Популярно о том, что дало изучение геодинамической эволюции Колымо-Омолонского микроконтинента (Грант РФФИ № 19-05-00945)

Геологическое и тектоническое строение Северо-Востока Азии отличается крайней сложностью. Здесь выделяется много разновозрастных как осадочных пород, которые отлагались на дне древних морей и океанов на протяжении последнего миллиарда лет, так и магматических пород, которые либо изливались на поверхность из древних вулканов, либо внедрялись и остывали на глубине. Кроме того, эти породы, как правило, были неоднократно смяты в складки и нарушались разломами. Необходимо отметить, что география в настоящее время очень сильно отличается от той, которая была в далеком прошлом. Там, где сегодня мы наблюдаем горы, в прошлом могли быть моря и океаны, или это были низменности, по которым протекали древние реки. Отдельные блоки земной коры (мы их называем «террейны» или даже «микроконтиненты»), которые сейчас распознаются в составе горных сооружений (таких, как, например, хребет Черского – один из крупнейших на территории северо-востока нашей страны) в прошлом могли разделяться небольшими морями. Согласно тектонике литосферных плит, конфигурация океанов на Земле непостоянна. На краях океанов могут происходить процессы, при которых океаническая земная кора (более тонкая) погружается под мощную континентальную кору («субдукция»). Постепенно вся океаническая кора полностью погружается под континентальную и тогда происходит столкновение («коллизия») континентальных масс, которые были по обе стороны исчезнувшего океана. В результате этого столкновения горные породы сминаются в складки и нарушаться разломами. Территория начинает подниматься, образуются так называемые «складчатые пояса» или «орогенные области», формируются горные хребты. Такой геологической структурой, крупнейшей на северо-востоке Азии, является Верхояно-Колымская складчатая область, которая образовалась в конце мезозойской эры около 100-150 млн лет назад.

Одна из задач, которую мы и решали в рамках проекта, поддержанного **Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 19-05-00945)** – реконструкция формирования осадочных бассейнов прошлого для востока Верхояно-Колымской складчатой области, ее составной части – Колымо-Омолонского микроконтинента, выяснение, откуда в них поступал обломочный материал, какие породы при этом разрушались, какова была конфигурация древних рек, переносивших обломки со стороны поднятий суши прошлого. Эти обломки (в геологии их называют «осадки», «обломочные» или «терригенные» породы) представляют собой как мелкие песчинки, так и крупные гальки, которые образуются при разрушении горных пород на суше и переносятся в моря или другие водоемы, как правило, речными потоками различной протяженности и размера. Для этого мы извлекаем из осадочных пород минералы циркон или апатит (иногда их размеры меньше десятой части миллиметра), определяем возраст их образования по содержанию радиоактивных изотопов урана, свинца, тория и гелия. Это нам позволяет узнать, какого возраста были горные породы, которые давно разрушились и их мелкие обломки в виде песка перенеслись древними реками в моря и океаны того возраста, который имеют изученные нами осадочные толщи по палеонтологическим данным.

