

ИЗОТОПНАЯ ГЕОХИМИЯ И ГЕОХРОНОЛОГИЯ

УДК 550.93, 552.5

ИСТОЧНИКИ СНОСА КАМЕННОУГОЛЬНО-НИЖНЕМЕЛОВЫХ ТЕРРИГЕННЫХ
ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРО-ВОСТОКА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ:
РЕЗУЛЬТАТЫ Sm-Nd ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
С.В. Малышев¹, А.К. Худoley¹, А.В. Прокопьев², В.Б. Ершова¹, Г.Г. Казакова³, Л.Б. Терентьева⁴

¹ Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета,
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, Россия

² Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, ул. Ленина, 39, Россия

³ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского,
199106, Санкт-Петербург, Средний просп., 74, Россия

⁴ Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2, Россия

Впервые проведены Sm-Nd изотопные исследования обломочных пород каменноугольно-раннемелового возраста северо-восточной окраины Сибирской платформы. Установлена и проинтерпретирована изменчивость изотопного состава осадков в данном временном интервале. Высокие значения $\epsilon_{Nd}(t)$ для каменноугольно-пермских отложений (от -11 до -2) свидетельствуют, что при их накоплении значительный вклад вносили продукты размыва островодужных и ювенильных комплексов, расположенных в каменноугольное время в Таймыро-Североземельском складчато-надвиговом поясе. Положительные значения $\epsilon_{Nd}(t)$ для песчаников триаса указывают на размыв близких по возрасту магматических пород трапповой формации. Верхнеюрские и особенно меловые отложения, формирующие Лено-Анабарский и Приверхоянский прогибы, характеризуются резко отрицательными значениями $\epsilon_{Nd}(t)$ от -15 до -19, указывающими на размыв зрелой континентальной коры. Карбон-триасовые комплексы, входящие в состав Верхоянского складчато-надвигового пояса, имеют более высокие значения $\epsilon_{Nd}(t)$ и не могли быть источником детритового материала для меловых песчаников. Отложения, заполняющие Приверхоянский краевой прогиб, формировались не за счет разрушения растущей к востоку горной системы, а за счет разрушения удаленных и гомогенизированных источников сноса с изотопными характеристиками древней коры. Такими потенциальными питающими провинциями могли быть выступы кристаллического фундамента Сибирской платформы, такие как Алданский щит.

Сибирский континент, Верхоянская пассивная окраина, Приверхоянский прогиб, карбон, пермь, мезозой, ϵ_{Nd} , источники сноса.

SOURCE ROCKS OF CARBONIFEROUS–LOWER CRETACEOUS TERRIGENOUS SEDIMENTS
OF THE NORTHEASTERN SIBERIAN PLATFORM: RESULTS OF Sm–Nd ISOTOPE–GEOCHEMICAL STUDIES

S.V. Malyshev, A.K. Khudoley, A.V. Prokopiev, V.B. Ershova, G.G. Kazakova, and L.B. Terent'eva

The first Sm–Nd isotope studies of the Carboniferous–Early Cretaceous clastic rocks of the northeastern Siberian Platform have been carried out. Variation in the isotope composition of sediments within this time interval has been determined and interpreted. The high $\epsilon_{Nd}(t)$ values for Carboniferous–Permian sediments (from -11 to -2) testify to the large contribution of the products of erosion of island-arc and juvenile complexes localized in the Taimyr–Severnaya Zemlya fold–thrust belt in the Carboniferous. The positive $\epsilon_{Nd}(t)$ values for Triassic sandstones suggest erosion of the coeval igneous rocks of the trap association. The Upper Jurassic and, particularly, Cretaceous sediments of the Lena–Anabar depression and Verkhoyansk foreland basin are characterized by extremely negative $\epsilon_{Nd}(t)$ values (from -15 to -19), which is evidence for erosion of mature continental crust. The Carboniferous–Triassic complexes of the Verkhoyansk fold–thrust belt, which show higher $\epsilon_{Nd}(t)$ values, cannot have been a source of detritus for Cretaceous sandstones. The sediments filling the Verkhoyansk foreland basin accumulated as a result of the decomposition of homogenized distal source rocks with the isotope characteristics of the ancient crust rather than the breakup of the mountain range rising to the east. Salients of the crystalline basement of the Siberian Platform, such as the Aldan Shield, might have been these source provinces.

Carboniferous, Permian, Mesozoic, ϵ_{Nd} , source rocks, Verkhoyansk foreland basin, Verkhoyansk passive margin, Siberian continent

ВВЕДЕНИЕ

Позднепалеозойские и мезозойские осадочные бассейны северо-востока Сибирской платформы представлены терригенными отложениями пассивной окраины и окраинных прогибов. Состав терригенных отложений зависит от многих факторов, среди которых важнейшими являются характеристики источников сноса: состав размываемых пород, их взаимное расположение и удаленность от бассейна осадконакопления. Изменение состава обломочного материала, поступающего в осадочный бассейн, отражает смену палеогеографической обстановки и изменение конфигурации источников сноса, что, в свою очередь, связано с крупными тектоническими событиями, происходящими в регионе. Исследования различных осадочных бассейнов показывают эффективность Sm-Nd метода для определения характеристик источников сноса [Boghossian et al., 1996; Ross et al., 1997, 2005; Подковыров и др., 2007]. В ходе осадочных процессов, таких как эрозия, транспортировка и аккумуляция, редкоземельные элементы (РЗЭ) удерживаются в обломочной фракции в таких же соотношениях, как и в породах-источниках [McLennan et al., 1993, 2003]. Поскольку Sm и Nd являются РЗЭ, изотопные характеристики валовых проб обломочных пород должны отражать средневзвешенные характеристики источников сноса.

Основной задачей настоящей статьи является реконструкция источников сноса каменноугольно-меловых осадочных бассейнов северо-востока Сибирской платформы, основанная на изучении Sm-Nd изотопной системы терригенных пород. Информация об источниках сноса рассматриваемого региона основана главным образом на результатах изучения состава песчаников и, в частности, их тяжелой фракции [Каплан, 1976; Геологическая..., 1983; Государственная..., 2001]. Несмотря на полученный огромный массив данных, их интерпретация нередко затруднительна из-за невозможности идентифицировать тектоническую природу и возраст источника сноса. Результаты U-Pb датирования обломочных цирконов более информативны, но они пока немногочисленны и касаются лишь отдельных фрагментов разреза [Ершова и др., 2013; Прокопьев и др., 2013; Miller et al., 2013; Ershova et al., 2015]. В то же время собранный авторами каменный материал позволяет охарактеризовать весь рассматриваемый в статье терригенный разрез и проследить основные тенденции в эволюции источников сноса.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Отложения верхнего палеозоя и мезозоя на северо-восточной окраине Сибирской платформы изучались в природных обнажениях и скважинах в пределах Оленекского поднятия, Оленекской складчатой зоны, Лено-Анабарского и Приверхоянского прогибов и Верхоянского складчато-надвигового пояса (рис. 1, 2). В пределах Оленекского поднятия распространены платформенные отложения перми и триаса. Они перекрываются отложениями юры и мела, основной областью распространения которых являются прогибы к северу и востоку от Оленекского поднятия. На месте основного осадочного бассейна — Верхоянской пассивной континентальной окраины, в котором происходило накопление отложений карбона—триаса, располагается обрамляющий восточную часть Сибирской платформы одноименный складчато-надвиговой пояс.

Каменноугольная система. Отложения карбона имеют весьма ограниченное распространение на платформе в пределах Оленекского поднятия и широко развиты в северной части Хараулахского хребта (Северное Верхоянье). На Оленекском поднятии известны только карбонатные отложения турнейского и нижней части визейского ярусов. В Хараулахском хребте они представлены мелководными карбонатными отложениями турнейского яруса и перекрывающими их терригенными отложениями верхоянского комплекса. Разрез верхоянского комплекса начинается с фациально изменчивой толщи визейского возраста, в которой по латерали валунные конгломераты замещаются кремнистыми аргиллитами. Они перекрываются алеволитами и аргиллитами, в которых вверх по разрезу начинают появляться слои песчаников. В целом вверх по разрезу происходит постепенное увеличение грубозернистости терригенных пород. Осадконакопление происходило в обстановках шельфа, дельты и подводного конуса выноса [Парфенов, 1984; Государственная..., 2001; Прокопьев и др., 2001, 2013; Ершова и др., 2013]. Общая мощность терригенных каменноугольных отложений оценивается более 2000 м [Государственная..., 2001].

Пермская система*. Пермские отложения в пределах северо-востока Сибирской платформы и Верхоянского складчато-надвигового пояса представляют собой клин, мощность которого увеличивается на север и восток от 70—80 м на Оленекском поднятии до примерно 2365 м в северной части Лено-Анабарского прогиба (Усть-Оленекская скважина) и более 2800 м в хр. Хараулах [Геологическая..., 1983; Прокопьев и др., 2001; Конторович и др., 2013]. В районе Оленекского поднятия нижнепермские отложения несогласно залегают на различных горизонтах нео- и мезопротерозойских и кембрийских

* В настоящей статье мы применяем двухчленное деление пермского периода, поскольку в полевых работах при отборе образцов нами использовались карты с соответствующим делением.

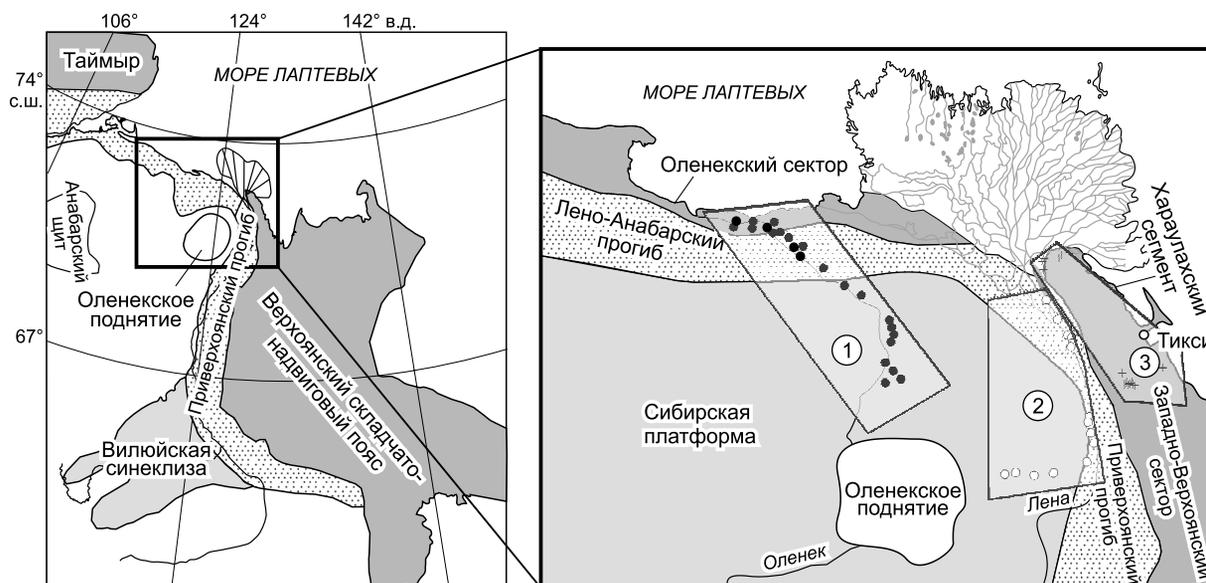


Рис. 1. Региональная схема с районами работ с местами отбора образцов.

