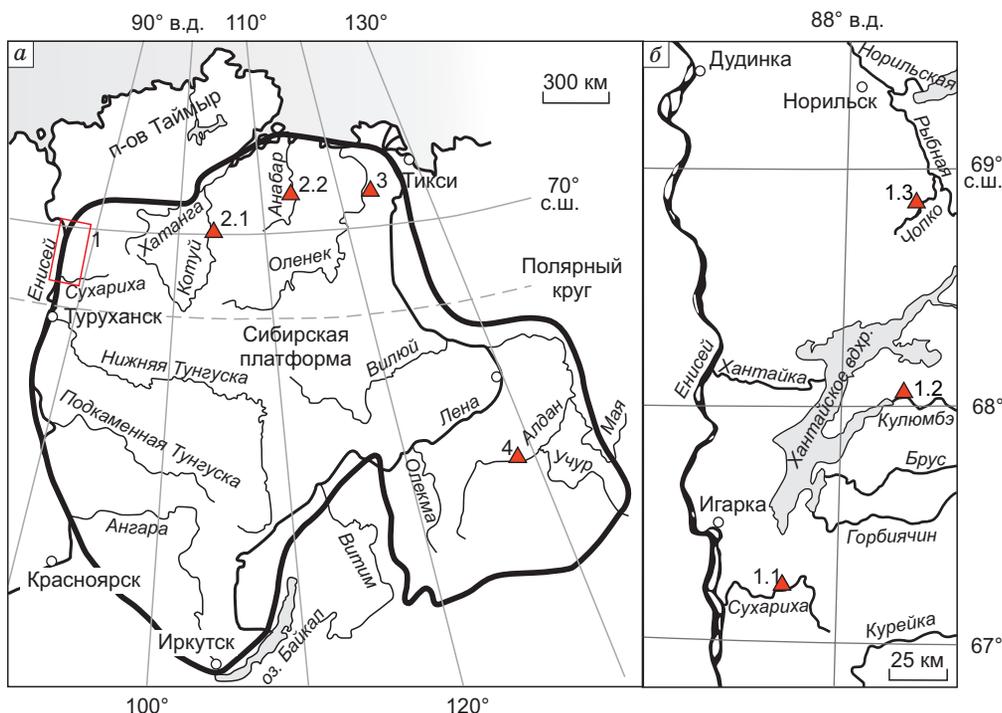
следователей биостратиграфические (мелкие скелетные остатки и ископаемые следы жизнедеятельности) и хемотратиграфические (вариации изотопного состава углерода) инструменты [Peng et al., 2020], их фациальная зависимость часто делает установление этого, казалось бы, наиболее очевидного стратиграфического рубежа, весьма затруднительным [Brasier et al., 1994a; Розанов и др., 1997].

Как известно, в отечественной и зарубежной литературе существуют два принципиально разных подхода к определению этого важнейшего рубежа геологической летописи. В Международной стратиграфической шкале (МСШ) основание кембрия соответствует основанию фортунского яруса (Fortunian Stage) терренувия (Terreneuvian Series) и определяется по первому появлению ископаемых следов жизнедеятельности *Treptichnus pedum* в Глобальном стратотипе границы (GSSP) в нижней части свиты Chapel Island на о. Ньюфаундленд [Brasier et al., 1994a]. По высокоточным U-Pb датировкам из разрезов Намибии [Linnemann et al., 2019], возраст основания кембрия оценивается в  $538.8 \pm 0.2$  млн лет [Cohen et al., 2013; Peng et al., 2020]. В качестве дополнительных критериев для определения этого стратиграфического уровня в разрезах, где ископаемые следы жизнедеятельности отсутствуют (например, большая часть разрезов Сибирской платформы и Китая с преимущественно карбонатным типом седиментации), в настоящий момент рассматриваются крупный отрицательный экскурс  $\delta^{13}\text{C}$  BACE (Base of Cambrian isotope Excursion) и появление мелких скелетных остатков биостратиграфических зон *Anabarites trisulcatus*—*Protohertzina anabarica* [Peng et al., 2020].

В Общей стратиграфической шкале России (ОСШ) основание кембрия соответствует нижней границе томмотского яруса и определяется по появлению разнообразных мелких скелетных остатков и археоциат биостратиграфической зоны *Nochoroicyathus sunnaginicus* [Розанов и др., 2008]. На основании изучения таксономического разнообразия и стратиграфического распределения мелких скелетных остатков зоны *Nochoroicyathus sunnaginicus* ранее было высказано предположение, что индекс-таксоном этой зоны, а следовательно, и томмотского яруса, могут считаться моллюски *Aldanella attleborensis* [Parkhaev et al., 2011]. Именно этот таксон, наряду с моллюсками *Watsonella crosbyi*, рассматривается в настоящее время в качестве потенциального индекс-таксона и для безымянного второго яруса кембрия МСШ [Peng et al., 2020]. В настоящее время основание томмотского яруса оценивается как 535 млн лет [Стратиграфический..., 2019], однако эта возрастающая оценка является предметом дискуссий [Grazhdankin et al., 2020]. Детальный анализ изотопно-геохимических, геохронологических и палеонтологических данных в разрезах Оленекского поднятия показал, что томмотский ярус в широком его понимании (включает в себя и доархеоциатовые слои с томмотскими мелкими раковинными остатками) [Rozanov, Sokolov, 1982] полностью соответствует второму ярусу кембрия МСШ с возрастными рамками 529—521 млн лет [Grazhdankin et al., 2020].

Подстилающие томмотский ярус отложения традиционно выделяются в объеме немакит-далдынского (манькайского) горизонта/региояруса, относящегося к верхам верхнего венда, основание которого определяется по первому появлению мелких скелетных остатков [Хоментовский, Карлова, 2002]. Корреляция данной стратиграфической единицы с выделяемыми подразделениями в МСШ также является предметом дискуссий. Одной из характеристик фортунского яруса терренувия кембрия в МСШ является появление и дальнейшее распространение мелких скелетных остатков [Peng et al., 2020], и некоторыми исследователями подошва немакит-далдынского яруса коррелируется с основанием фортунского (~539 млн лет) [Landing et al., 2013]. Однако известны случаи нахождения мелких скелетных остатков в отложениях заведомо более древних чем 544 млн лет: остатки *Cambrotubulus decurvatus* в туркутской свите на Оленекском поднятии [Карлова, 1987]. Последнее подразумевает более древний возраст основания немакит-далдынского яруса относительно основания фортунского.

Пограничный интервал докембрия—кембрия Игарского поднятия (северо-запад Сибирской платформы) (рис. 1), представленный сухарихинской свитой карбонатного состава, в свете сказанного выше имеет особое значение. Сухарихинская свита, равно как и подстилающие вендские отложения (чернореченская и излучинская свиты) и перекрывающие кембрийские (краснопорожская и вышележащие свиты), формировалась в геодинамических условиях пассивной континентальной окраины, которые существовали в данном регионе с начала венда. Вендские и перекрывающие отложения на современной территории Игарского поднятия формировались в результате трансгрессии на месте среднеопротерозойского рифтогенного прогиба [Kochnev et al., 2022]. К началу кембрия этот прогиб был полностью нивелирован, объединившись с мелководным эпиконтинентальным морем. В стратотипе сухарихинской свиты, представляющей собой известняково-доломитовую осадочную последовательность мощностью 565 м (рис. 2, а), формировавшуюся в обстановках среднего и главным образом внутреннего карбонатного рампа [Rowland et al., 1998], разнообразные томмотские мелкие скелетные остатки появляются вместе с археоциатами в 1.5 м ниже контакта свиты с перекрывающими красноцветными известняками и мергелями краснопорожской свиты в единой осадочной последовательности, без признаков перерыва (см. рис. 2) [Лучинина и др., 1997]. Сходство в строении разреза и характере появления томмотских форм в разрезе Игарского поднятия и стратотипа томмотского яруса (р. Алдан) являлись обоснованием



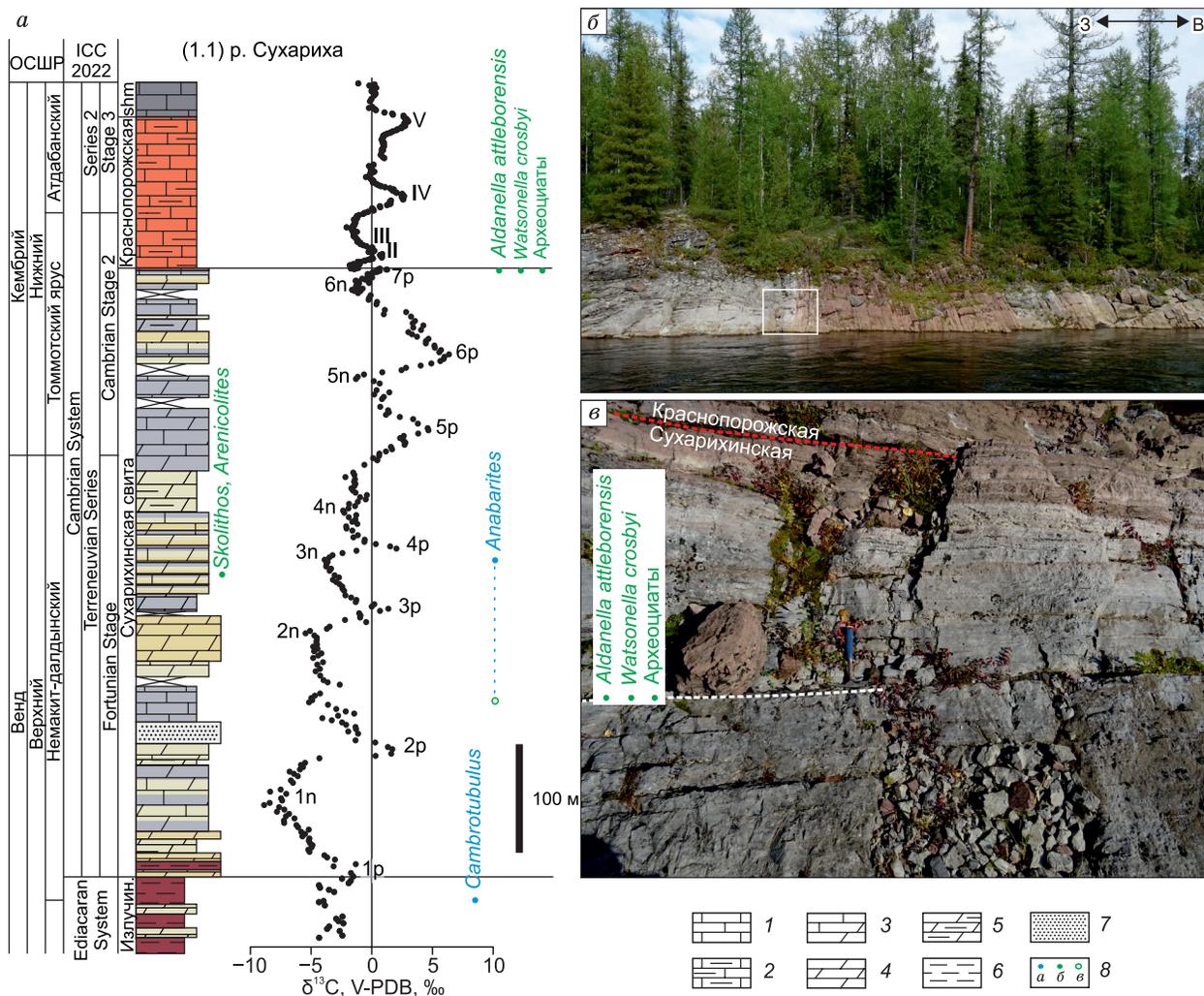
**Рис. 1.** Географическое положение изученных разрезов (1) и опорных разрезов докембрия—кембрия (2—4) на Сибирской платформе (а). Территория Игаро-Норильского района (б).

Разрезы: 1.1 — р. Сухариха (стратотип сухарихинской свиты); 1.2 — р. Кулюмбэ; 1.3 — скв. Хантайско-Сухотунгусская-1; 2.1 — Западное Прианабарье (район р. Котуйкан); 2.2 — Восточное Прианабарье (район р. Большая Куонамка); 3 — Оленекское подняtie (район р. Керсюке); 4 — р. Алдан (разрез «Дворцы»).