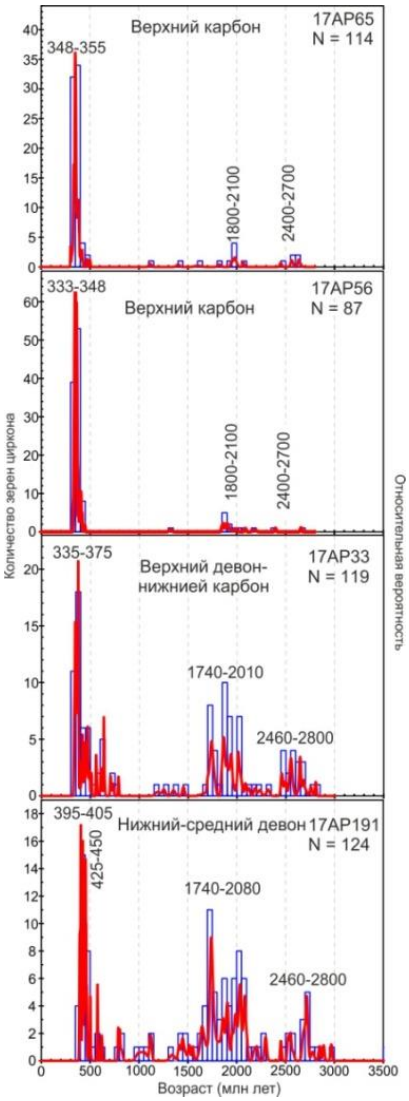

Рисунок 1. Корреляция распределения возрастов обломочных цирконов из девонских и каменноугольных отложений Приколымского террейна.

На рисунке 1 показаны графики распределения возрастов цирконов, которые мы извлекли из пород девонского (около 380 млн лет назад) и каменноугольного (около 300 млн лет назад) возраста. В то время они слагали дно древнего моря, а сейчас находятся в горах в среднем течении р. Колымы. Найдя возрастные аналоги цирконов из магматических пород (в которых первоначально кристаллизуются в больших количествах цирконы) на северо-востоке Азии, мы построили палеотектонические и палеогеографические реконструкции на раннедевонское и каменноугольное время, показанные на рисунке 2. Вы можете видеть, как сильно отличается девонская и каменноугольная география от современной.

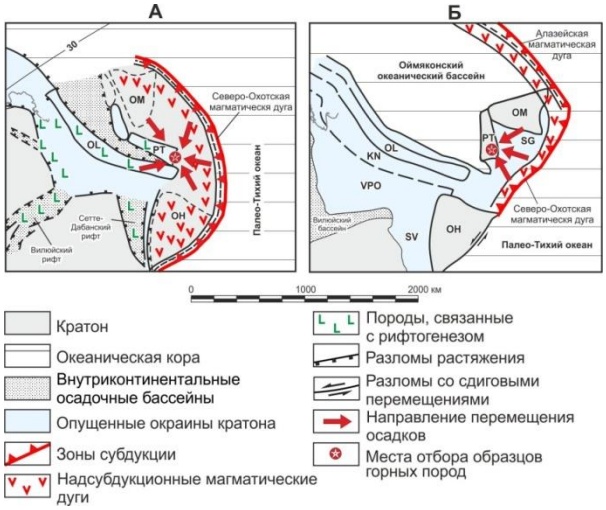

Рисунок 2. Палеотектонические реконструкции на ранний девон (А) и карбон (В). Террейны: PT – Приколымский, OM – Омолонский, OL – Омулевский, OH – Охотский, SG – Сугойский, KN – Кулар-Нерский. VPO – Верхоянская пассивная континентальная окраина. SV – Южное Верхоянье.

На северо-востоке Азии в меловое время (около 145–65 млн лет назад) существовали мелководные бассейны, в которых также происходило накопление обломков горных пород. Они уже были не такие как в позднем палеозое и раннем мезозое. От побережья современного Охотского моря в северном направлении до среднего течения р. Колымы протягивается на несколько сотен километров узкий Омсукчанский прогиб. Породы этого прогиба либо осадочного происхождения, либо вулканогенно-осадочного (т.е. образовались рядом с районами, в которых происходила вулканическая деятельность). Кроме того, в породах прогиба найдено одно их крупнейших на Северо-Востоке Азии Дукатское месторождение серебра. А вулканов в позднемезозойское время вдоль современного побережья Охотского моря было много, и они образовывали протяженные магматические пояса. Эти породы разрушались и их обломки попадали в Омсукчанский прогиб.