1 — Оленекский, 2 — Приленский, 3 — Хараулахский районы. Черными кружками показаны образцы из Оленекского, белыми — из Приленского, крестиками — из Хараулахского районов.

пород, а в Усть-Оленекской скважине — на силурийских породах. На севере Хараулаха они согласно залегают на верхнекаменноугольных слоях, а на юге — на верхнекембрийских карбонатах.

Пермские отложения представлены терригенными породами. В пределах платформы они сложены преимущественно кварц-полевошпатовыми песчаниками с прослоями обломочного материала различной зернистости, от алевролитов и до конгломератов континентального и прибрежно-морского происхождения. В разрезе присутствуют прослои углей, на поверхности песчаников нередко отмечаются волноприбойные знаки. По направлению к краевым частям платформы — в Приверхоанском и Лено-Анабарском прогибах, а также в Северном Верхоянье породы становятся более тонкозернистыми по составу, а обстановки осадконакопления сменяются на шельфовые и дельтовые, более мелководные, чем для каменноугольных отложений. Вверх по разрезу пермские отложения становятся более мелководными и грубозернистыми. Такое строение разреза терригенного комплекса объясняется последовательной проградацией подводных конусов выноса в восточном направлении [Геологическая..., 1983; Парфенов, 1984; Государственная..., 2001; Прокопьев и др., 2001].

Триасовая система. На границе перми и триаса на территории платформы произошло уникальное по своим масштабам излияние базальтов — сибирских траппов. Они распространены преимущественно в пределах Тунгусской синеклизы, а в северо-восточной части платформы эффузивные траппы основного состава широко распространены южнее Оленекского поднятия [Государственная..., 2013б]. Триасовые отложения развиты по всей изучаемой площади, и их мощность быстро возрастает в северо-восточном направлении от примерно 150 м на склоне Оленекского поднятия до 800 м на северном крыле Лено-Анабарского прогиба и 2000 м в Северном Верхоянье [Геологическая..., 1983; Дагис, Казаков, 1984; Государственная..., 2001; Прокопьев и др., 2001; Казаков и др., 2002].

Триасовые отложения залегают со стратиграфическим несогласием на пермских отложениях, и в ходе их осадконакопления отмечается несколько периодов трансгрессий и регрессий, отразившихся в полноте стратиграфического разреза и составе осадков [Дагис, Казаков, 1984; Казаков и др., 2002]. Осадконакопление происходило преимущественно в обстановках шельфа и дельты. В западной части изучаемого района в конце среднего триаса морские обстановки начинают сменяться на континентальные. За исключением маркирующего горизонта известняков оленекского яруса, породы имеют терригенный состав с примесью туфогенного материала или продуктов размыва магматических пород основного состава. В Лено-Анабарском прогибе индские слои сохранились в основном во впадинах, на поднятиях же триасовый разрез начинается с образований оленекского яруса. Отложения среднего триаса распространены в северном крыле Лено-Анабарского прогиба и вдоль границы складчато-надвиговых сооружений Северного Верхоянья и Приверхоанского прогиба, а на платформе отсутствуют. Отложения верхнего триаса залегают на подстилающих слоях с размывом. В полном объеме они распростране-

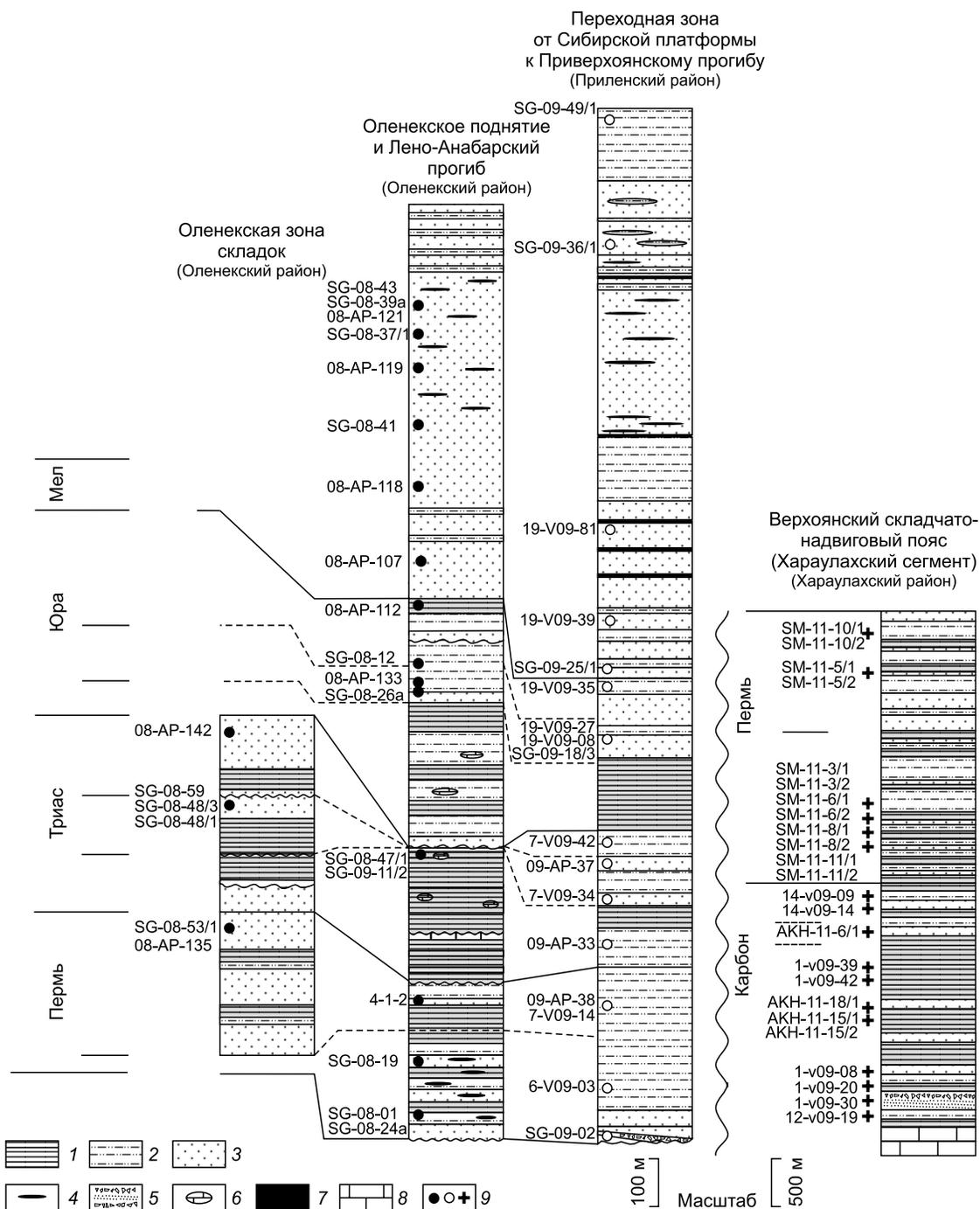


Рис. 2. Упрощенная схема корреляции сводных разрезов, составленных по естественным обнажениям, с точками отбора образцов.

Обозначения образцов см. на рис. 1. Составлена по данным [Капкан, 1976; Геологическая..., 1983; Дагис, Казаков, 1984; Государственная..., 2001; Прокопьев и др., 2001; Казаков и др., 2002] с упрощением. 1 — аргиллиты, 2 — алевролиты, 3 — песчаники, 4 — линзы, 5 — конгломераты, 6 — карбонатные конкреции, 7 — угли, 8 — карбонаты, 9 — образцы.

ны лишь в Оленекской зоне складок, тогда как в районе Оленекского поднятия и в Приверхоянском прогибе сохранились лишь морские отложения карнийского яруса.

Юрская система. Юрские отложения представлены терригенными породами и трансгрессивно залегают на породах триаса, верхнего палеозоя и кембрия. Наиболее верхние горизонты юрского разреза участвуют в строении Приверхоянского и Лено-Анабарского прогибов, в центральной части которых они перекрыты меловыми отложениями. Глинистые отложения байоса перекрываются дельтовыми пес-

чанистыми и алевроитопесчанистыми образованиями бата—начала келловей. Келловейские отложения представлены аргиллитами и алевролитами в северной части Лено-Анабарского прогиба и песчаниками на его южном крыле. Отложения оксфордского и кимериджского ярусов отсутствуют в приплатформенной части, что объясняется их размывом во время предволжского перерыва. В Приверхоянском прогибе оксфорд и кимеридж представлены маломощными пачками мелкозернистых песчаников и алевролитов. Отложения волжского яруса представлены морскими глинисто-алевролитовыми и алевролитопесчанистыми образованиями. Общая мощность юрских отложений в Лено-Анабарском прогибе и платформенном крыле Приверхоянского прогиба составляет около 1000 м, а в Приверхоянском прогибе увеличивается как минимум в 2 раза [Геологическая..., 1983; Князев и др., 1991; Шурыгин и др., 2000; Государственная..., 2001; Прокопьев и др., 2001; Рогов и др., 2011].

Меловая система. Меловые отложения выполняют центральную часть Лено-Анабарского прогиба и Приверхоянский краевой прогиб. Мощность их максимальна (до 4500 м) вблизи фронта Верхоянского складчато-надвигового пояса и быстро уменьшается (до нескольких сотен метров) в сторону платформы. Нижнемеловые отложения представлены морскими, прибрежно-морскими и континентальными фациями. Смена морских отложений на континентальные на изучаемой территории произошла в валанжине [Девятков и др., 2011]. В Приверхоянском прогибе континентальные отложения представлены чередованием двух типов пород. Первый тип представлен последовательностью амальгамированных каналов [Ershova et al., 2010], сложенных аркозовыми песчаниками средне- и крупнозернистыми, белыми до светло-серых. Для второго типа характерны глины и алевролиты с редкими прослоями и линзами песчаников, представляющие собой отложения отмерших русел, кривосовых глифов и болот [Ershova et al., 2010]. Наличие верхнемеловых отложений дискуссионно, возможно, они присутствуют в центральной части Лено-Анабарского прогиба и представлены континентальными грубозернистыми песчаниками с прослоями углей [Геологическая..., 1983; Государственная..., 2001; Прокопьев и др., 2001; Khudoley, Prokoriev, 2007].