значимости этой стратиграфической границы и относительной синхронности распространения кембрийской скелетной фауны в пределах переходной фациальной зоны Сибирской платформы. При этом подстилающая часть сухарихинской свиты, в отличие, например, от усть-юдомской свиты в разрезах по р. Алдан, не содержит последовательной смены комплексов мелких скелетных остатков дотоммотских биостратиграфических зон *Anabarites trisulcatus* и *Purella antiqua* (см. рис. 2, а). До настоящего времени из основного объема сухарихинской свиты были известны лишь единичные треугольные сечения в шлифах (240 м выше основания свиты), отнесенные предыдущими исследователями к анабаритидам [Лучинина и др., 1997].

В 2007 г. для стратотипа сухарихинской свиты была получена детальная кривая вариаций изотопного состава углерода в карбонатах (см. рис. 2, а) [Kouchinsky et al., 2007]. Она демонстрирует характерный для фортунского яруса МСШ тренд постепенного перехода от резко отрицательных значений (экскурс 1n вблизи основания свиты) к положительным (пики 5p и 6p) в верхней. Благодаря детальности изотопной летописи, эта кривая стала основой для региональной [Kouchinsky et al., 2007; Marusin et al., 2019] и глобальной хемотратиграфической корреляции [Maloof et al., 2010a]. Предполагается, что отрицательный экскурс 1n отвечает экскурсу BACE в основании фортунского яруса, а 5p и 6p — экскурсам ZHUCE (ZHUjiaqing Carbon isotope Excursion) [Maloof et al., 2010a; Peng et al., 2020]. Нижний из экскурсов ZHUCE маркирует основание второго яруса кембрия МСШ (529 млн лет), а верхний, основываясь на геохронологических данных из Марокко, имеет возраст около 525 млн лет [Maloof et al., 2005].

Ранее в работах [Даченко и др., 1968; Воронова, Розанов, 1973], а позже Д.П. Сипиным [2001] в своей диссертации было указано, что, в отличие от стратотипа сухарихинской свиты, в разрезе по р. Кулюмбэ (110 км к северу-востоку от стратотипа; см. рис. 1, б) разнообразный томмотский комплекс мелких скелетных остатков, включающий и моллюсков *Aldanella attleborensis*, появляется значительно ниже кровли свиты. Судя по приведенным в работах описаниям разреза, древнейшие находки этих форм установлены с одного и того же стратиграфического уровня, однако оценка его относительно основания краснопорожской свиты варьирует: 40—45 м, по [Даченко и др., 1968; Воронова, Розанов, 1973], 53 м, по [Сипин, 2001]. На этом основании был сделан вывод об омоложении основания краснопорожской свиты при смещении на север. Однако учитывая, что в разрезе по р. Кулюмбэ смена серо-



**Рис. 2. Стратотип сухарихинской свиты (р. Сухариха):**

*а* — строение разреза, хемо- и биостратиграфические данные; *б* — постепенный переход от сухарихинской свиты к краснопорозжской (белым прямоугольником показан фрагмент, приведенный на *в*) детально; *в* — переходный интервал между сухарихинской и краснопорозжской свитами с показанной границей свит (красный пунктир) и уровнем первого появления томмотских форм в 1.5 м ниже границы (белый пунктир). Цвет в литологической колонке (*а*) отражает цвет пород. Изотопно-геохимические данные и нумерация изотопных экскурсов приведены по [Kouchinsky et al., 2007].

1 — известняки, 2 — глинистые известняки, 3 — доломитистые известняки и известковистые доломиты, 4 — доломиты, 5 — глинистые доломиты, 6 — алевролиты и аргиллиты, 7 — песчаники, 8 — уровни первого появления остатков, установленные впервые в рамках данного исследования (*а*) или известные по литературным данным в растворе и макроскопически (*б*) или в шлифах (*в*). shm — шумнинская свита.

цветных пород, типичных для сухарихинской свиты, на красноцветные, характерные для краснопорозжской, происходит на протяжении не 1.5 м, как на р. Сухариха, а около 53 м [Сипин, 2001], прямое сопоставление этих двух разрезов в отсутствие независимых стратиграфических реперов оставалось дискуссионным.

Нами в ходе экспедиционных работ на Игарском поднятии были детально изучены стратотип сухарихинской свиты (р. Сухариха) и разрез по р. Кулюмбэ, также изучены низы разреза скв. Хантайско-Сухотунгусская-1 (ХС-1), располагающейся в 60 км юго-восточнее Норильска (см. рис. 1, б). Эта скважина вскрыла краснопорозжскую свиту и 65 м подстилающих ее карбонатных пород, выделяемых в Норильском районе в полбанскую свиту, стратиграфический аналог сухарихинской [Сухов и др., 2016]. Биостратиграфическое и изотопно-геохимическое исследование этих разрезов позволило оценить полноту геологической летописи переходного интервала докембрия—кембрия в разрезах Игарского поднятия и особенности пространственно-временного распределения скелетных остатков в пределах этого района.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Ввиду представительной биостратиграфической изученности кембрийской (в терминах ОСШ) части разреза по р. Сухариха (правый берег, ~45 км выше устья; 67°12'40" с.ш., 87°19'45" в.д.; см. рис. 1, б), нами были отобраны для извлечения мелких скелетных остатков подстилающие отложения, ранее практически не охарактеризованные палеонтологически (сухарихинская свита и верхи подстилающей ее излучинской свиты). В этом разрезе отобрано 34 образца (5 шт. из верхних 84 м излучинской, 29 шт. — из сухарихинской). Для корреляции в настоящей работе использовалась полученная ранее [Kouchinsky et al., 2007] детальная кривая вариаций  $\delta^{13}\text{C}$  для разреза по р. Сухариха.

В разрезе по р. Кулюмбэ (правый берег, 10 км от устья; 68°02'15" с.ш., 88°40'05" в.д.; см. рис. 1, б) изучены и описаны верхние 126 м сухарихинской свиты и нижние 138 м краснопорожской, вскрытые в естественном обнажении. Образцы для извлечения мелких скелетных остатков (7 шт.) брали только из обнаженного интервала сухарихинской свиты, поскольку распространение мелких скелетных остатков в краснопорожской свите ранее описано в работе [Сипин, 2001]. Для определения изотопного состава углерода в карбонатах в этом разрезе отобрано 107 образцов (73 шт. из сухарихинской свиты с шагом ~1.5 м, 34 шт. из краснопорожской с шагом 4—5 м). При отборе для изучения  $\delta^{13}\text{C}$  предпочтение отдавалось наименее визуально измененным породам: с наиболее выраженной первичной слоистостью и мелкокристаллической структурой, небрекчированные и наименее глинистые разности с минимумом включений и неоднородностей, без макроскопических признаков растворения и перекристаллизации.

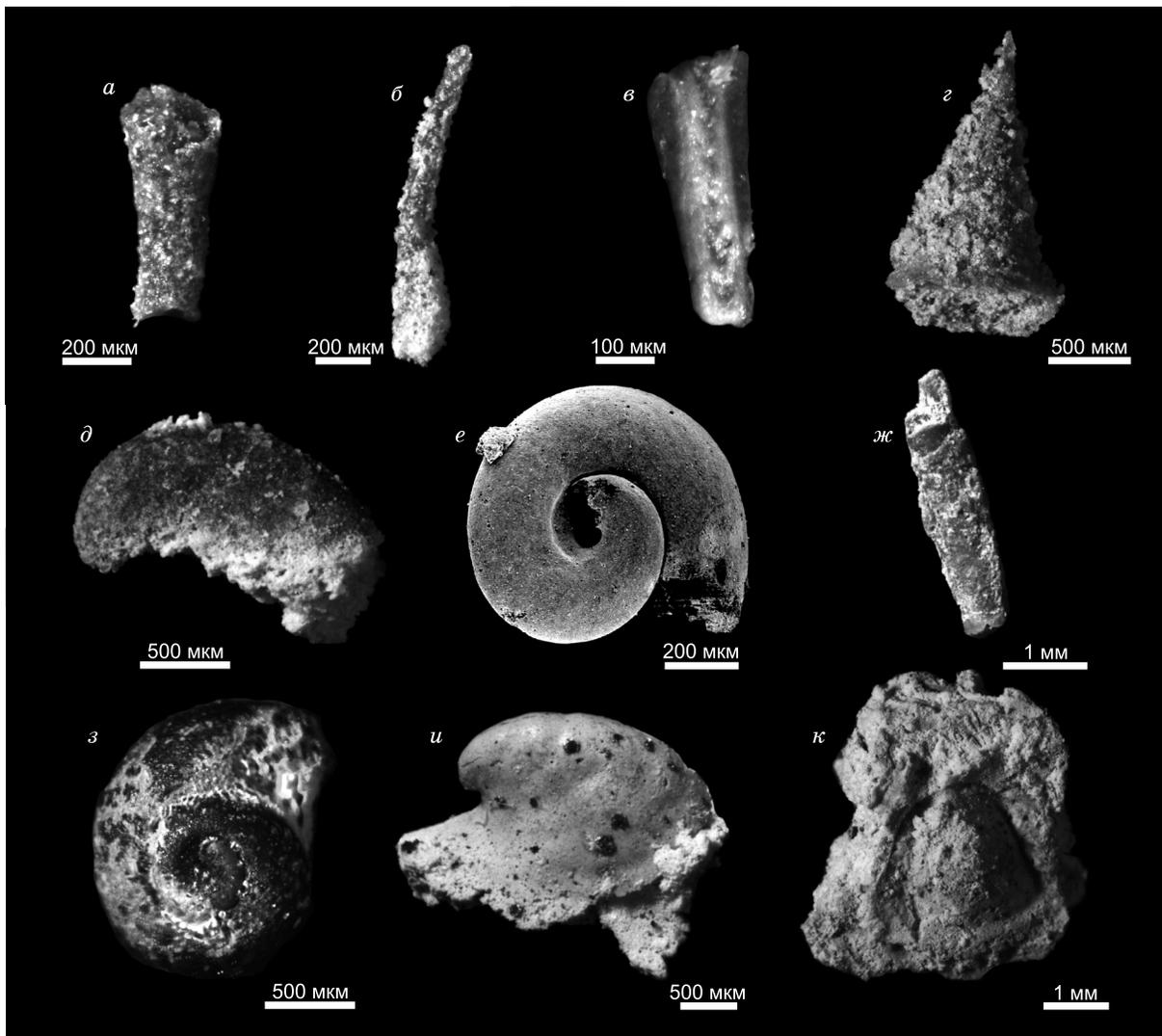
В скважине ХС-1 (см. рис. 1, б; керн хранится в АО «СНИИГГиМС») изучены и детально описаны верхние 65 м полбанской свиты, вся краснопорожская (104 м) и нижние 13 м вышележащей шумнинской свиты. Для извлечения мелких скелетных остатков было отобрано 9 образцов из сухарихинской свиты и 8 образцов из нижних 83 м краснопорожской, для изучения вариаций  $\delta^{13}\text{C}$  — 63 образца (24 шт. из полбанской, 37 шт. из краснопорожской, 2 шт. из шумнинской свит). Все образцы во всех разрезах взяты с их послойной привязкой и детальным описанием вмещающих отложений.

Извлечение мелких скелетных остатков производилось в ИНГГ СО РАН (г. Новосибирск) с применением методики «щадящего» растворения проб в 2 %-м буферном растворе уксусной кислоты (вместо обычно используемой 5—10 %-й концентрации), который поддерживается на постоянном уровне до полного растворения пробы, при этом по крайней мере три раза в неделю осадок промывают и пропускают через сито (размер ячеек 250 мкм). Хотя такой подход существенно увеличивает период растворения образца (2—6 мес.), однако позволяет извлекать тонкие кальцитовые раковины и их внутренние слепки из близкого по составу карбонатного матрикса. Высушенный осадок, содержащий мелкоракочинные остатки, изучался под бинокулярным микроскопом Carl Zeiss Stemi 2000 с увеличением  $\times 6.5$ —50. Изучение морфологии мелких скелетных остатков производилось на стереомикроскопе Leica M205 С с последующей сборкой оптических срезов в единое изображение объектов с большой глубиной резкости в программе Helicon Focus. Палеонтологический материал хранится в ИНГГ СО РАН.