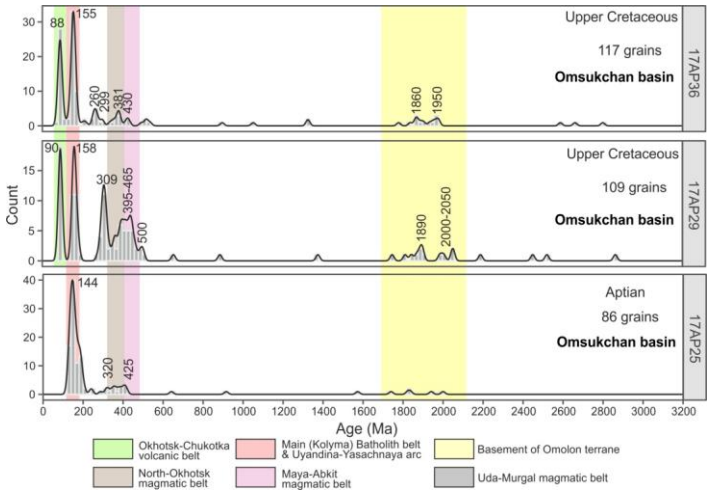

Рисунок 3. Корреляция распределения возрастов обломочных цирконов из меловых отложений Омсукчанского прогиба.

На рисунке 3 показаны графики распределения возрастов цирконов, которые мы извлекли из пород раннемелового (около 115 млн лет назад) и позднемелового (около 85–70 млн лет назад) возраста. В то время они слагали дно древнего моря, а сейчас находятся в горах в среднем течении р. Колымы. Найдя возрастные аналоги цирконов из магматических пород (в которых первоначально кристаллизуются в больших количествах цирконы), мы установили, что в раннемеловое время в основном разрушались породы магматических поясов, распространенных вдоль современного побережья Охотского моря, а также граниты и вулканические породы внутренних областей Северо-Востока Азии. В позднемеловое время источники цирконов резко изменились. Это было связано с интенсивными горообразовательными процессами, происходившими в это время в этой части Азии. Кроме того, рядом появился громадный вулканический пояс (один из крупнейших за всю историю Земли), Охотско-Чукотский, обломки которого также стали попадать в Омсукчанский прогиб. Эти новые знания помогут геологам лучше понять, как происходило осадконакопление, когда поднимались горы, как присутствие обломков горных пород различного происхождения может влиять на образование крупных месторождений полезных ископаемых. Кроме того, цирконы помогают определить возраст осадочных пород, когда в них отсутствуют фаунистические остатки. Нами было установлено, что в породах, возраст которых считался палеозойским (300–250 млн лет назад), присутствую многочисленные цирконы позднемелового возраста. А это значит, что изученные толщи никак не могут быть палеозойскими, а, по крайней мере, позднемеловыми, образовавшимися 85–70 млн лет назад! На рисунке 4 показана расшифрованная нами палеогеография СВ Азии на меловое время. Вы можете видеть, что большая часть территории представляла собой сушу, к югу от которой находился палео-Тихий океан, земная кора которого погружалась под континент. Многочисленные вулканы и разрушающиеся более

древние магматические породы являлись источниками обломков, которые поступали в Омсукчанский прогиб. Знание палеогеографии прошлого очень важно как для создания новых геологических карт, расшифровки геологической эволюции региона, так и для прогнозирования поисков полезных ископаемых.