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основной задачей нашего исследования была реконструкция источников сноса терригенных толщ нескольких структурно-формационных зон северо-востока Сибирской платформы: Оленекской зоны складок, Лено-Анабарского прогиба, Приверхоянского прогиба, северной части Верхоянского складчато-надвигового пояса и платформенного чехла. Для Sm-Nd изотопно-геохимических исследований использованы представительные образцы терригенных пород каменноугольно-мелового возраста. Всего было проанализировано 66 образцов, и для удобства последующего описания результатов мы разделили исследуемую территорию на три района по географическому признаку: Оленекский, Приленский и Хараулахский районы. Из Оленекского и Приленского районов были изучены образцы пермско-раннемелового возраста, а из Хараулахского — каменноугольно-пермского (см. рис. 1).

Определения содержания и изотопных составов Sm и Nd выполнены в ИГГД РАН (Санкт-Петербург) на многоколлекторном масс-спектрометре TRITON TI в статическом режиме. Измеренные отношения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ скорректированы на изотопное фракционирование по отношению $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ и приведены к отношению $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512117$ в Nd стандарте JNdi-1. Уровень холостого опыта за время исследований составил 0.03—0.2 нг для Sm, 0.1—0.5 нг для Nd. Точность определения концентраций Sm и Nd составила $\pm 0.5\%$ (2σ), изотопных отношений $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ — $\pm 0.5\%$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ — $\pm 0.005\%$; $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ рассчитано с использованием современных значений $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512638$ и $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1967$ в хондритовом резервуаре CHUR [Jacobsen, Wasserburg, 1984]. Содержания тория и скандия определялись в центральной лаборатории ВСЕГЕИ методом ICP-MS.

Sm-Nd ИЗОТОПНАЯ СИСТЕМАТИКА ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД

Интерпретация Sm-Nd данных для осадочных пород. Самарий и неодим принадлежат к группе РЗЭ и являются членами ряда радиоактивного распада. Радиоактивный изотоп ^{147}Sm распадается в ^{143}Nd согласно формуле:

$$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_0 + (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})(e^{\lambda t} - 1),$$

где изотоп ^{144}Nd является стабильным, а отношение $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_0$ соответствует первоначальному изотопному составу неодима в момент кристаллизации породы. Отношение $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (радиогенного к стабильному) может меняться только за счет процесса радиоактивного распада и является устойчивым к геологическим процессам, происходящим в земной коре.

РЗЭ, за исключением церия и европия, имеют одинаковую валентность и небольшие различия ионных радиусов, что обуславливает их схожие геохимические свойства. Тем не менее небольшая разница ионных радиусов Sm и Nd ($\text{Sm} = 1.04 \text{ \AA}$, $\text{Nd} = 1.08 \text{ \AA}$) достаточна для фракционирования пары

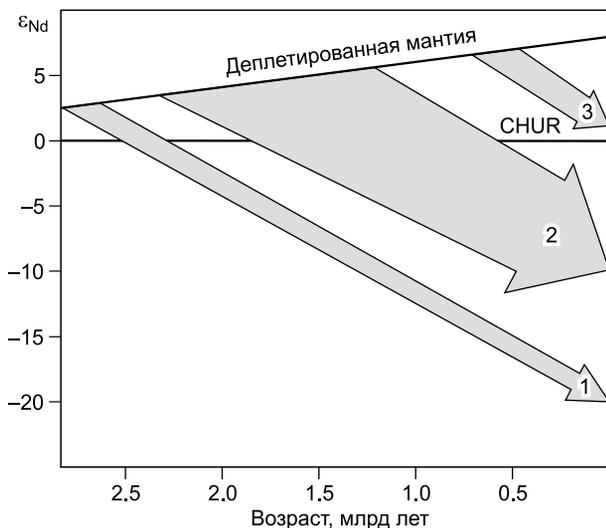


Рис. 3. Схематическая диаграмма ϵ_{Nd} —возраст, иллюстрирующая простейшие примеры интерпретации Sm-Nd возраста источников сноса.

Образец № 1 имеет очень низкое значение параметра ϵ_{Nd} , что соответствует изотопному составу архейской коры. Образцы, попадающие в поле № 2 с ϵ_{Nd} приблизительно от -12 до -5 , сложены продуктами размыва протерозойских источников. Изотопный состав обр. № 3 соответствует ювенильным источникам сноса. Важно отметить, что изотопный состав поля № 2 может соответствовать смешению архейских и ювенильных источников. Эффект смешения компонентов может сильно затруднить интерпретацию изотопных данных осадочных пород [Ross et al., 1997].

См/Nd в процессах частичного плавления и кристаллизации. При частичном плавлении образуются магмы с более низкими отношениями Sm/Nd по сравнению с исходным резервуаром, и, соответственно, породы, образующиеся из таких магм, имеют более низкие отношения $^{143}Nd/^{144}Nd$. Ободененные области резервуара, оставшиеся после удаления частичных расплавов, имеют более высокие отношения Sm/Nd и, соответственно, более высокие отношения $^{143}Nd/^{144}Nd$. Различная магматическая история и возраст магматических пород обуславливают вариации изотопных отношений $^{143}Nd/^{144}Nd$ в земной коре. На рис. 3 показана схематическая диаграмма интерпретации неодимовых данных для осадочных пород. Для интерпретации Sm-Nd данных принято использовать параметр $\epsilon_{Nd}(t)$, показывающий отличие изотопного отношения $^{143}Nd/^{144}Nd$ в образце от резервуара CHUR на определенный момент времени, или $\epsilon_{Nd}(0)$, показывающий отличие изотопного отношения $^{143}Nd/^{144}Nd$ в образце от резервуара CHUR в настоящее время [DePaolo, Wasserburg, 1976; Jacobsen, Wasserburg, 1984].

Многочисленные исследования, обобщенные в работах С.Р. Тейлора и С.М. МакЛеннана [Тейлор, МакЛеннан, 1988; McLennan et al., 1993, 2003], показывают, что РЗЭ не подвержены изменениям при метаморфических и осадочных (выветривании, переносе, отложении и диагенезе) процессах. Следовательно, изотопный состав неодима в осадочной породе соответствует изотопному составу источников. Учитывая короткое в геологическом смысле время пребывания Sm и Nd в воде (около 400 лет [Banner, 2004]), на изотопный состав осадков одного бассейна влияют только локальные источники сноса, либо удаленные, продукты разрушения которых доставляются в бассейн посредством речных систем. На рис. 4 показаны вариации изотопного состава воды современных океанов в зависимости от их питающих провинций. Также изотопный состав осадочных последовательностей может меняться во времени в зависимости от появления новых источников сноса. На примере фанерозойских сланцев (рис. 5) предгорного прогиба Французских Альп видно, что мантийный компонент этих пород добавлялся в ходе орогенных событий [Michard et al., 1985], т. е. в ходе орогенных эпизодов появляются источники сноса с мантийным составом Nd, что и вызывает увеличение отношения $^{143}Nd/^{144}Nd$.

Результаты. Результаты Sm-Nd изотопно-геохимических исследований каменноугольно-нижнемеловых терригенных пород просуммированы в табл. 1—3. Значения $\epsilon_{Nd}(t)$ для исследуемых образцов терригенных пород и для возможных источников сноса представлены на рис. 6 и 7.

Рис. 4. Изотопные вариации Nd в современных океанах [Banner, 2004].

1 — Гудзонов залив, 2 — море Баффина, 3 — Атлантический океан, 4 — пролив Дрейка, 5 — Тихий океан. Поступление мантийного Nd в Тихий океан вместе с вулканическими породами Тихоокеанского кольца приводит к увеличению в нем ϵ_{Nd} по отношению к Атлантическому океану. Значения ϵ_{Nd} в проливе Дрейка отражают смешение вод Тихого и Атлантического океанов. Низкие значения ϵ_{Nd} в Гудзоновом заливе и море Баффина указывают на локальные древние источники.

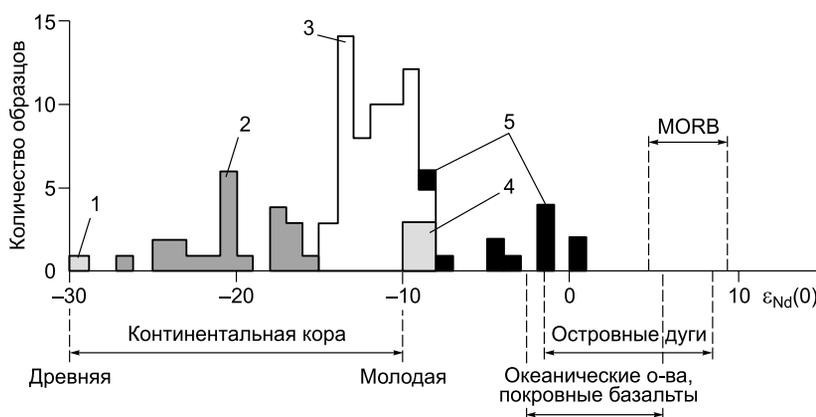
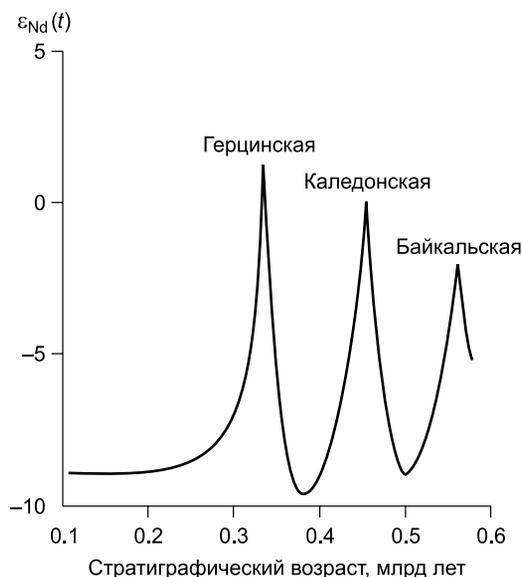


Рис. 5. Значения ϵ_{Nd} для осадочных пород предгорья Французских Альп [Michard et al., 1985].