Пробоподготовка образцов для изотопно-геохимических анализов включала в себя их распиловку и высверливание микробуром необходимого количества порошка. Изотопный состав углерода и кислорода в карбонатных породах определялся на масс-спектрометре Finnigan MAT-253 с установкой Gas Bench II (Центр коллективного пользования научным оборудованием многоэлементных и изотопных исследований СО РАН, Новосибирск). Разложение проб и стандартов NBS-18 и NBS-19 проводилось с помощью  $\text{H}_3\text{PO}_4$  при 60 °С. Значения  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  приводятся в промилле (‰) относительно стандарта V-PDB. Точность определения  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$  составляет  $\pm 0.2$  ‰. Для оценки степени постседиментационной измененности пород нами были использованы значения  $\delta^{18}\text{O}$ , а также наличие или отсутствие ковариаций между  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ . Сравнительно высокие значения  $\delta^{18}\text{O}$  ( $> -10$  ‰, V-PDB) и слабая ковариация  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  позволяют предположить их минимальную измененность [Kaufman, Knoll, 1995; Хабаров, Изох, 2014].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Стратотип (р. Сухариха).** В результате растворения в сухарихинской свите ниже уровня первого появления представительного томмотского комплекса остатков впервые были обнаружены достоверные остатки мелкой скелетной фауны. По всему разрезу встречаются редкие внутренние слепки морфологически простых конических раковин *Cambrotubulus* плохой сохранности (рис. 3, а), которые достаточно условно относятся к группе анабаритид [Kouchinsky et al., 2009]. Впервые в разрезе по р. Сухариха остатки *Cambrotubulus* появляются в верхах излучинской свиты (21 м ниже кровли). На этом же уровне появляются слабо изогнутые слепки конических раковин плохой сохранности, внешне сходные со склеритами *Chancelloria* (см. рис. 3, б). Однако плохая сохранность (отсутствие агрегатов склеритов, раковинного вещества) не позволяет отнести эти остатки к ханцеллоридам. В рамках настоящего исследования они интерпретируются как плохо сохранившиеся остатки *Cambrotubulus*. Также при растворении в сухарихинской свите в 295 м выше подошвы установлены внутренние слепки конических раковин с трехлучевой симметрией *Anabarites* (см. рис. 3, в).

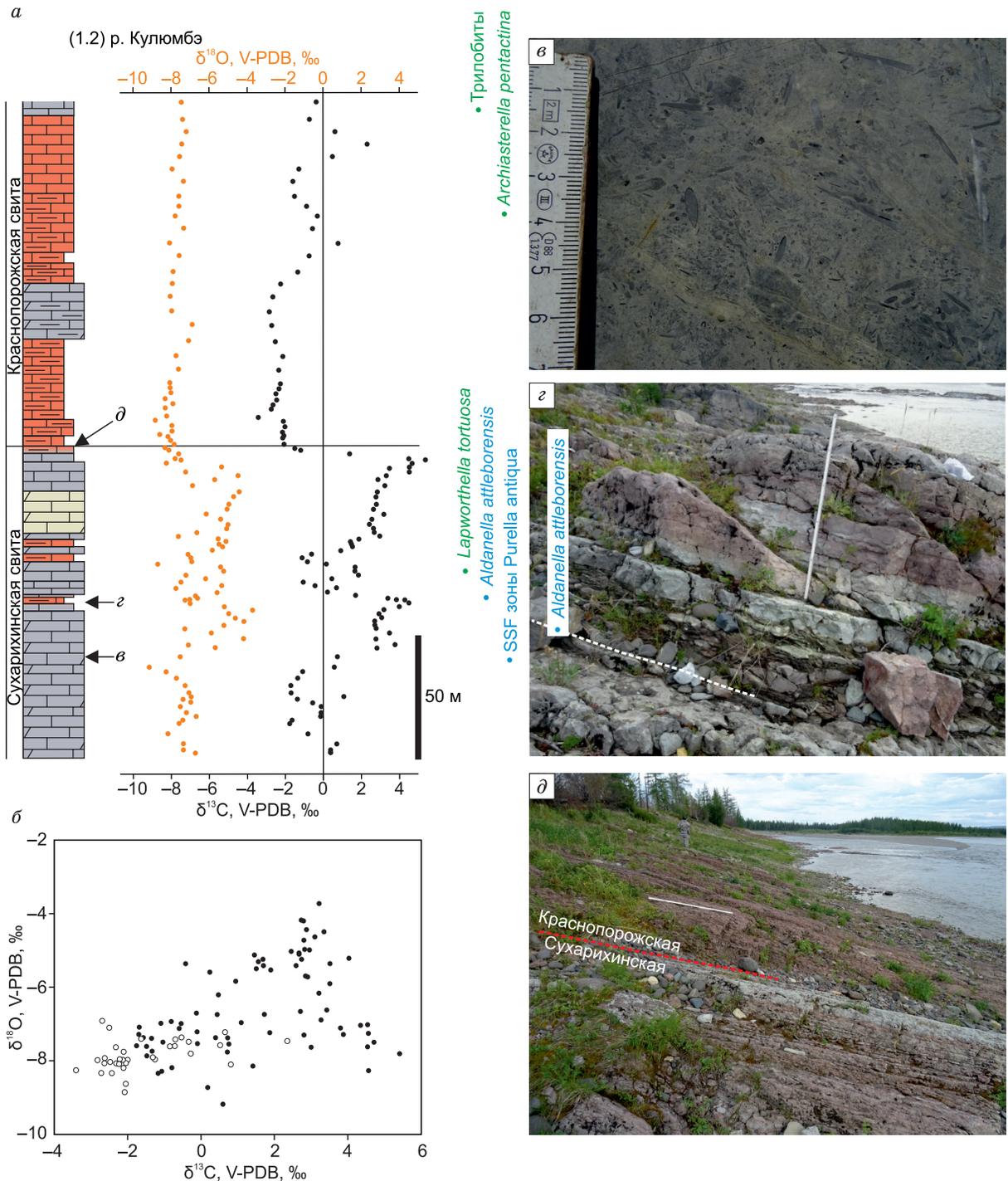


**Рис. 3. Биостратиграфически значимые остатки (слепки) из изученных разрезов.**

Разрез по р. Сухариха: *a* — *Cambrotubulus*, верхняя часть излучинской свиты (21 м ниже кровли); *б* — *Cambrotubulus*, внешне схожий со склеритом *Chancelloria*, излучинская свита (21 м ниже кровли); *в* — *Anabarites*, сухарихинская свита (295 м выше основания). Разрез по р. Кулюмбэ: *г* — *Fomitichella*, сухарихинская свита (84 м ниже кровли); *д* — *Igorella*, сухарихинская свита (84 м ниже кровли); *е* — *Aldanella attleborensis*, сухарихинская свита (63 м ниже кровли) [Сипин, 2001]. Скважина Хантайско-Сухотунгусская-1: *ж* — *Hyalithellus tschuskunensis*, полбанская свита (гл. 1198.83 м; 60.5 м ниже кровли); *з* — *Aldanella attleborensis*, полбанская свита (гл. 1189.4 м; 51 м ниже кровли); *и* — слепок раковины моллюска, сходный с *Figurina*, полбанская свита (гл. 1151.58 м; 13 м ниже кровли); *к* — слепок, морфологически сходный с фрагментом цефалона трилобита (гл. 1151.58 м; 13 м ниже кровли).

**Разрез по р. Кулюмбэ.** Как упоминалось выше, в разрезе по р. Кулюмбэ обнажены только верхние 126 м сухарихинской свиты и нижние 130 м краснопорожской свиты (рис. 4, *a*). Сухарихинская свита в нем представлена в основном известняками серыми и желтовато-серыми доломитистыми известняками. Породы преимущественно массивные или с тонкой параллельной и микробиалитовой слоистостью. По разрезу встречаются маломощные прослои известняков тонкоплитчатых глинистых и конкреционных. В 40 м от основания разреза в известняках появляются скопления крупных (несколько миллиметров в диаметре, первые сантиметры в длину) прямых раковин с округлым сечением, предположительно относящихся к хиолитам (см. рис. 4, *в*). В отличие от стратотипического разреза, красная окраска пород появляется здесь существенно ниже кровли — в 65 м. Она приурочена к интервалу мощностью 4.6 м, представленному снизу вверх постепенным переходом от серых известняков конкреционных к розовато-серым известнякам, к тонкоплитчатым красным и зеленовато-серым мергелям с прослоями конкреционных известняков и далее — к красновато- и розовато-серым глинистым и конкреционным

известнякам. Красноватая окраска пород появляется в нижнем 2-метровом интервале постепенно. Именно к красным тонкоплитчатым мергелям и конкреционным известнякам в двух метрах выше основания этого интервала приурочено появление таксономически разнообразного комплекса мелких скелетных остатков, включающего и слепки раковин *Aldanella attleborensis* (см. рис. 4, а, з) [Даценко и др.,



**Рис. 4. Разрез по р. Кулюмба:**

**а** — строение разреза, хемо- и биостратиграфические данные; **б** — диаграмма корреляции значений  $\delta^{13}\text{C}$ — $\delta^{18}\text{O}$  (черные точки — сухарихинская свита, белые точки — краснопорожская свита); **в** — многочисленные макроскопические остатки хиолитов, впервые появляющиеся в доломитистых известняках в 87 м ниже кровли сухарихинской свиты; **з** — первое появление красноцветных известняков и мергелей в сухарихинской свите, в которой впервые появляется томмотский комплекс мелких скелетных остатков, включая *Aldanella attleborensis* (пунктирная линия; 63 м ниже кровли); **д** — переход от красновато-серых и серых конкреционных известняков сухарихинской свиты к красным глинистым известнякам и мергелям с конкрециями краснопорожской свиты (граница показана белой штриховой линией). Усл. обозн. см. на рис. 2.

1968; Воронова, Розанов, 1973; Сипин, 2001]. Выше по разрезу на протяжении 65 м розовая окраска пород изредка появляется на разных уровнях и приурочена к маломощным интервалам конкреционных и глинистых известняков и становится все более распространенной ближе к кровле свиты. При этом большая часть интервала представлена в разной степени доломитистыми известняками желтовато-серыми и серыми, массивными и с реликтами микробаляитовой слоистости. Верхние 7 м свиты сложены преимущественно розовато-серыми конкреционными известняками и глинистыми известняками. Как и в работе [Сипин, 2001], основание краснопорожской свиты проводится нами в основании мощной красноцветной пачки (около 20 м), представленной глинистыми известняками с многочисленными карбонатными конкрециями (см. рис. 4, д). В этом разрезе в верхней части сухарихинской свиты отсутствуют признаки активной потоковой и волновой гидродинамики, такие как косослоистые и волнисто-слоистые известняки и доломиты, отсутствуют и признаки мелководной седиментации (прослой оолитовых и пизолитовых карбонатов, трещины усыхания, карстовые полости в карбонатах, наличие кристаллов эвапоритовых минералов или их слепков). Помимо микробаляитовой и тонкой параллельной слоистости, в верхней части сухарихинской свиты встречаются только интервалы с бугорчатой слоистостью (нижние 55 м разреза), что свидетельствует о переработке осадка штормами. Учитывая структурно-текстурные признаки пород, формирование верхней части свиты в разрезе на р. Кулюмбэ отвечает обстановкам среднего рамп [Read, 1985; Burchette, Wright, 1992].

Полученные нами данные о вертикальном распространении мелких скелетных остатков в сухарихинской свите в целом повторяют результаты изучения этого разреза, приведенные в [Сипин, 2001]. Так, первые мелкие скелетные остатки (моллюски *Fomitchella* (см. рис. 4, з), *Igorella* (см. рис. 4, д); хиолиты *Conotheca*, *Turcutheca*, *Spinulitheca*; аннелиды *Hyolithellus*), представленные внутренними слепками раковин и появляющиеся в разрезе в 84 м ниже кровли свиты, отвечают терминальной вендской биостратиграфической зоне *Purella antiqua*. Первое появление томмотских форм (включая *Aldanella attleborensis*; см. рис. 4, е) наблюдается в 63 м ниже кровли сухарихинской свиты (см. рис. 4, а).