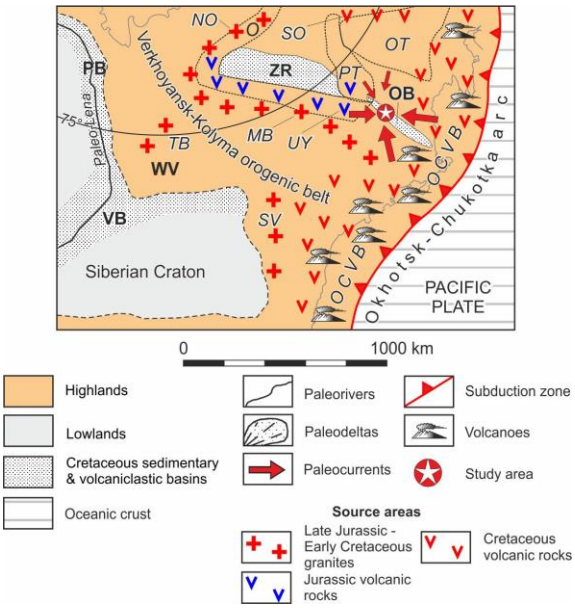

Рисунок 4. Палеотектоническая реконструкция СВ Азии на готерив–поздний мел. Главные меловые бассейны: OB – Омсукчанский, VB –Вилюйский, PB – Приверхоянский, ZR – Индигиро-Зырянский. Террейны: PT – Приколымский, OT – Омолонский, WV – Западное Верхоянье. Магматические пояса: OCVB – Охотско-Чукотский, UY – Уяндино-Ясачненский, MB – Главный (Колымский), NB – Северный, SO – Святоносско-Олойский, SV – Южно-Верхоянский.

Другой задачей являлось установление времени подъема территории в результате коллизии и горообразования (в геологии это называется «орогенез»). Здесь также приходят на помощь цирконы, в которых как бы «записана» история их погружения и последующего поднятия к земной поверхности в результате орогенеза. Это также можно установить, используя современные изотопные методы так называемой низкотемпературной термохронологии.

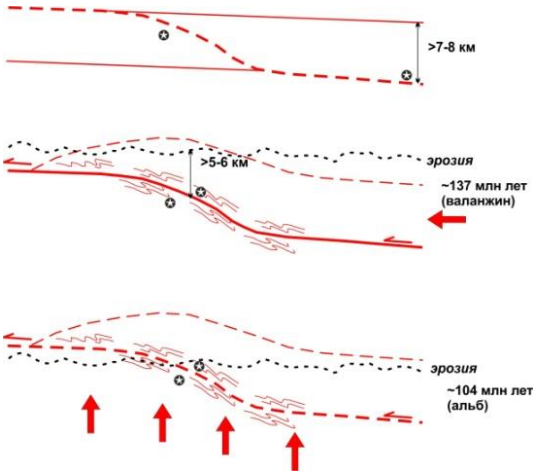

Рисунок 5. Основные этапы орогенеза южной части Приколымского террейна, полученные по данным (U-Th)/He низкотемпературной термохронологии обломочных цирконов.

На рисунке 5 показана интерпретация полученных нами данных для юго-восточной части Верхояно-Колымской складчатой области. Мы установили, что здесь были два этапа тектонического подъема и орогенеза: около 137 и около 104 млн лет назад (меловой период).

Кроме того, складчатые и разрывные деформации могли происходить неоднократно, и методы структурной геологии позволяют распознать их последовательность. Проводя изотопное датирование магматических пород, которые прорывают эти складки, можно определить время, когда происходили те или иные деформационные процессы. Так, нами была определена серия последовательных деформаций на юго-западе Колымо-Омолонского микроконтинента, который расположен в центральной части Верхояно-Колымской складчатой области. А установленный изотопными методами юрский возраст прорывающих эти деформированные породы гранитов позволяет нам предположить время деформаций.

Как мы уже говорили, кристаллы циркона образуются в магматических породах и возраст цирконов, как правило, указывает на время образовании магматического тела. Нами были продатированы изотопно-геохимическими методами цирконы из двух гранитных плутонов и установлено, что на Северо-Востоке Азии в силурийское-девонское время были значительно шире проявлены процессы магматизма, чем это считалось ранее. Пример результатов такого датирования вы можете видеть на рисунке 6. Это позволило нам обосновано предположить, что в это время здесь происходило значительное перемещение тектонических плит.