Орогенные события (герцинская, каледонская и байкальская складчатость) коррелируются с увеличенными значениями ϵ_{Nd} , тогда как значения ϵ_{Nd} в неорогенное время составляют в среднем -10 . Это связано с тем, что во время орогенных событий в области размыва оказывались породы мантийного происхождения.



Проанализированные образцы каменноугольного возраста были отобраны в северной и южной частях Хараулахского района. Sm-Nd изотопные характеристики образцов из северной части имеют широкий спектр значений $\epsilon_{Nd}(t)$ от -10.4 до -1.3 , в то время как значения $\epsilon_{Nd}(t)$ для четырех образцов из южной части района лежат в узком интервале от -3.6 до -2.2 . Пермские образцы имеют более однородный изотопный состав неодима со значениями $\epsilon_{Nd}(t)$, лежащими в интервале от -6 до -3 , за исключением двух образцов с более отрицательными значениями (-12 и -11).

Триасовые образцы из Оленекского и Приленского районов имеют схожие значения $\epsilon_{Nd}(t)$ с вариациями в пределах от -6 до $+1$. Увеличение значений $\epsilon_{Nd}(t)$ в триасе, вероятно, связано с добавлением продуктов размыва более ювенильного вещества в осадочный бассейн. В осадках юрского возраста наблюдается широкий спектр значений $\epsilon_{Nd}(t)$ от -12 до -2 . В течение юры значения $\epsilon_{Nd}(t)$ постепенно снижаются в область коровых значений, что указывает на смену источников сноса. Влияние различных источников сноса на разные части бассейна в юре демонстрирует разница в значениях $\epsilon_{Nd}(t)$ для юрских

Таблица 1. Результаты Sm-Nd изотопно-геохимических исследований терригенных образцов Хараулахского района

Номер образца	Тип породы	Стратиграфический возраст	Возраст, млн лет	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon_{Nd}(0)$	$\epsilon_{Nd}(t)$	Th	Sc
				г/г						г/г	
Карбон											
АКН-11-15/1	Аргиллит	C ₁₋₂	340	6.02	33.97	0.1072	0.512325 ± 1	-6.1	-2.2	12.8	9.6
АКН-11-15/2	Песчаник	C ₁₋₂	340	6.19	33.82	0.1106	0.512260 ± 3	-7.4	-3.6	9.9	5.9
АКН-11-18/1	Аргиллит	C ₁₋₂	340	5.81	35.79	0.0981	0.512304 ± 2	-6.5	-2.2	12.2	13.0
АКН-11-06/1	»	C ₂₋₃	320	6.59	34.62	0.1150	0.512334 ± 2	-5.9	-2.6	10.9	12.1
1-в09-08	Песчаник	C _{1v}	330	4.14	19.29	0.1297	0.512142 ± 4	-9.7	-6.8	5.6	5.8
1-в09-20	Аргиллит	C _{1v}	330	5.20	24.15	0.1300	0.512425 ± 3	-4.2	-1.3	2.9	6.3
1-в09-30	Песчаник	C _{1v}	330	2.48	12.27	0.1220	0.512188 ± 3	-8.8	-5.6	3.4	4.1
1-в09-39	Аргиллит	C ₁₋₂	330	4.73	22.56	0.1267	0.512022 ± 2	-12.0	-9.1	9.4	16.1
1-в09-42	Алевролит	C ₁₋₂	330	6.49	26.31	0.1491	0.512080 ± 2	-10.9	-8.9	5.5	7.6
12-в09-19	Аргиллит	C _{1v}	330	3.92	19.31	0.1227	0.512299 ± 3	-6.6	-3.5	4.0	10.3
14-в09-09	Алевролит	C ₂₋₃	310	5.92	32.53	0.1099	0.511928 ± 5	-13.9	-10.4	8.6	9.6
14-в09-14	Песчаник	C ₂₋₃	310	6.91	32.51	0.1286	0.512092 ± 3	-10.7	-8.0	7.1	7.5
Пермь											
SM-11-03/1	Аргиллит	P ₁	275	6.39	33.84	0.1141	0.512337 ± 1	-5.9	-3.0	12.0	11.2
SM-11-03/2	Песчаник	P ₁	275	6.01	31.59	0.1151	0.512315 ± 1	-6.3	-3.4	11.4	7.2
SM-11-06/1	Аргиллит	P ₁	275	6.49	32.98	0.1191	0.512356 ± 2	-5.5	-2.8	11.1	12.6
SM-11-06/2	Песчаник	P ₁	275	5.00	24.69	0.1225	0.512336 ± 3	-5.9	-3.3	8.7	9.2
SM-11-11/1	Аргиллит	P ₁	275	4.96	22.77	0.1377	0.512370 ± 3	-5.2	-3.0	12.2	9.1
SM-11-11/2	Песчаник	P ₁	275	4.89	23.98	0.1233	0.512351 ± 2	-5.6	-3.0	9.4	5.0
SM-11-05/1	Аргиллит	P ₂	260	4.93	23.63	0.1260	0.512375 ± 2	-5.1	-2.8	7.1	8.8
SM-11-05/2	Песчаник	P ₂	260	3.25	17.66	0.1112	0.512313 ± 2	-6.3	-3.5	5.0	4.5
SM-11-10/1	Аргиллит	P ₂	250	6.87	36.38	0.1142	0.512342 ± 3	-5.8	-3.2	10.8	16.5
SM-11-10/2	Песчаник	P ₂	250	4.51	22.61	0.1206	0.512345 ± 3	-5.7	-3.3	7.6	9.2

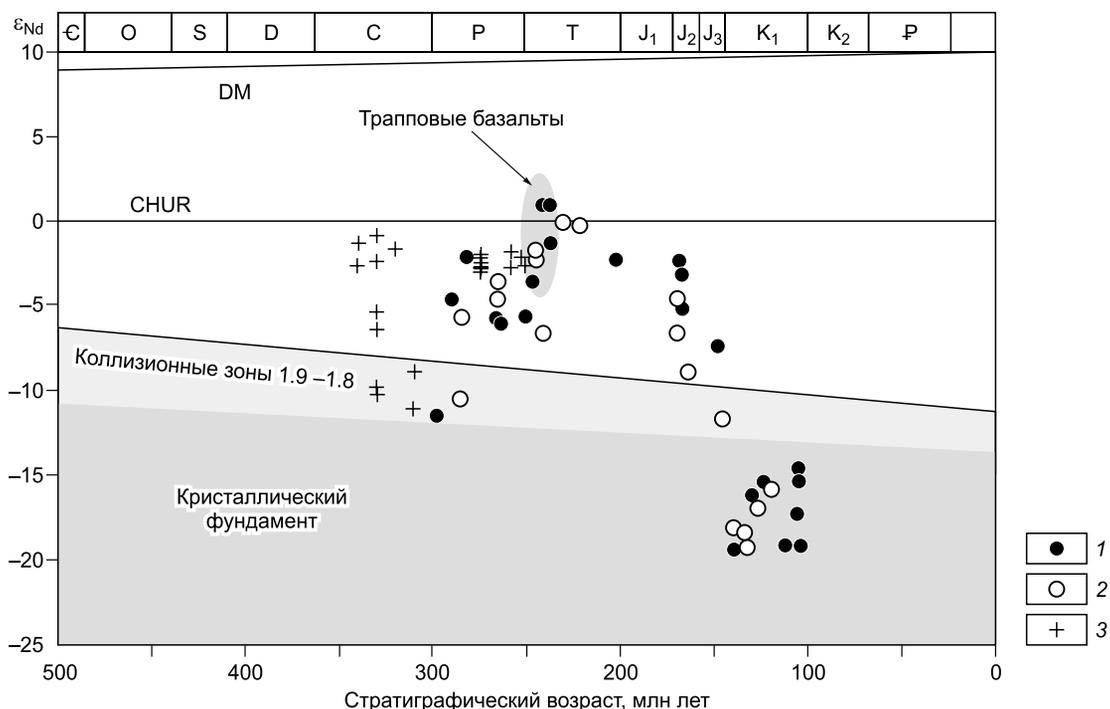


Рис. 6. Диаграмма эволюции ϵ_{Nd} для терригенных образцов каменноугольно-нижнемелового возраста.

1 — образцы из Оленекского района, 2 — образцы из Приленского района, 3 — образцы из Хараулахского района. Поле значений для кристаллического фундамента и протерозойской коры построено по [Ковач и др., 2000; Розен и др., 2006; Глебовицкий и др., 2008]; поле значений для трапповых базальтов построено по [GEOROC; Lightfoot et al., 1993].

образцов из Оленекского и Приленского районов. Меловые песчаники Оленекского и Приленского районов имеют однородные изотопные характеристики с коровыми значениями $\epsilon_{Nd}(t)$, лежащими в пределах от -15 до -19 .

На диаграмме $\epsilon_{Nd}(t)$ —Th/Sc (см. рис. 7) точки, соответствующие меловым образцам, выделяются в отдельную группу с пониженными значениями $\epsilon_{Nd}(t)$ и отношением Th/Sc в районе 1.0, что соответствует характеристикам древней коры. Фигуративные точки образцов каменноугольно-юрского возраста расположены вдоль линии смещения островодужных комплексов и верхнекоровых источников сноса. Среди них можно выделить точки, соответствующие триасовым породам, расположение которых на диаграмме смещено в сторону основных источников по обоим показателям ($\epsilon_{Nd}(t)$ и Th/Sc) относительно других точек. Пермские и, в меньшей степени, каменноугольные и юрские образцы занимают на диаграмме более широкую область со смещением в сторону кислой компоненты (по оси Th/Sc), что указывает на довольно гетерогенный источник сноса с участием как более кислых пород, так и ювенильного вещества.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Возможные источники сноса: Сибирская платформа и окружающие ее орогены. Большая часть фундамента северной части Сибирской платформы представлена архейской корой, переработанной во время палеопротерозойских тектонических событий, когда в результате коллизии был сформирован фундамент Сибирской платформы [Смелов и др., 2001; Розен и др., 2006; Smelov, Timofeev, 2007; Глебовицкий и др., 2008]. Фундамент Сибирской платформы имеет палеопротерозойские и архейские модельные возрасты (T_{DM}) при преобладании архейских возрастов и значения $\epsilon_{Nd}(0)$ от -16 и ниже, преимущественно ниже -25 [Ковач и др., 2000; Смелов и др., 2001, 2012; Розен и др., 2006; Молчанов и др., 2011; Гусев и др., 2013]. Терригенные осадочные комплексы мезопротерозойского возраста имеют схожие характеристики с породами фундамента и характеризуются значениями $\epsilon_{Nd}(0)$ от -25 и ниже и архейскими модельными возрастами T_{DM} [Купцова и др., 2011; Khudoley et al., 2015]. Выше лежащие мезо-, неопротерозойские и нижнепалеозойские платформенные отложения, вплоть до каменноугольных толщ, сложены преимущественно карбонатами. В качестве источника обломочного материала мо-