Сухарихинская свита в разрезе на р. Кулюмбэ характеризуется значительными вариациями изотопного состава углерода (см. рис. 4, а; дополнительные материалы, [https://sibran.ru/journals/Suppl\\_Marusin.pdf](https://sibran.ru/journals/Suppl_Marusin.pdf)). В разрезе четко обособляются два интервала с околонулевыми/слабоотрицательными значениями: в нижних 34 м — малоамплитудные колебания  $\delta^{13}\text{C}$  от  $-1.8$  до  $0.7$  ‰; в интервале 61—44 м ниже кровли — от  $-1.1$  до  $1.9$  ‰. Эти интервалы чередуются с двумя высокоамплитудными положительными экскурсами: в нижнем мощностью 31 м значения  $\delta^{13}\text{C}$  достигают  $4.5$  ‰; в верхнем мощностью 37 м — до  $5.4$  ‰. В верхних 7 м сухарихинской свиты наблюдается резкое уменьшение содержания изотопно-тяжелого углерода — происходит последовательное уменьшение  $\delta^{13}\text{C}$  с  $4.7$  до  $-1.5$  ‰ в  $0.7$  м ниже кровли свиты и до  $-2$  ‰ в основании краснопорожской (1 м выше подошвы). В краснопорожской свите нижние 65 м имеют отрицательные значения  $\delta^{13}\text{C}$ , варьирующие в пределах от  $-3.4$  до  $-2$  ‰. Выше по разрезу наблюдаются осцилляции между слабоотрицательными (около  $-1.2$  ‰) и околонулевыми/слабоположительными (от  $0.5$  до  $2.3$  ‰) с формированием двух малоамплитудных экскурсов. Изотопный состав кислорода в верхней части сухарихинской свиты в разрезе по р. Кулюмбэ варьирует от  $-9.2$  до  $-3.7$  ‰, без ярко выраженных трендов. В краснопорожской свите значения  $\delta^{18}\text{O}$  закономерно изменяются в пределах  $-8.8$ ... $-6.9$  ‰ (см. рис. 4, а). Изученная осадочная последовательность характеризуется значениями  $\delta^{18}\text{O}$  выше  $-10$  ‰ и слабой или умеренной попарной корреляцией  $\delta^{13}\text{C}$ – $\delta^{18}\text{O}$  (для сухарихинской  $R^2 = 0.36$ ; для краснопорожской  $R^2 = 0.39$ ; для всего интервала  $R^2 = 0.56$ ) (см. рис. 4, б). Это позволяет предположить, что первичные изотопные соотношения практически не были затронуты постседиментационными процессами.

**Разрез скважины ХС-1.** Как упоминалось выше, в скв. Хантайская-Сухотунгусская-1 под краснопорожской свитой вскрыты 65 м сероцветных карбонатных отложений (рис. 5, а), выделяемых в этом районе в полбанскую свиту — стратиграфический аналог сухарихинской свиты [Сухов и др., 2016]. В скважине ХС-1 верхняя часть полбанской свиты характеризуется постепенным переходом от темно-серых (местами до черных) мергелей и глинистых известняков, часто конкреционных, к известнякам светло-серым и розовато-серым, в разной степени глинистым. Переход к краснопорожской свите постепенный: красноватая окраска пород появляется в 45-м метре ниже кровли полбанской свиты в отдельных прослоях, а в верхних 10 м этой свиты сероцветные прослой практически отсутствуют. Также в верхних 10 м полбанской свиты широко распространены линзы и маломощные прослой (1—2 см) вишнево-красных алевролитов известковистых и мергелей, типичных для краснопорожской свиты, а также интервалы их чередования с розовато-серыми конкреционными известняками (см. рис. 5, б). Учитывая постепенный переход, основание краснопорожской свиты в этой скважине проведено достаточно условно — в подошве мощной пачки (12 м) вишнево-красных мергелей с многочисленными розовато-серыми и серыми известковыми конкрециями (гл. 1138.15 м) (см. рис. 5, б).

Поскольку изучение верхов полбанской свиты в скв. ХС-1 в керне дает весьма ограниченное представление о текстурных признаках слагающих ее пород и не позволяет проследить латеральную

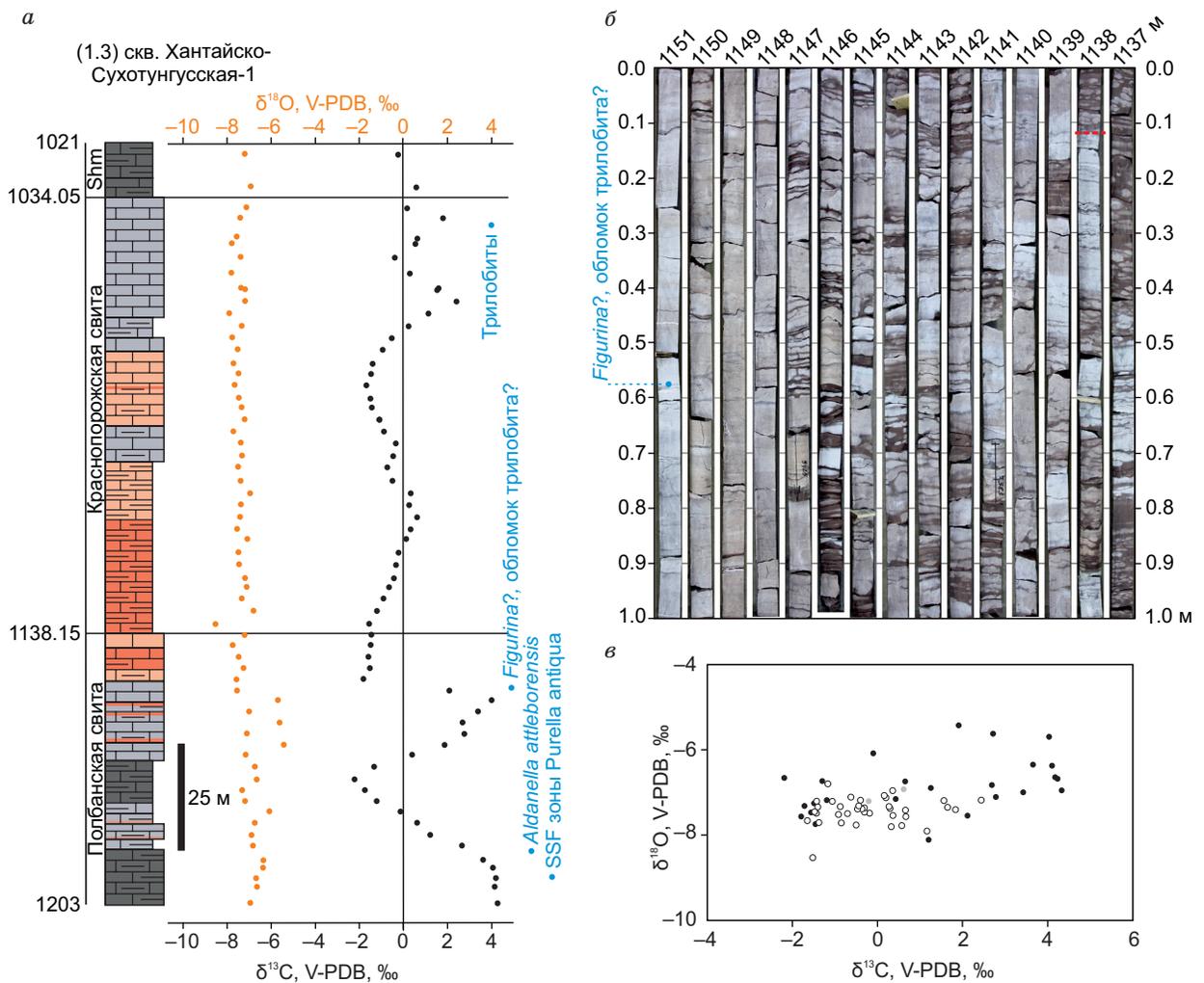


Рис. 5. Разрез нижней части скв. Хантайско-Сухотунгусская-1:

а — строение разреза, хемо- и биостратиграфические данные; б — интервал 1152—1137 м верхов полбанской и низов краснопо́ро́жской свит (белыми штрихами показана граница свит); в — диаграмма корреляции значений  $\delta^{13}\text{C}$ – $\delta^{18}\text{O}$  (черные точки — полбанская свита, белые точки — краснопо́ро́жская свита, серые точки — шумнинская свита). Усл. обозн. см. рис. 2.

изменчивость литотипов, реконструкция обстановок ее формирования значительно затруднена и потому является во многом дискуссионной. Обилие прослоев, обогащенных темным глинистым веществом (от мергелей и алевролитов до глинистых известняков), конкреционная текстура известняков и отсутствие признаков перерывов позволяют говорить о формировании верхней части полбанской свиты в гидродинамически спокойных морских условиях с ограниченным осаждением аутигенного кальцита. Последнее может быть связано как с обилием глинистого вещества, так и со слабой активностью микробных сообществ при наличии биогенной составляющей осаждения карбоната из морской воды. Учитывая отсутствие признаков мелководной седиментации (например, в условиях приливно-отливной равнины или частично изолированной лагуны), мы предполагаем, что формирование изученной верхней части полбанской свиты в скв. ХС-1 отвечает обстановкам внешнего карбонатного рампа [Read, 1985; Burchette, Wright, 1992] (рис. 6, б).

Пре́дыду́щими исследователями полбанская свита сопоставлялась с сухарихинской, при этом отмечалось, что, в отличие от стратотипического разреза последней, в полбанской свите в опорной для этого подразделения скв. ГР-13 томмотские скелетные остатки (включая *Aldanella* aff. *attleborensis*) появляются в 50 м ниже кровли свиты [Сухов и др., 2016]. В скважине ХС-1 остатки *Aldanella attleborensis* (см. рис. 3, з) появляются в 51 м ниже кровли полбанской свиты в ассоциации со слепками раковин моллюсков *Fomitshella* и хиолитов (*Turcutheca*, *Conotheca*) (гл. 1189.4 м). Подстилающие отложения охарактеризованы остатками *Hyolithellus tschuskunensis* (см. рис. 3, ж), известными в ископаемой летописи, начиная с терминальной биостратиграфической зоны венда *Purella antiqua* [Хоментовский, Карло-

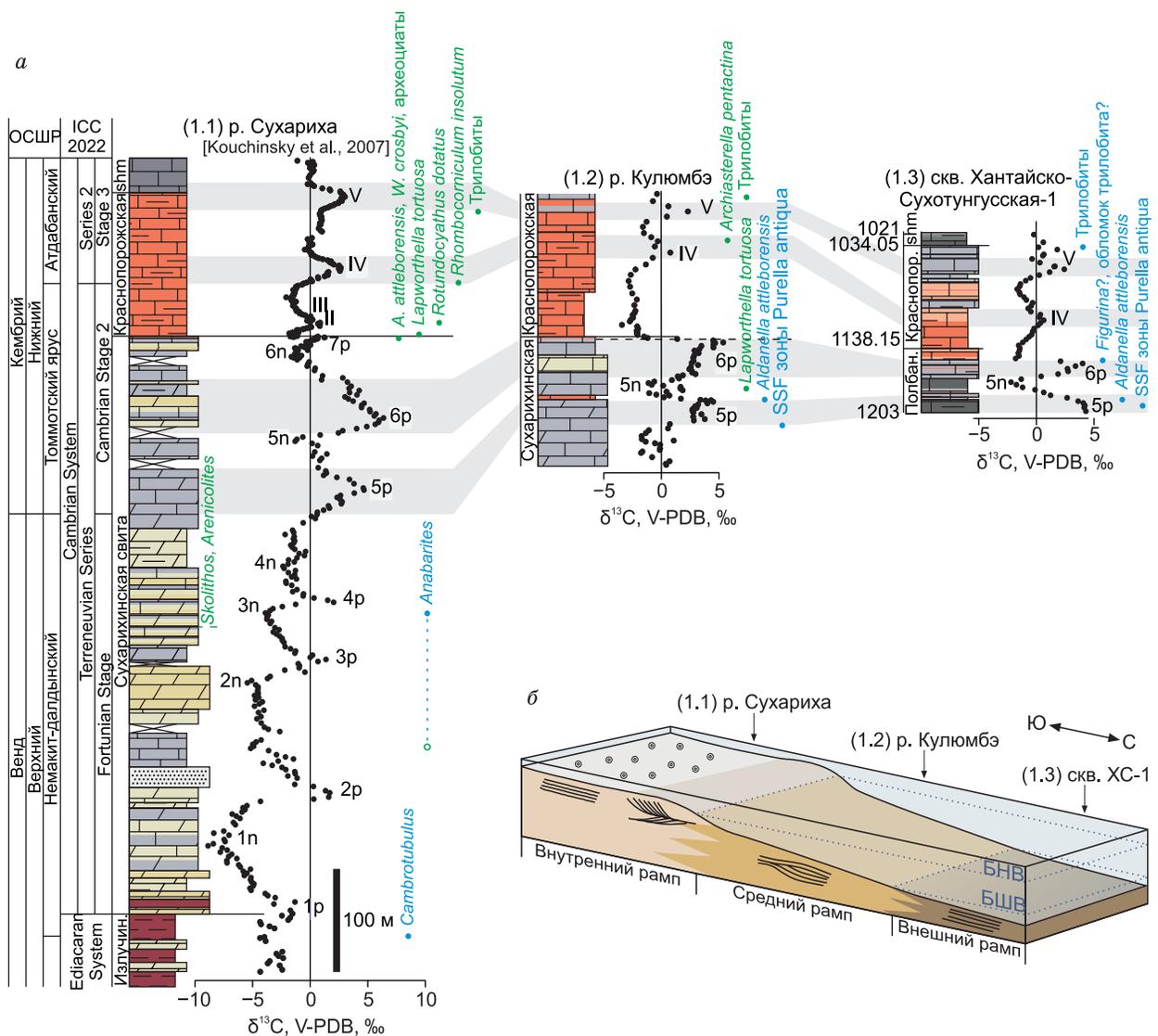


Рис. 6. *a* — корреляция разрезов пограничного интервала докембрия—кембрия Игаро-Норильского района; *б* — обстановки формирования верхней части сухарихинской свиты в изученных разрезах на модели карбонатного рампа, по [Burchette, Wright, 1992; Dechamps et al., 2015].