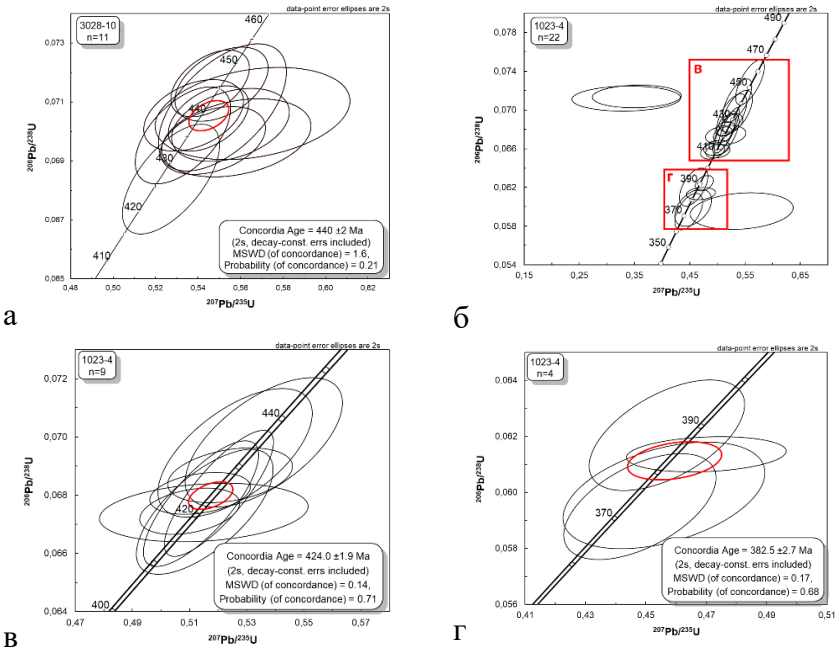

Рисунок 6. Диаграммы, иллюстрирующие возраст гранитоидов.

Важной задачей является установление последовательности проявления складок и разломов в земной коре. Горные породы на Северо-Востоке Азии, как правило, были неоднократно смяты в складки и нарушались разломами. На рисунке 7 вы можете видеть, как позднеюрские вулканогенные толщи, которые залегают очень полого, перекрывают ориентированные почти вертикально породы средней юры. Это значит, что около 165–155 млн лет назад здесь произошли очень мощные деформации, в результате которых среднеюрские толщи были смяты в крупные складки. Этот процесс сопровождался горообразованием, а потом, через очень небольшое время (несколько миллионов лет, что по геологическим меркам очень немного!) эти горы разрушились и среднеюрские породы сверху перекрылись вулканогенными позднеюрскими породами. Таким образом, нами был установлен здесь еще один важный деформационный этап.

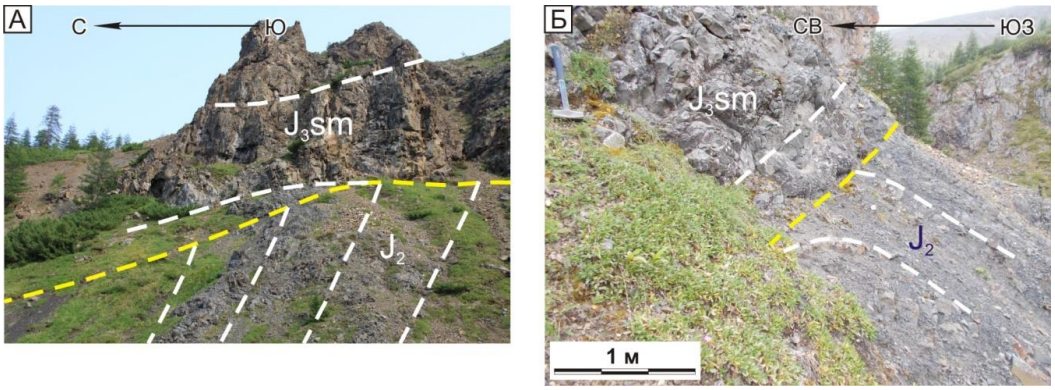

Рисунок 7. Угловое несогласие между залегающими почти вертикально терригенными среднеюрскими и полого залегающими вулканогенными верхнеюрскими породами.
Штриховые линии: белая – слоистость пород, желтая – несогласный контакт между толщами разного возраста.