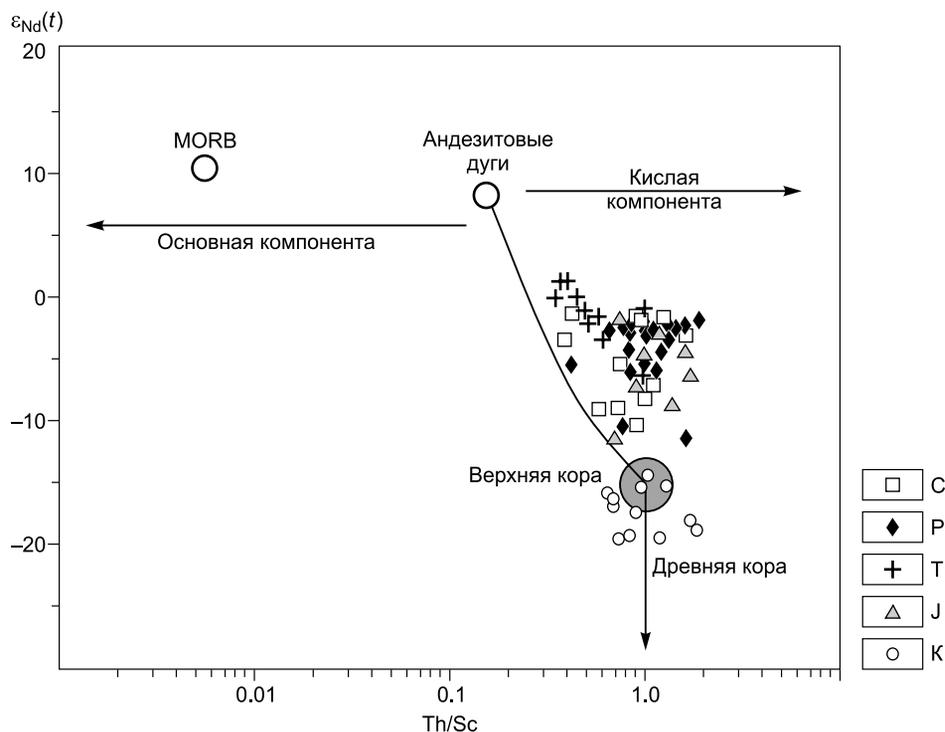


Рис. 7. Диаграмма $\epsilon_{Nd}(t)$ —Th/Sc для изученных образцов [McLennan et al., 1993].

Серый круг соответствует усредненному составу верхней коры.

гут выступать широко распространенные в западной части платформы сибирские траппы, Sm-Nd изотопные характеристики которых изучены довольно хорошо и показывают значения $\epsilon_{Nd}(t)$ на возраст 250 млн лет от -10 до $+8$ с пиком значений в районе $0 \dots +2$ [Lightfoot et al., 1993; GEOROC].

Изотопные Sm-Nd характеристики комплексов из обрамляющих складчато-надвиговых поясов изучались непоследовательно, но тем не менее в нашем распоряжении имеются некоторые данные. Таймырско-Североземельский является наиболее близким к области исследований складчато-надвиговым поясом и в его составе, включая Карский террейн, присутствуют неопротерозойские ювенильные породы, а также магматические комплексы кислого, основного и щелочного составов, возраст которых варьирует от неопротерозоя до триаса, продукты их размытия могут присутствовать в верхнепалеозойских и мезозойских терригенных комплексах в соседних регионах [Верниковский, 1996; Vernikovskiy et al., 2003; Государственная..., 2013а; Проскурнин и др., 2014]. Имеющиеся данные о Sm-Nd характеристиках потенциальных источников сводятся к следующему: неопротерозойские граниты имеют значения $\epsilon_{Nd}(0)$ от -14 до -7.7 [Верниковский, 1996; Верниковская и др., 2002], позднепермские и раннетриасовые постколлизийные граниты от -8 до $+2$ [Vernikovskiy et al., 2003], а неопротерозойские плагиограниты имеют значения $\epsilon_{Nd}(0)$ от -5.6 до $+1.2$ [Верниковский, 1996].

Sm-Nd характеристики некоторых комплексов юго-западной окраины Сибирской платформы показывают широкий спектр значений ϵ_{Nd} . Например, неопротерозойские граниты Енисейского кряжа имеют значения $\epsilon_{Nd}(0)$ от -15 до -10 [Vernikovskiy et al., 2007], а щелочные магматические комплексы от -6 до $+1$ [Романова и др., 2012]. Значительные вариации величин ϵ_{Nd} , вплоть до появления близких к мантийным значениям, фиксируются также в Забайкалье и более западных частях Центрально-Азиатского складчатого пояса, также возможных источниках сноса обломочного материала [Рыцк и др., 2007; Дегтярев, 2012; Kögner et al., 2014].

Таким образом, складчатые пояса, обрамляющие Сибирскую платформу, имеют довольно пестрый Nd изотопный состав со значениями $\epsilon_{Nd}(0)$, лежащими преимущественно в пределах от -10 до $+2$. В случаях распространения в области сноса древней коры значения эpsilon могут понижаться и, в свою очередь, при наличии офиолитов могут резко повышаться.

Области сноса каменноугольных терригенных пород. Полученные Sm-Nd изотопные данные для каменноугольных образцов показывают неоднородное распределение значений $\epsilon_{Nd}(t)$ по территории и во времени.

Две группы образцов каменноугольного возраста из Хараулахского района (см. табл. 1, рис. 6, рис. 8, а) имеют различные изотопные характеристики. Для северной части района характерен широкий

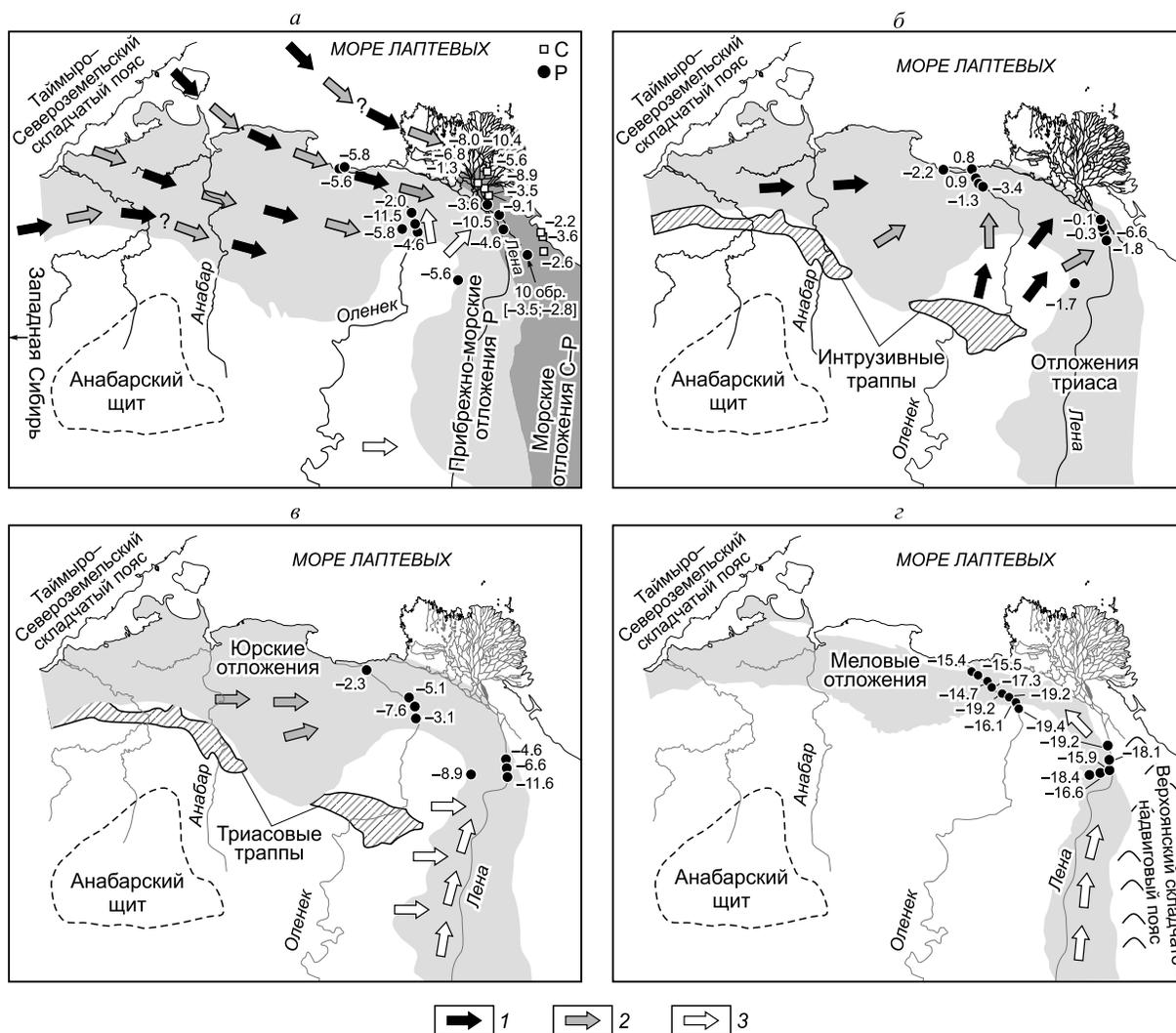


Рис. 8. Упрощенная схема современного распространения исследованных осадочных комплексов на территории северо-востока Сибирской платформы и прилегающих складчатых поясов.

Стрелками указаны генерализованные направления транспортировки обломочного (1 — островодужного и ювенильного, 2 — смешанного/неопределенного, 3 — корового) материала: а — для каменноугольного и пермского периодов, б — для триасового периода, в — для юрского периода, г — для мелового периода.