Усл. обозн. см. на рис. 2. БНВ — базис нормальных волн; БШВ — базис штормовых волн.

ва, 2005]. В 13 м ниже кровли полбанской свиты (гл. 1151.58 м; рис. 5, *б*) в ассоциации с многочисленными остатками биостратиграфической зоны *Nochorocyathus sunnagicus* (моллюски *Aldanella* и *Igarkiella*; хиолиты *Conotheca* и *Spinulitheca*; склериты *Chancelloria*; анабаритиды *Anabarites*) встречены не типичные для этой зоны формы. Первая представляет собой слепок умеренно уплощенной колпачко-видной раковины моллюска с короткой задней поверхностью, загнутой вершиной, не достигающей до края устья, и широким овальным устьем с невысоким изгибом (париетальным треном?) (см. рис. 3, *u*). Среди раннекембрийских моллюсков этот остаток наиболее близок к представителям рода *Figurina* [Пархасев, 2012]. Второй примечательной формой, полученной в растворе на этом уровне, является изометричный слепок диаметром ~4 мм со сложной скульптурой и плохой сохранностью. Морфологически этот остаток похож на слепок фрагмента цефалона трилобита с глабелью и частично сохранившимися щеками (см. рис. 3, *к*).

В полбанской свите (скв. XC-1) значения  $\delta^{13}\text{C}$  варьируют в значительных пределах (см. рис. 5, *a*; см. доп. материалы): вверх по разрезу наблюдается сперва постепенное смещение от положительных (до 4.3 ‰) к отрицательным (до -2.2 ‰ на уровне 1172.35 м), далее — снова к положительным (до 4.0 ‰ на уровне 1153.2 м). Выше наблюдается резкое смещение в сторону отрицательных значений до

–1.8 ‰ на уровне 1148.22 м. Верхние 10 м полбанской свиты и нижние 3 м краснопорожской характеризуются слабоотрицательными значениями  $\delta^{13}\text{C}$  от –1.8 до –1.4 ‰. В краснопорожской свите вверх по разрезу наблюдается сперва смещение соотношений  $\delta^{13}\text{C}$  в сторону околонулевых значений (0.7 ‰ в 29 м выше границы, гл. 1109.05 м), далее — вновь к отрицательным (до –1.5 ‰ в 60 м выше границы, гл. 1077.2 м). Верхние же 43 м краснопорожской и нижние 13 м шумнинской характеризуются осцилляциями  $\delta^{13}\text{C}$  от –0.4 до 2.4 ‰. Изотопный состав кислорода во всем изученном интервале варьирует незначительно (от –8.5 до –5.4 ‰). Причем наиболее заметные вариации наблюдаются в полбанской свите (от –7.5 до –5.4 ‰), без ярко выраженных трендов. В краснопорожской и низах шумнинской свитах значения  $\delta^{18}\text{O}$  преимущественно остаются в пределах от –7.8 до –6.8 ‰, за исключением единичного понижения до –8.5 ‰ в 3.5 м выше основания краснопорожской свиты (см. рис. 5, а). Поскольку все проанализированные породы имеют значения  $\delta^{18}\text{O}$  выше –10 ‰ и характеризуются слабой и умеренной попарной корреляцией  $\delta^{13}\text{C}$ — $\delta^{18}\text{O}$  (для сухарихинской свиты  $R^2 = 0.47$ ; для краснопорожской и низов шумнинской  $R^2 = 0.17$ ; для всего интервала  $R^2 = 0.52$ ) (см. рис. 5, в), можно предположить незначительное влияние постседиментационных процессов на сохранность первичных изотопных соотношений.

## ОБСУЖДЕНИЕ

**Хемотратиграфическая корреляция изученных разрезов.** Три изученных разреза сухарихинской и краснопорожской свит имеют значительное сходство изотопной летописи. Верхи сухарихинской свиты во всех трех разрезах имеют два четко обособляющихся положительных изотопных экскурса (5р и бр) со значениями  $\delta^{13}\text{C}$ , достигающими 5—6 ‰. Краснопорожская же свита характеризуется преимущественно околонулевыми или слабоотрицательными значениями с малоамплитудными положительными экскурсами (IV и V в разрезе по р. Сухариха) [Kouchinsky et al., 2007]. Эти экскурсы в средней и верхней частях свиты прослеживаются во всех трех разрезах. При этом в сухарихинской свите мощность отложений, в которых наблюдаются указанные изотопные экскурсы, последовательно сокращается в северном направлении (от р. Сухариха к скв. ХС-1) (см. рис. 6, а).

Несколько различаются вариации изотопного состава  $\delta^{13}\text{C}$  в переходном интервале сухарихинской—краснопорожской свит. Так, в стратотипе на р. Сухариха в этом интервале наблюдается постепенный переход от положительных значений  $\delta^{13}\text{C}$  экскурса бр к слабоотрицательным (пик бп), а также малоамплитудные вариации (изотопные пики бп и 7р в сухарихинской, II и III в низах краснопорожской) (см. рис. 6). В разрезах на р. Кулюмбэ и в скв. ХС-1 сразу от уровня с максимальными для экскурса бр значениями  $\delta^{13}\text{C}$  наблюдается резкое смещение к слабоотрицательным, причем в скв. ХС-1 уже верхние 10 м полбанской свиты характеризуются слабоотрицательными значениями, аналогичными низам краснопорожской. Явные признаки перерывов в осадконакоплении в переходном интервале между свитами, которые обусловили бы выпадение какой-либо части разреза при близких скоростях седиментации, во всех трех разрезах отсутствуют. Учитывая описанные изменения в литологическом составе разрезов при смещении от стратотипа сухарихинской свиты в северном направлении (существенное обогащение верхов сухарихинской и низов краснопорожской свит глинистым веществом, обилие конкреционных интервалов, отсутствие признаков активной гидродинамики), наблюдаемые изменения в мощностях отложений, вмещающих изотопные экскурсы, и в облике изотопной кривой могут быть связаны со сравнительной конденсированностью переходного интервала сухарихинской—краснопорожской свит в разрезах на р. Кулюмбэ и в скв. ХС-1. Подобное сокращение мощности по мере углубления бассейна (переходе от обстановок внутренней рампы к внешнему) может быть обусловлено, во-первых, обилием хомогенного глинистого вещества, замедляющего осаждение карбонатных минералов из морской воды, а, во-вторых, меньшим количеством солнечного света, достигающего дна и стимулирующего осаждение карбонатных минералов микробными сообществами [Pomar, Kendall, 2008]. Появление же красноцветности в осадочной последовательности на более низких стратиграфических уровнях в северных разрезах (р. Кулюмбэ, скв. ХС-1), как и предполагалось предшественниками [Воронова, Розанов, 1973], говорит о диахронности основания краснопорожской свиты, отражает пространственно-временное скольжение фаций и, вероятно, связано с особенностями развития трансгрессии, с которой связывается начало формирования красноцветной открыто морской осадочной последовательности краснопорожской свиты [Rowland et al., 1998].

**Сопоставление с биостратиграфическими данными.** Полученные в растворе из верхов излучинской свиты единичные находки *Cambrotubulus* и *Anabarites* из средней части сухарихинской являются первыми достоверными свидетельствами распространения мелких скелетных остатков в дотомотских отложениях Игарского поднятия. До этого анабаритиды в нижней части сухарихинской свиты были установлены лишь в шлифах [Лучинина и др., 1997]. Находки *Cambrotubulus* показывают, что как минимум верхние 21 м излучинской свиты и вышележащие отложения относятся к первой биостратиграфической зоне немакит-далдынского яруса верхнего венда *Anabarites trisulcatus* (см. рис. 6, а) [Хо-

ментовский, Карлова, 2005]. Вопрос же о точном положении в разрезе основания кембрия в терминах МСШ остается дискуссионным. Среди ихнофоссилий в сухарихинской свите лишь в средней части известны характерные для фортунского яруса норы *Skolithos* и *Arenicolites* [Коровников и др., 2019]. При отсутствии в ней следов *Treptichnus pedum* и геохронологических датировок выводы о положении основания кембрия МСШ можно сделать лишь на основании мелких скелетных остатков и хемотратиграфических данных. Высокоамплитудный отрицательный экскурс 1n в низах сухарихинской свиты действительно может быть сопоставлен с базальным экскурсом BACE [Peng et al., 2020], что говорит о положении основания кембрия в основании сухарихинской свиты (в основании экскурса 1n) [Kouchinsky et al., 2007; Maloof et al., 2010a]. Находки *Cambrotubulus* ниже этого уровня такой интерпретации не противоречат, поскольку ранее были установлены в достоверно дофортунских (древнее 539 млн лет) отложениях на Оленекском поднятии [Nagovitsin et al., 2015]. Поскольку точное положение основания кембрия относительно отрицательного экскурса BACE остается дискуссионным [Maloof et al., 2010a; Landing et al., 2013], нами принято решение поместить основание кембрия МСШ в основание сухарихинской свиты (см. рис. 6, а).

Учитывая исключительно биостратиграфические данные, основание томмотского яруса кембрия в его широком понимании [Grazhdankin et al., 2020], соответствующее второму ярусу кембрия МСШ (Cambrian Stage 2), в разрезе по р. Сухариха должно располагаться в 1.5 м ниже кровли сухарихинской свиты [Лучинина и др., 1997], в разрезе по р. Кулюмбэ — в 63 м ниже [Воронова, Розанов, 1973; Сипин, 2001], в скв. ХС-1 — в 51 м ниже (см. рис. 6). Принимая во внимание уверенную сопоставляемость этих разрезов и закономерность вариаций  $\delta^{13}\text{C}$ , это, с одной стороны, также показывает диахронность основания краснопорожской свиты, но, с другой, — более позднее первое появление *Aldanella attleborensis* в стратотипе сухарихинской свиты. Это может быть обусловлено двумя факторами: во-первых, палеоэкологической специализацией раннекембрийских мелкораковинных организмов, в частности — появлением представителей *A. attleborensis* сначала в сравнительно более глубоководных фациях (внешний и средний рамп), и несколько позднее — в мелководно-морских (разрез по р. Сухариха). С другой стороны, поскольку в этом разрезе первое появление томмотского комплекса остатков вместе с археоциатами приурочено к появлению недоломитизированных светло-серых и розовато-серых известняков, возможно, что диагенетическая доломитизация негативно влияла на сохранность тонких кальцитовых раковин в ископаемой летописи. Влиянием этих факторов могут служить как редчайшие находки *Cambrotubulus* и *Anabarites* в сухарихинской свите, так и примеры из других регионов: *Cambrotubulus* в туркутской свите Оленекского поднятия [Nagovitsin et al., 2015]; *Cambrotubulus*, *Blastulospongia*, *Barskovia* и склериты ханцеллорид в платоновской свите Туруханского поднятия [Marusin et al., 2019]. Учитывая полученные ранее данные о близком первом появлении предполагаемых индекс-таксонов второго яруса кембрия МСШ (*Aldanella attleborensis* и *Watsonella crosbyi*) к первому крупному положительному экскурсу ZHUCE [Grazhdankin et al., 2020], мы с опорой на изотопно-геохимические данные и уровень первого появления *A. attleborensis* в более северных разрезах помещаем основание томмотского яруса (и Cambrian Stage 2) в основание изотопного экскурса 5p (см. рис. 6, а).