Как мы уже говорили, горные породы в результате сжатия могут деформироваться неоднократно и в разное время. В каждый деформационный этап образуются новые разломы, а уже ранее складчатые породы повторно сминаются в складки. На рисунке 8 показаны фотографии таких неоднократно складчатых пород в мезозойское время, которые мы изучали в зоне одного из крупнейших в регионе разломов. Мы замеряли специальным горным компасом ориентировку слоев горных пород, мелких разломов и трещин, жил и прочих деформационных элементов. В дальнейшем происходила обработка этих замеров специальными компьютерными программами (раньше до «цифровой эры» мы это делали вручную!). В результате мы установили положение в пространстве выявленных деформаций, а также рассчитали направление сил сжатия, которые к ним привели.

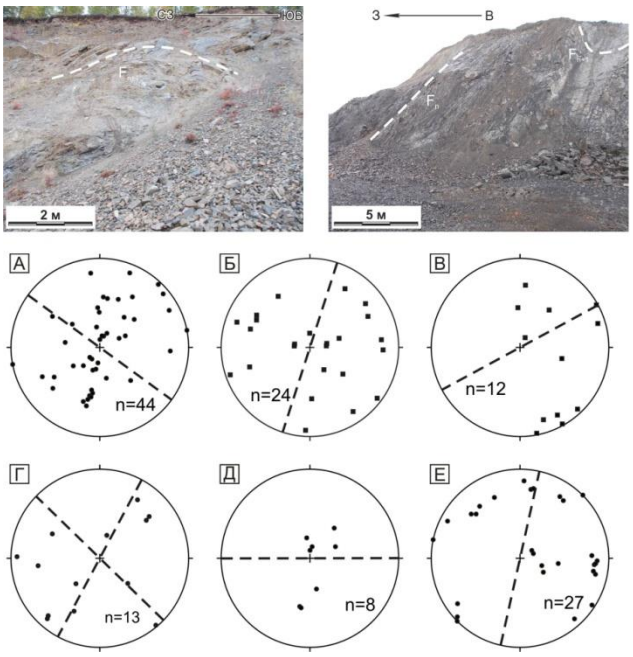

Рисунок 8. Наверху – фотографии взаимоотношений складок и надвигов, наблюдаемых в породах триаса. Штриховые линии: белая – слоистость, красная – разлом. Внизу – стереограммы с вычисленными осями палеонапряжений. Стрелка показывает направление движения висячего крыла разлома.

В целом, для расшифровки деформационной истории региона необходимо использовать комплекс различных данных, на основании которых можно предполагать с той или иной долей условности как происходили деформационные процессы. На рисунке 9 показана серия геологических разрезов через Верхояно-Колымскую складчатую область на разные временные интервалы позднего палеозоя и мезозоя, которые демонстрируют предположение одного из участников проекта, как она могла образоваться. Обратите внимание, что на месте современных горных хребтов Черского и Верхоянского 300–150 млн лет назад располагался океанический бассейн, а столкновение окраины Сибирского континента и Колымо-Омолонского микроконтинента (супертеррейна) и горообразование произошли в меловое время около 100 млн лет назад.