спектр значений $\epsilon_{Nd}(t)$, тогда как в более южной и более удаленной от края платформы части Хараулахского антиклинария породы имеют однородный изотопный состав с довольно высокими величинами $\epsilon_{Nd}(t)$, варьирующими от -3.6 до -2.2 и фиксирующими наличие в области сноса как островодужных комплексов, включая ювенильные, так и зрелой континентальной коры (см. рис. 7). Судя по закономерностям в изменении состава и обстановок осадконакопления каменноугольных пород, на северо-востоке и востоке от изучаемого региона располагался морской бассейн, и снос обломочного материала не мог происходить с востока [Прокопьев и др., 2013]. В то же время, как следует из изучения возрастов обломочных цирконов из этих же осадочных комплексов, значительная часть обломочного материала поступала со стороны Таймыро-Североземельского складчато-надвигового пояса [Ershova и др., 2013; Прокопьев и др., 2013; Ershova et al., 2015], откуда, вероятно, переносились и продукты размыва островодужных и ювенильных пород (см. рис. 8, а). Осадконакопление в обстановке подводного конуса выноса на удалении от области сноса способствовало гомогенизации изотопного состава. Группа образцов из северной части Хараулахского района находилась ближе к расположенному на Таймыре источнику обломочного материала, на что указывает и менее однородный изотопный состав терригенных пород (см. рис. 8, а). Областью сноса с широким развитием зрелой континентальной коры являлся, скорее всего, фундамент Сибирской платформы, о чем свидетельствуют и данные датирования обломочных цирконов [Ershova и др., 2013; Прокопьев и др., 2013; Ershova et al., 2015]. Единичные, сравнительно

низкие значения $\epsilon_{Nd}(t)$ в исследованных породах каменноугольного возраста вплоть до -10.4 могут быть связаны с увеличением роли локальных источников обломочного материала со зрелой корой, прежде всего, Оленекского поднятия.

Области сноса пермских терригенных пород. В пермских отложениях изотопный состав песчаников и аргиллитов варьирует в тех же пределах, что и в каменноугольных (значения $\epsilon_{Nd}(t)$ от -11.5 до -2.0 , см. рис. 6, табл. 1—3), указывая на смесь островодужных и/или ювенильных и коровых источников сноса. Как и для каменноугольных пород, среди пермских образцов наиболее однородные изотопные характеристики отмечены в разрезе удаленной от края платформы внутренней части Хараулахского антиклинория, где для 10 образцов из нижней и верхней перми значения $\epsilon_{Nd}(t)$ варьируют лишь от -3.5 до -2.8 (см. рис. 6, 8, а; табл. 1). В пределах Приленского и Оленекского районов величины $\epsilon_{Nd}(t)$ варьируют от -10.6 до -3.6 и от -11.5 до -2.0 соответственно, фиксируя уменьшение однородности изотопных характеристик терригенных пород в западном направлении (см. рис. 8, а; табл. 2, 3).

Как и в каменноугольное время, областью сноса с широким развитием зрелой континентальной коры являлся фундамент Сибирской платформы. Тем не менее, несмотря на сходство изотопных характеристик терригенных комплексов карбона и перми, вопрос о происхождении пород с относительно высокими значениями $\epsilon_{Nd}(t)$ в пермских разрезах не имеет очевидного решения. Появление в бассейне р. Оленек образца с величиной $\epsilon_{Nd}(t) -2.0$ рядом с образцом, в котором $\epsilon_{Nd}(t)$ составляет -11.5 , связано с неизвестными локальными источниками с широким развитием магматических пород основного состава (см. рис. 8, а). Судя по изменению фаций и мощностей, морской бассейн располагался как к востоку, так и северу от северо-восточной окраины Сибирской платформы [Государственная..., 2001, 2013а,б; Конторович и др., 2013], что делает маловероятным расположение области сноса как к востоку, так и северу от нее. Закономерное изменение изотопных характеристик терригенных толщ перми указывает на снос с запада, и это могли быть как западная часть Таймыро-Североземельского складчато-надвигового пояса, так и складчато-надвиговые пояса фундамента Западной Сибири или юго-западного и южного обрамления Сибирской платформы. Если источниками сноса выступали складчато-надвиговые пояса фундамента Западной Сибири и/или юго-западного и южного обрамления Сибирской платформы, то транспортировка обломочного материала требует наличия разветвленной речной сети, существование которой уже предполагалось на основании изучения возрастов обломочных цирконов [Prokoriev et al.,

Таблица 2. Результаты Sm-Nd изотопно-геохимических исследований терригенных образцов Приленского района

Номер образца	Тип породы	Стратиграфический возраст	Возраст, млн лет	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon_{Nd}(0)$	$\epsilon_{Nd}(t)$	Th	Sc
				г/г						г/г	
Пермь											
SG-09-02	Песчаник	P ₁	285	3.87	26.79	0.0874	0.512145 ± 5	-9.6	-5.6	5.9	6.0
6-V09-03	»	P ₁	285	4.05	29.99	0.0816	0.511883 ± 6	-14.7	-10.6	7.9	6.4
09-AP-38	»	P ₂	265	3.00	20.32	0.0846	0.512276 ± 6	-7.3	-3.6	5.3	4.1
7-09V-14	Аргиллит	P ₂	265	5.60	42.46	0.0798	0.512200 ± 3	-8.5	-4.6	10.9	13.2
Триас											
SG-09-11/2	Песчаник	T _{1ol}	247	2.78	16.76	0.1002	0.512394 ± 5	-4.8	-1.7	4.2	8.9
09-AP-33	»	T _{1ol}	247	4.01	26.31	0.0921	0.512375 ± 3	-5.1	-1.8	6.9	12.1
7-V09-34	»	T _{2an}	241	6.48	48.45	0.0808	0.512117 ± 2	-10.2	-6.6	13.6	13.8
09-AP-37	»	T _{3k}	231	3.73	21.94	0.1029	0.512489 ± 3	-2.9	-0.1	6.7	8.3
7-V09-42	Аргиллит	T _{3k}	222	4.11	26.11	0.0951	0.512475 ± 4	-3.2	-0.3	5.8	16.5
Юра											
19-V09-08	Песчаник	J _{2bt}	169	3.39	24.19	0.0846	0.512276 ± 3	-7.1	-4.6	8.4	5.2
19-V09-27	»	J _{2bt}	169	4.23	31.43	0.0813	0.512174 ± 4	-9.1	-6.6	10.5	6.2
SG-09-18/3	»	J _{2kl}	163	3.66	26.86	0.0824	0.512061 ± 3	-11.3	-8.9	7.5	5.5
19-V09-35	Аргиллит	J _{3t}	145	4.52	36.98	0.0739	0.511928 ± 2	-13.8	-11.6	12.6	18.0
Мел											
19-V09-39	Песчаник	K _{1b}	140	4.15	32.20	0.0779	0.511602 ± 4	-20.2	-18.1	10.1	5.9
SG-09-25/1	»	K _{1v-h}	134	4.93	42.51	0.0701	0.511586 ± 4	-20.5	-18.4	12.8	7.2
19-V09-81	»	K _{1h}	132	3.26	22.17	0.0888	0.512560 ± 5	-21.0	-19.2	4.9	6.5
SG-09-36/1	»	K _{1ap}	125	2.87	20.02	0.0866	0.511696 ± 3	-18.4	-16.6	3.8	5.5
SG-09-49/1	»	K _{1ap}	119	2.55	17.31	0.0890	0.511739 ± 4	-17.5	-15.9	3.6	5.5

Таблица 3.

Результаты Sm-Nd изотопно-геохимических исследований терригенных образцов Оленекского района

Номер образца	Тип породы	Стратиграфический возраст	Возраст, млн лет	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	Th	Sc
				г/г						г/г	
Пермь											
SG-08-24a	Песчаник	P ₁	299	7.07	1.29	0.1098	0.511880 ± 5	-14.8	-11.5	5.8	3.6
SG-08-01	»	P ₁	290	4.36	25.77	0.1022	0.512222 ± 4	-8.1	-4.6	7.2	6.0
SG-08-19	»	P ₁	275	4.15	22.72	0.1104	0.512379 ± 2	-5.0	-2.0	6.8	6.9
08-AP-135	»	P ₂	270	3.68	17.98	0.1237	0.512213 ± 2	-8.3	-5.8	5.7	6.7
4-1-2	»	P ₂	265	4.20	22.53	0.1126	0.512192 ± 2	-8.7	-5.8	5.9	5.9
SG-08-53/1	»	P ₂	251	4.39	24.78	0.1070	0.512204 ± 5	-8.5	-5.6	2.6	6.1
Триас											
SG-08-47/1	Песчаник	T ₁	248	4.67	23.60	0.1195	0.512335 ± 5	-5.9	-3.5	8.3	13.2
SG-08-48/1	»	T ₂	240	6.82	31.02	0.1328	0.512582 ± 3	-1.1	0.9	7.6	19.8
SG-08-48/3	»	T ₂	237	4.82	23.70	0.1229	0.512458 ± 3	-3.5	-1.3	7.6	7.7
SG-08-59	»	T ₂	237	1.68	10.46	0.0973	0.512526 ± 3	-2.2	0.8	1.8	4.5
08-AP-142	»	T _{3г}	200	7.81	36.41	0.1296	0.512434 ± 3	-4.0	-2.2	9.7	19.1
Юра											
08-AP-133	Песчаник	J ₂ bj-bt	168	5.53	28.50	0.1173	0.512432 ± 3	-4.0	-2.3	8.8	12.0
SG-08-26a	Аргиллит	J ₂	168	3.79	22.07	0.1037	0.512273 ± 2	-7.1	-5.1	3.8	3.9
SG-08-12	Песчаник	J ₂₋₃	167	4.04	22.45	0.1087	0.512386 ± 4	-4.9	-3.1	6.8	5.8
08-AP-112	Конгломерат	J ₃ t	150	7.78	42.65	0.1103	0.512178 ± 3	-9.0	-7.3	8.2	9.1
Мел											
08-AP-107	Песчаник	K ₁ v	137	4.46	27.20	0.0993	0.511558 ± 2	-21.1	-19.4	7.6	6.4
08-AP-118	»	K ₁ hr-br	130	3.10	18.20	0.1030	0.511731 ± 3	-17.7	-16.1	3.2	4.8
SG-08-41	»	K ₁	123	5.44	31.46	0.1046	0.511771 ± 5	-16.9	-15.5	6.0	6.2
08-AP-119	»	K ₁ ap-al	112	4.76	29.45	0.0976	0.511581 ± 2	-20.6	-19.2	5.7	6.8
SG-08-37/1	»	K ₁ al	108	2.61	16.78	0.0940	0.511583 ± 4	-20.6	-19.2	4.3	5.7
SG-08-39a	»	K ₁ al	105	2.91	18.34	0.0959	0.511820 ± 5	-16.0	-14.7	9.2	8.9
08-AP-121	»	K ₁ al	105	2.24	13.79	0.0982	0.511682 ± 6	-18.7	-17.3	3.0	3.4
SG-08-43	»	K ₁ al	105	3.44	24.58	0.0845	0.511773 ± 4	-16.9	-15.4	5.1	4.0

2008; Прокопьев и др., 2013; Ershova et al., 2015]. Для более точного определения расположения области сноса для терригенных пород пермского возраста необходимы дополнительные исследования.