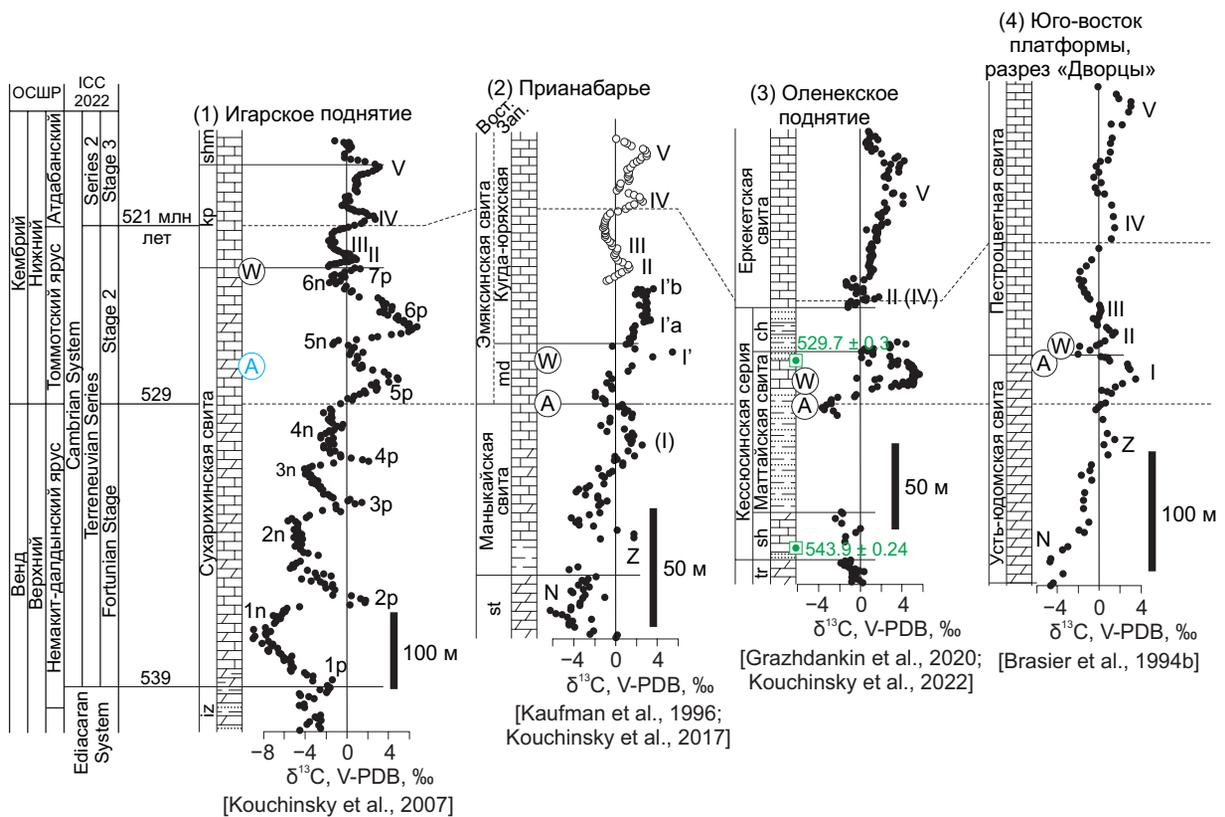
Выделение томмотских биостратиграфических зон и основания атдабанского яруса на Игарском поднятии лежит вне пределов настоящего исследования, поэтому будет рассмотрено кратко, преимущественно с опорой на литературные источники. Так, основание биостратиграфической зоны *Dokidocyathus regularis* в разрезе по р. Сухариха по палеонтологическим данным установлено в 1 м выше основания краснопорожской свиты, а *Dokidocyathus lenaicus* — в 11 м [Rowland et al., 1998]. Основание атдабанского яруса в краснопорожской свите в разрезе по р. Сухариха по появлению археоциат *Rotundocyathus dotatus* и *Pliocyathus* cf. *Pliocyathus platyseptatus* было установлено в 12.5 м [Rowland et al., 1998]. Однако по изотопно-геохимическим данным в работе [Kouchinsky et al., 2007] при сопоставлении со стратотипическими разрезами нижнего кембрия по р. Алдан было предложено альтернативное расчленение: основание биостратиграфической зоны *Dokidocyathus regularis* располагается в 3.5 м (изотопный пик II), зоны *Dokidocyathus lenaicus* — в 18.5 м (завершение пика III), атдабанского яруса — в 50 м (пик IV). Верификация хемотратиграфической корреляции перечисленных трех границ затрудняется тем, что используемые экскурсы  $\delta^{13}\text{C}$  очень малоамплитудны (в пределах 3‰) и потому могут отражать специфику фракционирования углерода и постседиментационные изменения изотопных систем в разных палеобассейнах. Биостратиграфическая же корреляция затруднена даже в пределах Игарского палеобассейна. Так, в разрезе по р. Кулюмбэ в краснопорожской свите совершенно отсутствуют археоциаты [Даценко и др., 1968; Сипин, 2001]. По мелким скелетным остаткам основание зоны *Dokidocyathus regularis* может быть прослежено по первому появлению томмотиид *Lapworthella tortuosa* [Коровников, Новожилова, 2012], установленных в 2 м выше основания краснопорожской свиты в разрезе по р. Сухариха и в 45 м ниже кровли сухарихинской свиты в разрезе по р. Кулюмбэ [Сипин, 2001]. По литературным данным зона *Dokidocyathus lenaicus* в разрезе по р. Кулюмбэ не выделяется вовсе. Основание атдабанского яруса Д.П. Сипиным [2001] в разрезе по р. Сухариха было предложено проводить в крас-

нопорожской свите по появлению склеритов *Rhombocorniculum insolutum* в 54 м выше основания, а на р. Кулюмбэ — по появлению склеритов *Archiasterella pentactina* в 94 м выше основания. Однако в работе [Kouchinsky et al., 2015] показана принадлежность *Rhombocorniculum insolutum* к томмотской зоне *Dokidocyathus lenaicus*. Трилобиты (как маркеры несомненно атдабанского возраста вмещающих отложений) появляются в разрезе по р. Сухариха лишь в самых верхах краснопорожской свиты (в 20 м ниже кровли), на р. Кулюмбэ — в 135 м выше ее основания (см. рис. 6, а).

В скважине ХС-1 выше уровня первого появления *Aldanella attleborensis* не наблюдается появления каких-либо форм, характерных для зон *Dokidocyathus regularis* и *D. lenaicus*. Исключение составляет лишь уровень 1151.58 м, где вместе с таксонами зоны *Nochoroicyathus sunnaginicus* обнаружены формы плохой сохранности, сходные с обломком цефалона трилобита (см. рис. 3, к) и с моллюсками *Figurina* (см. рис. 3, и), которые появляются в ископаемой летописи не раньше атдабанского века [Li et al., 2021]. Однако предположение об атдабанском возрасте вмещающих остатки отложений видится крайне сомнительным по ряду причин. Во-первых, первые достоверные остатки трилобитов (*Pagetiellus*; определение Е.В. Бушуева) появляются в скв. ХС-1 значительно выше этого уровня (в 2 м ниже кровли краснопорожской свиты) и имеют ботомский возраст (см. рис. 5, а). Во-вторых, выше этого уровня не происходит существенного обогащения комплекса мелких скелетных остатков верхнетоммотскими и атдабанскими формами. В-третьих, основываясь на геохронологической калибровке изотопных экскурсов 5р, 6р, II-III-IV по U-Pb датировкам из Марокко [Malooof et al., 2005, 2010b], окончание экскурса 6р, где в разрезе ХС-1 и появляются вышеуказанные формы, имеет возраст ~525 млн лет, что существенно древнее основания атдабанского яруса. В-четвертых, сохранность форм не позволяет однозначно говорить об их принадлежности к трилобитам и моллюскам *Figurina* соответственно. Так, характерный изгиб устья раковины (париетальный трен) является хотя и отличительным признаком для атдабанских и более молодых представителей секуриконид, однако появляется у гелиционеллоидных моллюсков еще в раннем томмоте [Пархаев, 2012].

Таким образом, обоснование положения биостратиграфических зон *Dokidocyathus regularis* и *D. lenaicus* томмотского яруса кембрия и атдабанского яруса в разрезах Игарского поднятия требует дальнейшего детального изучения. При этом изотопно-геохимические данные позволяют коррелировать разрезы с высокой точностью (см. рис. 6, а). В качестве рабочей модели нами за основание атдабанского яруса принимается основание положительного экскурса IV, по [Kouchinsky et al., 2007]. Однако дальнейшие исследования должны быть направлены в том числе и на критическую оценку такого предположения, поскольку стратиграфические границы в фанерозое маркируют разного масштаба этапы развития органического мира, а следовательно, должны сопровождаться идентифицируемыми (в случае благоприятных фациальных и тафономических условий) изменениями в ориктоценозах.

**Региональная корреляция.** Полученные нами био- и хемотратиграфические данные о положении основания томмотского яруса в разрезах Игарского поднятия подтверждают высказанное ранее суждение о соответствии ему положительного экскурса 5р сухарихинской свиты [Kouchinsky et al., 2007; Malooof et al., 2010a]. Установленная диахронность первого появления томмотских таксонов мелко-раковинной фауны в пределах единого палеобассейна дает основание обсудить положение этой стратиграфической границы в некоторых из опорных разрезов нижнего кембрия Сибирской платформы (рис. 7). Полученные данные о появлении *Aldanella attleborensis* в пределах изотопного экскурса 5р (верхней его части) подтверждают сопоставление экскурсов 5р и 6р с двумя экскурсами в верхней части маттайской и низах чускунской свит кессюсинской серии Оленекского поднятия северо-востока Сибирской платформы [Grazhdankin et al., 2020]. При этом корреляция вышележащих кембрийских отложений в разрезах Игарского и Оленекского поднятий (краснопорожская и еркекетская свиты) несколько затруднена. Так, на Оленекском поднятии древнейшие трилобиты *Profallotaspis* sp. появляются всего в 11 м выше основания еркекетской свиты [Асташкин и др., 1992; Коровников, 2002], которая с несогласием залегает на чускунской свите кессюсинской серии [Nagovitsin et al., 2015]. В недавней работе [Kouchinsky et al., 2022], основываясь на полученных для еркекетской свиты хемотратиграфических данных, было высказано предположение о соответствии малоамплитудного экскурса вблизи ее основания экскурсу II в низах пестроцветной свиты в разрезе «Дворцы» по р. Алдан (и экскурсу II в низах сухарихинской свиты в разрезе по р. Сухариха), а вышележащий крупный экскурс в средней части свиты — с экскурсом V верхов петроцветной свиты (верхи атдабанского яруса). Не оспаривая последнее, первое предположение кажется нам спорным, поскольку таким образом в еркекетской свите отсутствуют экскурсы III и IV, хотя признаков перерыва в осадконакоплении в еркекетской свите не установлено. Вполне возможно, что малоамплитудный положительный экскурс в основании еркекетской свиты может быть именно экскурсом IV. Во-первых, его сравнительно небольшая амплитуда (не более 2 ‰) также отмечена в разрезе «Дворцы» (см. рис. 7) [Brasier et al., 1994b], а, во-вторых, перерыв в основании еркекетской свиты [Nagovitsin et al., 2015], скорее, позволяет предполагать выпадение части осадочной летописи (экскурсы II и III).



**Рис. 7. Корреляция сводного разреза Игарского поднятия с опорными разрезами переходного интервала докембрия—кембрия Сибирской платформы, по [Grazhdankin et al., 2020] с изменениями.**

Географическое положение разрезов см. рис. 1, а. U-Pb датировки в разрезе Оленекского поднятия приведены из работ:  $543.9 \pm 0.24$  млн лет — [Bowring et al., 1993],  $529.7 \pm 0.24$  млн лет — [Kaufman et al., 2012]. Нумерация изотопных экскурсов приведена из работ, указанных к соответствующим разрезам. Пустые кружки в верхней части кривой  $\delta^{13}\text{C}$  в разрезе (2) приведены из разрезов Восточного Прианабарья (р. Большая Куонамка) по [Kouchinsky et al., 2017].

Усл. обозн. см. рис. 2. Свиты: iz — излучинская, kp — краснопорожская, shm — шумнинская, st — старореченская, md — медвежинская, tr — туркутская, sh — сыргалахская, ch — чускунская. Первые появления таксонов в разрезах: (A) — *Aldanella attleborensis*, (W) — *Watsonella crosbyi*. Синим цветом уровень появления *Aldanella attleborensis* в разрезе Игарского поднятия показан на основании корреляции стратотипа (р. Сухариха) с разрезами по р. Кулумбэ и скв. Хантайско-Сухотунгусская-1 (см. рис. 6).