Области сноса триасовых терригенных пород. Наблюдаемое увеличение значений $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ в триасовых породах ожидаемо и отражает формирование и размыв магматического комплекса сибирских траппов (см. рис. 8, б). Изотопные характеристики терригенных пород триаса неоднородны по площади, что указывает на низкую степень смешения обломочного материала и относительную близость источников сноса. Наиболее низкие значения $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-6.5, -3.4, -2.2) можно интерпретировать как продолжение поступления материала из тех же источников сноса, что и в пермско-каменноугольное время, или как результат перемива нижележащих пермских и каменноугольных пород. Высокие значения $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ от -1 и выше в терригенных породах триаса свидетельствуют о поступлении в бассейн значительного количества обломочного материала с изотопными характеристиками, близкими к таковым у траппов (см. рис. 6). Незначительное содержание обломочных цирконов с возрастом 230—260 млн лет в образце из верхнетриасовых пород с северной окраины Оленекского поднятия, где на их долю приходится лишь 6 из 88 проанализированных зерен ([Miller et al., 2013], обр. ПРОК-212), объясняется тем, что в сравнении с магматическими и метаморфическими породами кислого состава основные породы содержат лишь незначительное количество цирконов, и при изучении распределения возрастов обломочных цирконов их распространение в области сноса не может быть адекватно оценено [McLennan et al., 1993].

Области сноса юрских терригенных пород. В юрских образцах изотопные характеристики осадочных пород меняются в сторону отрицательных значений $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$, что особенно очевидно в восточной части региона, где в обнажениях вдоль р. Лена величины $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ варьируют от -11.6 до -4.6 (см. рис. 6, 8, г; табл. 2, 3). Такая смена изотопных характеристик объясняется уменьшением влияния ювенильных источников сноса, размывавшихся в триасе, и возрастанием влияния коровых источников сноса. Наибо-

лее низкие значения $\epsilon_{Nd}(t)$ имеют верхнеюрские породы, что свидетельствует об увеличении роли источников со зрелой континентальной корой с течением времени. Поскольку значения $\epsilon_{Nd}(t)$ для юго-восточных образцов (Приленский район) ниже, чем для северо-западных (Оленекский район), то снос обломочного материала с коровыми изотопными характеристиками мог происходить с южных частей Сибирской платформы в северном или северо-восточном направлении. В случае разрушения близлежащих выступов фундамента (напр., Анабарский щит), влияние коровых источников одинаково сказывалось бы на изотопном составе всех образцов.

Области сноса меловых терригенных пород. На рубеже юры и мела происходит резкое уменьшение значений $\epsilon_{Nd}(t)$, и в нижнемеловых осадочных породах значение $\epsilon_{Nd}(t)$ опускается до величин $-15...-19$. Такие значения $\epsilon_{Nd}(t)$ характерны для кристаллического фундамента Сибирской платформы, который и был главным источником обломочного материала (см. рис. 6, 7, 8, з). Смена конфигурации областей сноса и появление новых источников свидетельствуют о значительных тектонических событиях, происходивших как в исследуемой области, так и за ее пределами. Так, в поздней юре—раннем мелу начинают формироваться Приверхоянский, а в раннем мелу Лено-Анабарский прогибы, а характер осадконакопления сменяется от морского к континентальному [Прокопьев и др., 2001].

Изучение Nd изотопного состава обломочных нижнемеловых пород показывает, что если снос и происходил со стороны складчато-надвигового пояса, то в минимальном объеме. В Верхоянском складчато-надвиговом поясе в надвигообразование вовлечены каменноугольно-триасовые терригенные комплексы, и, в случае их размыва, значения $\epsilon_{Nd}(t)$ в меловых осадках были бы значительно выше имеющихся значений. Тем более, если на изучаемый бассейн влияли локальные источники сноса с высокими значениями $\epsilon_{Nd}(t)$, то распределение изотопных характеристик было бы не столь однородным. Вероятно, горы, образовавшиеся на территории Верхоянского складчато-надвигового комплекса, были отделены от Приверхоянского прогиба фронтальным хребтом, который служил барьером для материала, поступающего с горной системы. В этом случае снос материала с Верхоянского складчато-надвигового пояса происходил в восточном направлении, а Приверхоянский прогиб заполнялся обломочным материалом преимущественно из альтернативных областей сноса.

Снос материала с запада теоретически возможен, но так как кристаллический фундамент был перекрыт осадочным чехлом [Прокопьев и др., 2001], такой сценарий маловероятен. Размыв локально обнаженных и невысоких выступов фундамента, таких как Анабарский щит или Оленекское поднятие, не мог обеспечить накопление 4-километровых толщ обломочных отложений в соседних прогибах. Поэтому заполнение Приверхоянского и Лено-Анабарского прогибов происходило, скорее всего, за счет размыва более удаленных частей Сибирской платформы и, в частности, Алданского щита. Для Приверхоянского прогиба такая точка зрения уже высказывалась ранее О.В. Япаскуртом [1992].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в статье изотопно-геохимические данные свидетельствуют, что формирование терригенных отложений северо-востока Сибирской платформы в каменноугольное время происходило за счет размыва главным образом Таймыро-Североземельского складчато-надвигового пояса, что совпадает с результатами датирования обломочных цирконов [Ершова и др., 2013; Прокопьев и др., 2013; Ershova et al., 2015]. Источником обломочного материала в пермское время являлись, скорее всего, складчато-надвиговые пояса фундамента Западной Сибири и/или южного и юго-западного обрамления Сибирской платформы, но для более определенных выводов необходимы дополнительные исследования. При накоплении триасовых толщ доминирующую роль играл размыв траппов. Формирование мелководно-морских верхнеюрских и, особенно, континентальных нижнемеловых отложений, выполняющих Приверхоянский и Лено-Анабарский прогибы, связано с размывом кристаллического фундамента, вероятно, Алданского щита. Резкое различие в изотопных характеристиках каменноугольно-пермских и нижнемеловых терригенных пород указывает, что при формировании последних поступление продуктов размыва Верхоянского складчато-надвигового пояса не было существенным.

Мы благодарим рецензентов В.А. Верниковского и С.Д. Соколова, замечания которых позволили существенно улучшить содержание статьи.

Исследования были выполнены при поддержке компании TGS, проекта СПбГУ 3.38.137.2014, РФФИ (гранты 13-05-00700, 13-05-00943), в рамках проекта № VIII.66.1.4 ИГАБМ СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

Верниковская А.Е., Пис В.Л., Верниковский В.А., Жи Д.Г., Травин А.В. Геохимия и петрология позднепротерозойских гранитов Мамонто-Шренковского террейна (Центральный Таймыр) // Геохимия, 2002, № 5, с. 486—498.

Верниковский В.А. Геодинамическая эволюция Таймырской складчатой области. Новосибирск, Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ СО РАН, 1996, 202 с.

Геологическая карта СССР м-ба 1:1 000 000. Объяснительная записка. Лист R-(50)-52. Тикси / Под ред. А.А. Межвилка, Ф.Г. Маркова. Л., Министерство геологии СССР, 1983.

Глебовицкий В.А., Хильтова В.Я., Козаков И.К. Тектоническое строение Сибирского кратона: интерпретация геолого-геофизических, геохронологических и изотопно-геохимических данных // Геотектоника, 2008, № 1, с. 12—26.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (новая серия). Объяснительная записка. Лист S-50-52 — Быковский / Под ред. А.Ю. Егорова, Е.П. Сурмиловой, Р.О. Галабала. СПб., Карт. фабрика ВСЕГЕИ, 2001, 189 с. +7 вкл.

Государственная геологическая карта Российской Федерации м-ба 1:1 000 000 (третье поколение). Объяснительная записка. Лист T-45-48. Мыс Челюскин / Ред. А.А. Макарьев. СПб., Карт. фабрика ВСЕГЕИ, 2013а, 472 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (третье поколение). Объяснительная записка. Серия Анабаро-Вилюйская. Лист R-51 — Джарджан / Ред. А.П. Кропачев. СПб., Карт. фабрика ВСЕГЕИ, 2013б, 397 с. +9 вкл.

Гусев Н.И., Руденко В.Е., Бережная Н.Г., Скублов С.Г., Ларионов А.Н. Изотопно-геохимические особенности и возраст (SHRIMP II) метаморфических и магматических пород в Котуйкан-Монхонлинской зоне Анабарского щита // Региональная геология и металлогения, 2013, № 54, с. 45—59.

Дагис А.С., Казаков А.М. Стратиграфия, литология и цикличность триасовых отложений севера Средней Сибири. Новосибирск, Наука, 1984, 176 с.

Девятов В.П., Никитенко Б.Л., Шурыгин Б.Н. Палеогеография Сибири в юрском периоде на этапах формирования основных перестроек // Новости палеонтологии и стратиграфии. Вып. 16—17: Приложение к журналу «Геология и геофизика», 2011, т. 52, с. 87—101.

Дегтярев К.Е. Тектоническая эволюция раннепалеозойских островодужных систем и формирование континентальной коры каледонид Казахстана // М., ГЕОС, 2012, 289 с. (Тр. ГИН, вып. 602).

Ершова В.Б., Худoley А.К., Прокопьев А.В. Реконструкции питающих провинций и тектонических событий в карбоне на северо-восточном обрамлении Сибирской платформы по данным U-Pb датирования обломочных цирконов // Геотектоника, 2013, № 2, с. 32—41.

Казаков А.М., Константинов А.Г., Курушин Н.И., Могучева Н.К., Соболев Е.С., Фрадкина А.Ф., Ядренкин А.В., Девятов В.П., Смирнов Л.В. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Триасовая система. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2002, 328 с.

Каплан М.Е. Литология морских мезозойских отложений севера Восточной Сибири. Л., Недра, 1976, 231 с.

Князев В.А., Девятов В.П., Шурыгин В.Н. Стратиграфия и палеогеография ранней юры востока Сибирской платформы. Якутск, ЯНЦ СО АН СССР, 1991, 99 с.

Ковач В.П., Котов А.Б., Смелов А.П., Старосельцев К.В., Сальникова Е.Б., Загорная Н.Ю., Сафронов А.Ф., Павлушин А.Д. Этапы формирования континентальной коры погребенного фундамента восточной части Сибирской платформы: Sm-Nd изотопные данные // Петрология, 2000, т. 8, № 4, с. 394—408.

Конторович В.А., Конторович А.Э., Губин И.А., Зотеев А.М., Лапковский В.В., Малышев Н.А., Соловьев М.В., Фрадкин Г.С. Структурно-тектоническая характеристика и модель геологического строения неопротерозойско-фанерозойских отложений Анабаро-Ленской зоны // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (8), с. 1253—1274.