Учитывая влияние палеоэкологических и тафономических факторов на облик и состав ориктоценозов, весьма вероятным является ранее высказанное предположение о соответствии положительного экскурса I в доломитах верхней части усть-юдомской свиты в разрезе «Дворцы» (р. Алдан, юго-восток Сибирской платформы) экскурсу 5р, а следовательно — о положении основания томмотского яруса кембрия в его широком понимании (эквивалент Cambrian Stage 2 МСШ) вблизи основания этого экскурса [Grazhdankin et al., 2020]. Таким образом, перерыв в основании пестроцветной свиты, подчеркнутый карстовыми полостями в кровле усть-юдомской свиты в некоторых разрезах и связываемый с локальным осушением территории [Knoll et al., 1995], действительно имеет место, но охватывает лишь интервал, приблизительно соответствующий существованию изотопного экскурса  $\delta^{13}\text{C}$  6р. Вероятно, именно этот экскурс установлен на юго-востоке Сибирской платформы в низах пестроцветной свиты в разрезе по р. Селинде (экскурс I'n) [Kouchinsky et al., 2005; Landing, Kouchinsky, 2016].

Наличие крупного положительного экскурса  $\delta^{13}\text{C}$  I' в верхней части медвежинской свиты Западного Прианабарья и нижней части эмяксинской свиты Восточного Прианабарья, а также нахождение вблизи основания этих подразделений уровня первого появления *Aldanella attleborensis* указывает на томмотский возраст вмещающих отложений [Kouchinsky et al., 2017]. Несмотря на представительную изотопно-геохимическую и палеонтологическую летопись разрезов [Хоментовский, Карлова, 1994; Kaufman et al., 1996; Kouchinsky et al., 2017], стратиграфическое положение основания томмотского яруса в этом регионе является дискуссионным. Одними исследователями на основании сопоставления изотопно-геохимических и биостратиграфических данных был сделан вывод о соответствии указанного

выше уровня основания томмотского яруса: внутри медвежинской и эмьяксинской свит — на уровне максимальных значений экскурса I' и первого появления моллюсков *Watsonella crosbyi* [Kouchinsky et al., 2017] или в основании свит — вблизи основания этого экскурса и уровня первого появления *Aldanella attleborensis* [Marusin et al., 2019]. Альтернативная точка зрения предполагает положение нижней границы томмотского яруса значительно ниже — вблизи основания положительного экскурса  $\delta^{13}\text{C}$  (I) в верхней части нижележащей манькайской свиты [Grazhdankin et al., 2020]. В свете полученных нами данных, такое предположение видится менее вероятным по нескольким причинам. Во-первых, несмотря на представительную палеонтологическую летопись (наблюдается последовательная смена комплексов мелких скелетных остатков биостратиграфических зон *Anabarites trisulcatus* и *Purella antiqua* [Хоментовский, Карлова, 1994]), в верхней части манькайской свиты отсутствуют томмотские формы. При условии положения основания томмотского яруса в манькайской свите, отсутствие в ней *Aldanella attleborensis* может отражать особенности палеогеографического распространения этого таксона (например, распространение с востока на запад) [Parkhaev, Karlova, 2011]. Однако на Игарском поднятии этот таксон появляется уже на уровне верхней части экскурса 5p (т. е. даже немногим ранее, чем в Прианабарье) (см. рис. 7). Впрочем, нельзя исключать, что уровень первого появления *Aldanella attleborensis* в разрезах Прианабарья контролируется палеоэкологической спецификой биот (например, приуроченность к сравнительно более дистальным открыто морским обстановкам). Во-вторых, экскурс (I) в верхней части манькайской свиты имеет значительно меньшую амплитуду (максимум, до 2.5 ‰), чем экскурс в верхней части маттайской свиты Оленекского поднятия (до 5.4 ‰), экскурс 5p в сухарихинской свите Игарского поднятия (до 4.6 ‰) и даже экскурс I (до 3.4 ‰) в верхней части усть-юдомской свиты на р. Алдан. В-третьих, выше экскурса I' в эмьяксинской свите Восточного Прианабарья и кугда-юряхской свите Западного Прианабарья наблюдается еще один амплитудный положительный экскурс (I'a— I'б), выше которого вариации изотопного состава углерода демонстрируют значительное сходство с таковыми в пестроцветной свите в разрезе «Дворцы» (р. Алдан) и в краснопорожской свите Игарского поднятия [Landing, Kouchinsky, 2016; Kouchinsky et al., 2017]. С нашей точки зрения, положительный экскурс (I) в верхней части манькайской свиты более вероятно соответствует малоамплитудному положительному экскурсу Z в средней части усть-юдомской свиты в разрезе «Дворцы» и какому-то из положительных экскурсов 3p и 4p в средней части сухарихинской свиты Игарского поднятия (см. рис. 7). Вместе с этим высказанное нами предположение не претендует на безальтернативность. Выявление положения основания томмотского яруса в разрезах Прианабарья требует всестороннего (палеонтологического, изотопно-геохимического и геохронологического) их изучения, равно как и дальнейших исследований специфики эволюции и палеоэкологии раннекембрийских биот.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. Впервые полученные в растворе мелкие скелетные остатки *Cambrotubulus* из верхов излучинской свиты в разрезе по р. Сухариха сопоставляют вмещающие и перекрывающие отложения с биостратиграфической зоной *Anabarites trisulcatus* верхнего венда. При этом уровень их первого появления подтверждает сопоставление отрицательного экскурса 1n в основании сухарихинской свиты с глобальным отрицательным экскурсом BACE, рассматриваемым в качестве критерия определения основания кембрия в Международной стратиграфической шкале. В отсутствие геохронологических датировок, точное определение этой границы требует детального сопоставления существующих хемо- (экскурсы  $\delta^{13}\text{C}$ ) и биостратиграфических (мелкие скелетные остатки, ихнофоссилии) критериев.

2. Изотопная летопись в разрезах верхов сухарихинской и краснопорожской свит по р. Сухариха, р. Кулюмбэ и в скв. ХС-1 позволяет с большой детальностью провести их корреляцию между собой и, опираясь на хемотратиграфические (хорошо трассируемые положительные экскурсы 5p и 6p) и биостратиграфические данные (уровни первого появления *Aldanella attleborensis* и ассоциирующих томмотских форм), установить положение томмотского яруса кембрия Общей стратиграфической шкалы (в его широком понимании) и, соответственно, основания второго яруса кембрия МСШ.

3. Сопоставление состава и изотопной летописи верхней части сухарихинской и краснопорожской свит в изученных разрезах подтверждает предположение о диахронности начала формирования красноцветных толщ (краснопорожская свита) в пределах Игарского палеобассейна с постепенным омоложением этого рубежа при смещении из более глубоководных к мелководным (с севера на юг в современных координатах).

4. Диахронность появления томмотских комплексов мелких скелетных остатков (появляются стратиграфически ниже в более дистальных отложениях — северные разрезы) обусловлена палеоэкологическими особенностями раннекембрийских биот и, возможно, тафономическими причинами (диагенетической доломитизацией).

5. Наблюдаемая даже в пределах Игарского палеобассейна диахронность появления томмотских мелких скелетных остатков говорит в пользу высказанного ранее предположения о принадлежности к томмотскому ярусу кембрия верхней части усть-юдомской свиты в стратотипе томмотского яруса на р. Алдан. При этом предположение о принадлежности к томмотскому ярусу кембрия верхней части манькайской свиты в разрезах Прианабарья является спорным и требует дополнительного изучения распределения мелких скелетных остатков в этом интервале.

Исследование проведено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-05-00101; экспедиционные исследования) и Российского научного фонда (проект 21-17-00052; аналитические исследования). Тематика исследования скоординирована с Программой фундаментальных научных исследований РАН FWZZ-2022-0002.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИНГГ СО РАН (г. Новосибирск) С.В. Сараеву за помощь в экспедиционных работах и И.В. Коровникову в идентификации проблематичных остатков и в поиске палеонтологического материала с р. Кулюмбэ, приведенного в 2001 г. Д.П. Сипиным в его диссертации. Авторы также благодарны Е.В. Бушуеву (Новосибирский филиал ФГБУ ВНИГНИ) за информацию о положении древнейших остатков трилобитов в скв. Хантайско-Сухотунгусская-1, признательны рецензентам — чл.-кор. РАН Д.П. Гладкочубу (ИЗК СО РАН) и д.г.-м.н. Д.В. Гражданкину (ИНГГ СО РАН) — за ценные комментарии и замечания, которые позволили существенно улучшить финальную версию рукописи.

#### ЛИТЕРАТУРА

**Асташкин В.А., Журавлев А.Ю., Пегель Т.В., Репина Л.Н., Розанов А.Ю., Шабанов Ю.Я., Сундуков В.В., Сухов С.С.** Основные разрезы кембрия Сибирской платформы и их корреляция // Кембрий Сибири. Новосибирск, Наука, 1992, с. 62—114. (Труды ОИГГМ СО РАН, вып. 788).

**Воронова Л.Г., Розанов А.Ю.** К вопросу о соотношении лито- и биостратиграфических границ в кембрии Игарского района // Проблемы палеонтологии и биостратиграфии нижнего кембрия Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск, Наука, 1973, с. 220—224. (Труды ИГГ АН СССР, вып. 49).

**Даценко В.А., Журавлева И.Т., Лазаренко Н.П., Попов Ю.Н., Чернышева Н.Е.** Биостратиграфия и фауна кембрийских отложений северо-запада Сибирской платформы. Л., Недра, 1968, 213 с. (Труды НИИГА, т. 155).

**Карлова Г.А.** Первые находки скелетной фауны в туркутской свите Оленекского поднятия // ДАН, 1987, т. 292, № 1, с. 204—205.

**Коровников И.В.** Новые данные по биостратиграфии нижнего и среднего кембрия северо-востока Сибирской платформы (разрез р. Хорбосуонка, Оленекское поднятие) // Геология и геофизика, 2002, т. 43 (9), с. 826—836.

**Коровников И.В., Новожилова Н.В.** Новые данные по биостратиграфии нижнего и низов среднего кембрия Хараулахских гор (северо-восток Сибирской платформы, Чекуровская антиклиналь) // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (8), с. 1014—1026.

**Коровников И.В., Марусин В.В., Токарев Д.А., Обут О.Т.** Ископаемые следы жизнедеятельности из переходных отложений венда и кембрия Игарского поднятия (северо-запад Сибирской платформы) // Палеонтологический журнал, 2019, № 6, с. 16—24.

**Лучинина В.А., Коровников И.В., Сипин Д.П., Федосеев А.В.** Биостратиграфия верхнего венда—нижнего кембрия разреза р. Сухариха (Сибирская платформа) // Геология и геофизика, 1997, т. 38 (8), с. 1346—1358.

**Пархаев П.Ю.** Кембрийская радиация моллюсков: становление морфологического и таксономического разнообразия: Автореф. дис.... д. б. н. М., ПИН РАН, 2012, 42 с.

**Розанов А.Ю., Семихатов М.А., Соколов Б.С., Федонкин М.А., Хоментовский В.В.** Решение о выборе стратотипа границы докембрия и кембрия: прорыв в проблеме или ошибка? // Стратиграфия. Геологическая корреляция, 1997, т. 5, № 1, с. 21—31.

**Розанов А.Ю., Хоментовский В.В., Шабанов Ю.Я., Карлова Г.А., Варламов А.И., Лучинина В.А., Пегель Т.В., Демиденко Ю.Е., Пархаев П.Ю., Коровников И.В., Скорлотова Н.А.** К проблеме ярусного расчленения нижнего кембрия // Стратиграфия. Геологическая корреляция, 2008, т. 16, № 1, с. 3—21.

**Сипин Д.П.** Хиолиты, проблематичные организмы и стратиграфия нижнего кембрия северо-запада Сибирской платформы: Автореф. дис. ... к.г.-м.н. Новосибирск, ИНГГ СО РАН, 2001, 21 с.

**Стратиграфический кодекс России / Ред. А.И. Жамойда.** СПб, Издательство ВСЕГЕИ, 2019, 96 с.

**Сухов С.С., Шабанов Ю.Я., Пегель Т.В., Сараев С.В., Филиппов Ю.Ф., Коровников И.В., Сундуков В.М., Федоров А.Б., Варламов А.И., Ефимов А.С., Конторович В.А., Конторович А.Э.** Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Кембрий Сибирской платформы. Т. 1 / Ред. Ю.Я. Шабанов. Новосибирск, Акад. изд-во «Гео», 2016, 491 с.