Купцова А.В., Худoley А.К., Молчанов А.В. Литогеохимия верхнепротерозойских терригенных отложений южной части Восточно-Анабарского бассейна: эволюция состава источников сноса и вторичные изменения // Вестник СПбГУ, сер. 7, Геология и география, 2011, № 1, с. 17—31.

Молчанов А.В., Князев В.Ю., Худoley А.К. Тектонофлюидные зоны Анабарского щита и их рудоносность // Региональная геология и металлогения, 2011, № 47, с. 96—106.

Парфенов Л.М. Континентальные окраины и островные дуги мезозойской Северо-Восточной Азии. Новосибирск, Наука, 1984, 191 с.

Подковыров В.Н., Котова Л.Н., Котов А.Б., Ковач В.П., Граунов О.В., Загорная Н.Ю. Области сноса и источники рифейских песчаников Учуро-Майского региона (Восточная Сибирь): результаты геохимических и Sm-Nd изотопно-геохимических исследований // Стратиграфия. Геологическая корреляция, 2007, т. 15, № 1, с. 47—62.

Прокопьев А.В., Парфенов Л.М., Томшин М.Д., Колодезников И.И. Чехол Сибирской платформы и смежных складчато-надвиговых поясов // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М., МАИК Наука/Интерпериодика, 2001, с. 113—155.

Прокопьев А.В., Ершова В.Б., Миллер Э.Л., Худoley А.К. Раннекаменноугольная палеогеография северной части Верхоянской пассивной окраины по данным U-Pb датирования обломочных цирко-

- нов: роль продуктов размыва Центрально-Азиатского и Таймыро-Североземельского складчатых поясов // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (10), с. 1507—1529.
- Проскурнин В.Ф., Верниковский В.А., Метелкин Д.В., Петрушков Б.С., Верниковская А.Е., Гавриш А.В., Багаева А.А., Матушкин Н.Ю., Виноградова Н.П., Ларионов А.Н.** Риолит-гранитная ассоциация Центрально-Таймырской зоны: свидетельство аккреционно-коллизийных событий в неопротерозойское время // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (1), с. 23—40.
- Рогов М.А., Захаров В.А., Ершова В.Б.** Детальная стратиграфия пограничных юрско-меловых отложений нижнего течения р. Лена (Якутия) по аммонитам и бухиям // Стратиграфия. Геологическая корреляция, 2011, т. 19, № 6, с. 67—88.
- Розен О.М., Левский Л.К., Журавлев Д.З., Ротман А.Я., Специус З.В., Макеев А.Ф., Зинчук Н.Н., Манаков А.В., Серенко В.П.** Палеопротерозойская аккреция на северо-востоке Сибирского кратона: изотопное датирование Анабарской коллизийной системы // Стратиграфия. Геологическая корреляция, 2006, т. 14, № 6, с. 3—24.
- Романова И.В., Верниковская А.Е., Верниковский В.А., Матушкин Н.Ю., Ларионов А.Н.** Неопротерозойский щелочной и ассоциирующий с ним магматизм в западном обрамлении Сибирского кратона: петрография, геохимия и геохронология // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (11), с. 1530—1555.
- Рыцк Е.Ю., Ковач В.П., Коваленко В.И., Ярмолюк В.В.** Структура и эволюция континентальной коры Байкальской складчатой области // Геотектоника, 2007, № 6, с. 23—51.
- Смелов А.П., Зедгенизов А.Н., Тимофеев В.Ф.** Фундамент Северо-Азиатского кратона // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М., МАИК Наука/Интерперидика, 2001, с. 81—112.
- Смелов А.П., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Ковач В.П., Березкин В.И., Кравченко А.А., Добрецов В.Н., Великославинский С.Д., Яковлева С.З.** Возраст и продолжительность формирования Билляхской зоны тектонического меланжа, Анабарский щит // Петрология, 2012, т. 20, № 3, с. 315—330.
- Тейлор С.Р., МакЛеннан С.М.** Континентальная кора: ее состав и эволюция. М., Мир, 1988, 379 с.
- Шурыгин Б.Н., Никитенко Б.Л., Девятов В.П., Ильина В.И., Меледина С.В., Гайдебурова Е.А., Дзюба О.С., Казаков А.М., Могучева Н.К.** Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Юрская система. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2000, 480 с.
- Япнаскурт О.В.** Литогенез и полезные ископаемые миогеосинклиналей. М., Недра, 1992, 224 с.
- Banner J.L.** Radiogenic isotopes: systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy // *Earth Sci. Rev.*, 2004, v. 65, p. 141—194.
- Boghossian N.D., Patchett P.J., Ross G.M., Gehrels G.E.** Nd isotopes and the source of sediments in the miogeocline of the Canadian Cordillera // *J. Geol.*, 1996, v. 104, p. 259—277.
- DePaolo D.J., Wasserburg G.J.** Inferences about magma sources and mantle structure from variations of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ // *Geophys. Res. Lett.*, 1976, v. 3, p. 743—746.
- Ershova V.B., Holbrook J., Khudoley A.K., Prokopiev A.V.** Sequence stratigraphy of the Lower Cretaceous fluvial deposits of the Chekurovka area (NE Siberia, Lena River): preliminary results // EAGE, 4th Saint Petersburg International Conference & Exhibition. St. Petersburg, 2010, Paper A04.
- Ershova V.B., Prokopiev A.V., Khudoley A.K.** Integrated provenance analysis of Carboniferous deposits from Northeastern Siberia: implication for the Late Paleozoic history of the Arctic // *J. Asian Earth Sci.*, 2015, v. 109, p. 38—49.
- GEOROC**, Geochemistry of Rocks of the Oceans and Continents. <http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de>.
- Jacobsen S.B., Wasserburg G.J.** Sm-Nd evolution of chondrites and achondrites, II // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1984, v. 67, p. 137—150.
- Khudoley A.K., Prokopiev A.V.** Defining the eastern boundary of the North Asian craton from structural and subsidence history studies of the Verkhoysk fold and thrust belt / Eds. J. Sears, T. Harms, C. Evenchick. Whence the mountains? Enquiries into the evolution of orogenic belts: A volume in honor of Raymond A. Price // *The Geological Society of America Special Paper 433*, 2007, p. 391—410.
- Khudoley A., Chamberlain K., Ershova V., Sears J., Prokopiev A., MacLean J., Kazakova G., Malyshov S., Molchanov A., Kullerud K., Toro J., Miller E., Veselovskiy R., Li A., Chipley D.** Proterozoic supercontinental restorations: constraints from provenance studies of Mesoproterozoic to Cambrian clastic rocks, eastern Siberian Craton // *Precamb. Res.*, 2015, v. 259, p. 78—94.
- Kröner A., Kovach V., Belousova E., Hegner E., Armstrong R., Dolgoplova A., Seltmann R., Alexiev D.V., Hoffmann J.E., Wong J., Sun M., Cai K., Wang T., Tong Y., Wilde S.A., Degtyarev K.E., Rytisk E.** Reassessment of continental growth during the accretionary history of the Central Asian Orogenic Belt // *Gondwana Res.*, 2014, v. 25, p. 103—125.

Lightfoot P.C., Hawkesworth C.J., Hergt J., Naldrett A.J., Gorbachev N.S., Fedorenko V.A., Doherty W. Remobilisation of the elemental lithosphere by a mantle plume: major-, trace-element, and Sr-, Nd-, and Pb-isotope evidence from picritic and tholeiitic lavas of the Noril'sk District, Siberian Trap, Siberia // *Contrib. Miner. Petrol.*, 1993, v. 114, p. 171—188.

McLennan S.M., Hemming S., McDaniel D.K., Hanson G. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics / Eds. M.J. Johnson, A. Basu. Processes controlling the composition of clastic sediments // *Geological Society of America Special Paper 284*, 1993, p. 21—40.

McLennan S.M., Bock B., Hemming S.R., Hurowitz J.A., Lev S.M., McDaniel D.K. The role of provenance and sedimentary processes in geochemistry of sedimentary rocks. Geochemistry of sediments and sedimentary rocks // *Evolutionary considerations to mineral deposit-forming environments*. St. John's, Newfoundland, Geol. Assoc. Canada, 2003, p. 7—38.

Michard A., Gurriet P., Soudant M., Albarede F. Nd isotopes in French Phanerozoic shales: external vs. internal aspects of crustal evolution // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1985, v. 49, p. 601—610.

Miller E.L., Soloviev A.V., Prokopiev A.V., Toro J., Harris D., Kuzmichev A.B., Gehrels G.E. Triassic river systems and the paleo-Pacific margin of northwestern Pangea // *Gondwana Res.*, 2013, v. 23, p. 1189—1664.

Prokopiev A.V., Toro J., Miller E.L., Gehrels G.E. The paleo-Lena River — 200 m.y. of transcontinental zircon transport in Siberia // *Geology*, 2008, v. 36, p. 699—702.

Ross G.M., Gehrels G.E., Patchett P.J. Provenance of Triassic strata in the Cordilleran miogeocline, western Canada // *Bull. Canad. Petrol. Geol.*, 1997, v. 45, p. 461—473.

Ross G.M., Patchett P.J., Hamilton M., Heaman L., DeCelles P.G., Rosenberg E., Giovanni M.K. Evolution of the Cordilleran orogen (southwestern Alberta, Canada) inferred from detrital mineral geochronology, geochemistry, and Nd isotopes in the foreland basin // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 2005, v. 117, p. 747—763.

Smelov A.P., Timofeev V.F. The age of the North Asian cratonic basement: An overview // *Gondwana Res.*, 2007, v. 12, p. 279—288.

Vernikovskiy V.A., Pease V.L., Vernikovskaya A.E., Romanov A.P., Gee D.G., Travin A.V. First report of early Triassic *A*-type granite and syenite intrusions from Taimyr: product of the northern Eurasian superplume? // *Lithos*, 2003, v. 66, p. 23—36.

Vernikovskiy V.A., Vernikovskaya A.E., Pease V.L., Gee D.G. Neoproterozoic orogeny along the margins of Siberia // *Geol. Soc. London, Memoirs*, 2004, v. 30, p. 233—248.

Vernikovskiy V.A., Vernikovskaya A.E., Wingate M.T.D., Popov N.V., Kovach V.P. The 880—864 Ma granites of the Yenisey Ridge, western Siberian margin: Geochemistry, SHRIMP geochronology, and tectonic implications // *Precamb. Res.*, 2007, v. 154, p. 175—191.

*Рекомендована к печати 4 марта 2015 г.
В.А. Верниковским*

*Поступила в редакцию
28 августа 2014 г.*