**Хабаров Е.М., Изох О.П.** Седиментология и изотопная геохимия рифейских карбонатных отложений Хараулахского поднятия севера Восточной Сибири // *Геология и геофизика*, 2014, т. 55 (5—6), с. 797—820.

**Хоментовский В.В., Карлова Г.А.** Специфика экологии венд-кембрийских биот мелкораквиной фауны Сибирской платформы // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*, 1994, т. 2, № 3, с. 8—17.

**Хоментовский В.В., Карлова Г.А.** Граница немакит-далдынского и томмотского ярусов (венд—кембрий) Сибири // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*, 2002, т. 10, № 3, с. 13—34.

**Хоментовский В.В., Карлова Г.А.** Основание томмотского яруса — нижняя граница кембрия Сибири // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*, 2005, т. 13, № 1, с. 26—40.

**Bowring S.A., Grotzinger J.P., Isachsen C.E., Knoll A.H., Pelechaty S.M., Kolosov P.** Calibrating rates of Early Cambrian evolution // *Science*, 1993, v. 261, p. 1293—1298, doi: 10.1126/science.11539488.

**Brasier M., Cowie J., Taylor M.** Decision on the Precambrian—Cambrian boundary stratotype // *Episodes*, 1994a, v. 17 (1—2), p. 3—8, doi: 10.18814/epiugs/1994/v17i1.2/002.

**Brasier M.D., Corfield R.M., Derry L.A., Rozanov A.Yu., Zhuravlev A.Yu.** Multiple  $\delta^{13}\text{C}$  excursions spanning the Cambrian explosion to the Botomian crisis in Siberia // *Geology*, 1994b, v. 22, p. 455—458, doi: 10.1130/0091-7613(1994)022<0455:MCESTC>2.3.CO;2.

**Burchette T.P., Wright V.P.** Carbonate ramp depositional models // *Sediment. Geol.*, 1992, v. 79, p. 3—57, doi: 10.1016/0037-0738(92)90003-A.

**Cohen K.M., Finney S.C., Gibbard P.L., Fan J.-X.** The ICS International Chronostratigraphic Chart // *Episodes*, 2013 (updated 2022), v. 36, p. 199—204, doi: 10.18814/epiugs/2013/v36i3/002.

**Conway Morris S.** The Cambrian “explosion”: Slow-fuse or megatonnage? // *PNAS*, 2000, v. 97, p. 4426—4429, doi: 10.1073/pnas.97.9.4426.

**Dechamps S., Da Silva A.-C., Boulvain F.** Magnetic susceptibility and facies relationship in Bajocian—Bathonian carbonates from the Azé caves, southeastern Paris Basin, France // *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, 2015, v. 414, p. 93—109, doi: 10.1144/SP414.11.

**Erwin D.H., Laflamme M., Tweedt S.M., Sperling E.A., Pisani D., Peterson K.J.** The Cambrian conundrum: Early divergence and later ecological success in the early history of animals // *Science*, 2011, v. 334, p. 1091—1097, doi: 10.1126/science.1206375.

**Grazhdankin D.V., Marusin V.V., Izokh O.P., Karlova G.A., Kochnev B.B., Markov G.E., Nagovitsin K.E., Sarsembaev Z., Peek S., Cui H., Kaufman A.J.** Quo vadis, Tommotian? // *Geol. Mag.*, 2020, v. 157 (1), p. 22—34, doi: 10.1017/S0016756819001286.

**Kaufman A.J., Knoll A.H.** Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: stratigraphic and biogeochemical implications // *Precambrian Res.*, 1995, v. 72, p. 27—49, doi: 10.1016/0301-9268(94)00070-8.

**Kaufman A.J., Knoll A.H., Semikhatov M.A., Grotzinger J.P., Jacobsen S.B., Adams W.** Integrated chronostratigraphy of Proterozoic—Cambrian boundary beds in the western Anabar region, northern Siberia // *Geol. Mag.*, 1996, v. 133, p. 509—533, doi: 10.1017/s0016756800007810.

**Kaufman A.J., Peek S., Martin A.J., Cui H., Grazhdankin D., Rogov V., Xiao S., Buchwaldt R., Bowring S.** A shorter fuse for the Cambrian Explosion? // *GSA, Abstracts with Programs*, 2012, v. 44, p. 326.

**Knoll A.H., Kaufman A.J., Semikhatov M.A., Grotzinger J.P., Adams W.** Sizing up the sub-Tommotian unconformity in Siberia // *Geology*, 1995, v. 23, p. 1139—1143, doi: 10.1130/0091-7613(1995)023<1139:SUTSTU>2.3.CO;2.

**Kochnev B.B., Khudoley A.K., Priyatkina N.S., Dufrane S.A., Pokrovsky B.G., Kuznetsov A.B., Kaurova O.K., Marusin V.V.** Neoproterozoic evolution of the northwestern margin of the Siberian Platform // *Precambrian Res.*, 2022, v. 382, 106877, doi: 10.1016/j.precamres.2022.106877.

**Kouchinsky A., Bengtson S., Pavlov V., Runnegar B., Val'kov A., Young E.** Pre-Tommotian age of the lower Pestrotsvet Formation in the Selinde section on the Siberian platform: carbon isotopic evidence // *Geol. Mag.*, 2005, v. 142, p. 319—325, doi: 10.1017/S0016756805000865.

**Kouchinsky A., Bengtson S., Pavlov V., Runnegar B., Torssander P., Young E., Ziegler K.** Carbon isotope stratigraphy of the Precambrian—Cambrian Sukharikha River section, northwestern Siberian platform // *Geol. Mag.*, 2007, v. 144, p. 609—618, doi: 10.1017/S0016756807003354.

**Kouchinsky A., Bengtson S., Feng W., Kutugin R., Val'kov A.** The lower Cambrian fossil anabaritids: affinities, occurrences and systematics // *J. Syst. Palaeontol.*, 2009, v. 7, p. 241—298, doi: 10.1017/S1477201909002715.

**Kouchinsky A., Bengtson S., Clausen S., Vendrasco M.J.** An early Cambrian fauna of skeletal fossils from the Emyaksin Formation, northern Siberia // *Acta Palaeontol. Pol.*, 2015, v. 60, p. 421—512, doi: 10.4202/app.2012.0004.

**Kouchinsky A., Bengtson S., Landing E., Steiner M., Vendrasco M., Ziegler K.** Terreneuvian stratigraphy and faunas from the Anabar Uplift, Siberia // *Acta Palaeontol. Pol.*, 2017, v. 62, p. 311—440, doi: 10.4202/app.00289.2016.

**Kouchinsky A., Alexander R., Bengtson S., Bowyer F., Clausen S., Holmer L.E., Kolesnikov K.A., Korovnikov I.V., Pavlov V., Skovsted C.B., Ushatinskaya G., Wood R., Zhuravlev A.Y.** Early–Middle Cambrian stratigraphy and faunas from northern Siberia // *Acta Palaeontol. Pol.*, 2022, v. 67 (2), p. 341—464, doi: 10.4202/app.00930.2021.

**Landing E., Kouchinsky A.** Correlation of the Cambrian Evolutionary Radiation: geochronology, evolutionary stasis of earliest Cambrian (Terreneuvian) small shelly fossil (SSF) taxa, and chronostratigraphic significance // *Geol. Mag.*, 2016, v. 153, p. 750—756, doi: 10.1017/S0016756815001089.

**Landing E., Geyer G., Brasier M.D., Bowring S.A.** Cambrian Evolutionary Radiation: context, correlation, and chronostratigraphy—Overcoming deficiencies of the first appearance datum (FAD) concept // *Earth Sci. Rev.*, 2013, v. 123, p. 133—172, doi: 10.1016/j.earscirev.2013.03.008.

**Li L., Zhang X., Skovsted C.B., Yun H., Pan B., Li G.** Revisiting the molluscan fauna from the Cambrian (Series 2, stages 3–4) Xinji Formation of North China // *Pap. Palaeontol.*, 2021, v. 7 (1), p. 521—564, doi: 10.1002/spp2.1289.

**Linnemann U., Ovtcharova M., Schaltegger U., Gärtner A., Hautmann M., Geyer G., Vickers-Rich P., Rich T., Plessen B., Hofmann M., Zieger J., Krause R., Kriesfeld L., Smith J.** New high-resolution age data from the Ediacaran–Cambrian boundary indicate rapid, ecologically driven onset of the Cambrian explosion // *Terra Nova*, 2019, v. 31, p. 49—58, doi: 10.1111/ter.12368.

**Maloof A.C., Schrag D.P., Crowley J.L., Bowring S.A.** An expanded record of Early Cambrian carbon cycling from the Anti-Atlas Margin, Morocco // *Can. J. Earth Sci.*, 2005, v. 42, p. 2195—2216, doi: 10.1139/e05-062.

**Maloof A.C., Porter S.M., Moore J.L., Dudás F.Ö., Bowring S.A., Higgins J.A., Fike D.A., Eddy M.P.** The earliest Cambrian record of animals and ocean geochemical change // *GSA Bull.*, 2010a, v. 122, p. 1731—1774, doi: 10.1130/B30346.1.

**Maloof A.C., Ramezani J., Bowring S.A., Fike D.A., Porter S.M., Mazouad M.** Constraints on early Cambrian carbon cycling from the duration of the Nemakit-Daldynian–Tommotian boundary  $\delta^{13}\text{C}$  shift, Morocco // *Geology*, 2010b, v. 38, p. 623—626, doi: 10.1130/G30726.1.

**Marusin V.V., Kochnev B.B., Karlova G.A., Nagovitsin K.E.** Resolving Terreneuvian stratigraphy in subtidal–intertidal carbonates: palaeontological and chemostratigraphical evidence from the Turukhansk Uplift, Siberian Platform // *Lethaia*, 2019, v. 52, p. 464—485, doi: 10.1111/let.12325.

**Nagovitsin K.E., Rogov V.I., Marusin V.V., Karlova G.A., Kolesnikov A.V., Bykova N.V., Grazhdankin D.V.** Revised Neoproterozoic and Terreneuvian stratigraphy of the Lena-Anabar Basin and north-western slope of the Olenek Uplift, Siberian Platform // *Precambrian Res.*, 2015, v. 270, p. 226—245, doi: 10.1016/j.precamres.2015.09.012.

**Parkhaev P.Yu., Karlova G.A.** Taxonomic revision and evolution of Cambrian mollusks of the genus *Aldanella* Vostokova, 1962 (Gastropoda: Archaeobranchia) // *Paleontol. J.*, 2011, v. 45 (10), p. 1145—1205, doi: 10.1134/S0031030111100030.

**Parkhaev P.Yu., Karlova G.A., Rozanov A.Yu.** Taxonomy, stratigraphy and biogeography of *Aldanella attleborensis* — a possible candidate for defining the base of Cambrian Stage 2 // *Mus. North. Ariz. Bull.*, 2011, v. 67, p. 298—300.

**Peng S.C., Babcock L.E., Ahlberg P.** The Cambrian Period // *Geologic Time Scale 2020. Vol. 2* / Eds. F.M. Gradstein, J.G. Ogg, M.D. Schmitz, G.M. Ogg. Amsterdam, Elsevier, 2020, p. 565—629, doi: 10.1016/B978-0-12-824360-2.00019-X.

**Pomar L., Kendall C.G.St.C.** Architecture of carbonate platforms: a response to hydrodynamics and evolving ecology // *Controls on Carbonate Platform and Reef Development* / Eds. J. Lukasik, J.A. (Toni) Simo. SEPM Spec. Publ., 2008, v. 89, p. 187—216, doi: 10.2110/pec.08.89.0187.

**Read J.F.** Carbonate platform facies models // *AAPG Bull.*, 1985, v. 69, p. 1—21, doi: 10.1306/AD461B79-16F7-11D7-8645000102C1865D.

**Rowland S.M., Luchinina V.A., Korovnikov I.V., Sipin D.P., Tarletskov A.I., Fedoseev A.V.** Biostratigraphy of the Vendian–Cambrian Sukharikha River section, northwestern Siberian Platform // *Can. J. Earth Sci.*, 1998, v. 35, p. 339—352, doi: 10.1139/cjes-35-4-339.

**Rozanov A.Yu., Sokolov B.S.** Precambrian–Cambrian boundary: recent state of knowledge // *Precambrian Res.*, 1982, v. 17, p. 125—131, doi: 10.1016/0301-9268(82)90051-1.