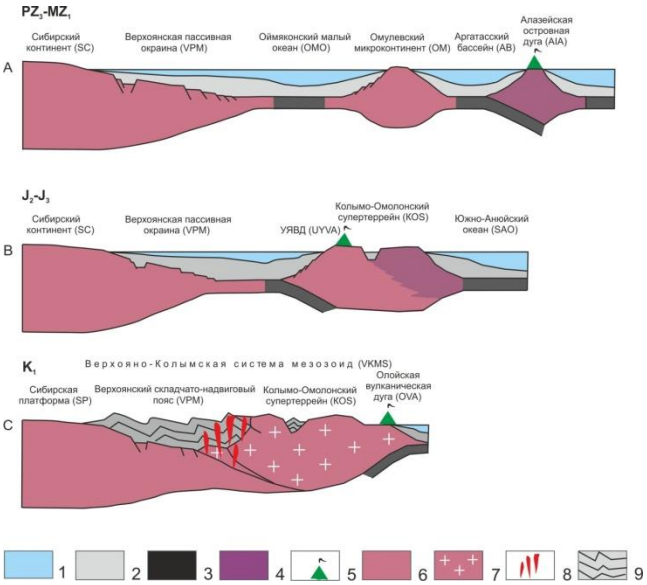

Рисунок 9. Схема тектонического развития Верхояно-Колымской складчатой области.
1 – море, *2* – каменноугольно-мезозойские отложения, *3* – океанская кора, *4* – земная кора островодужных зон, *5* – вулканы, *6* – континентальная кора Сибирского континента, *7* – новообразованная континентальная кора Верхояно-Колымской системы мезозоид, *8* – гранитоиды, *9* – складчатые структуры. Буквенные обозначения: SC – Сибирский континент, VPM – Верхоянская пассивная окраина, OMO – Оймяконский малый океан, OM – Омулевский микроконтинент, AB – Аргатасский бассейн, AIA – Алазейская островная дуга, KOS – Колымо-Омолонский супертеррейн, UYVA – Уяндина-Ясачненская вулканическая дуга, SAO – Южно-Анюйский океан, SP – Сибирская платформа, VFTB – Верхоянский складчато-надвиговый пояс, OVA – Олойская вулканическая дуга, VKMS – Верхояно-Колымская система мезозоид.

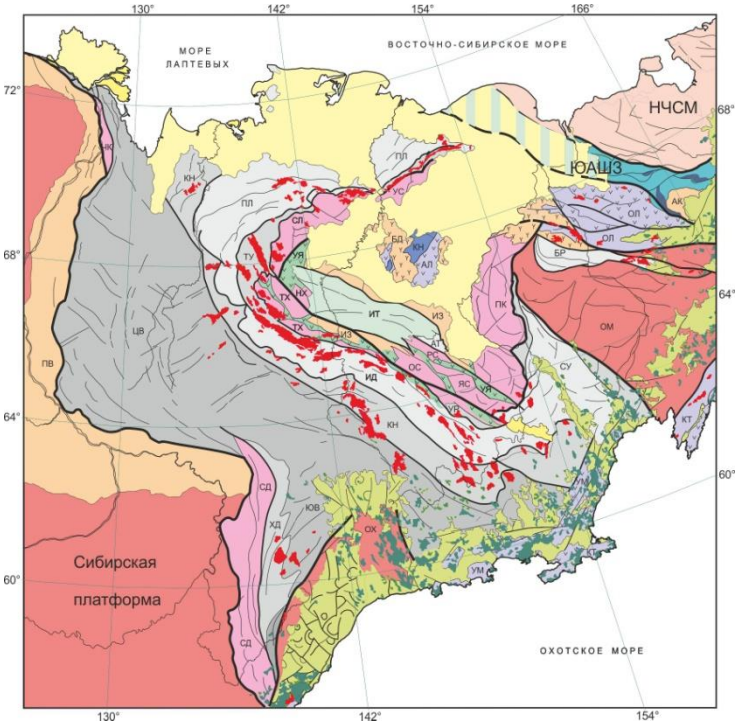

Рисунок 10. Новая тектоническая карта Верхояно-Колымской складчатой области.

В геологии очень важна визуализация имеющихся данных. А наиболее необходимы геологические и тектонические карты. На рисунке 10 показана новая тектоническая карта, которая охватывает большую часть восточной Сибири. На этой карте изображены основные тектонические единицы, а также различным цветом те геодинамические условия, при которых они образовались. Основная задача таких карт - показать строение изученной территории. Это помогает при

расшифровке геологической эволюции, а также способствует созданию новых металлогенических карт, необходимых для прогнозирования новых месторождений полезных ископаемых различного типа.

Полученные нами результаты позволяют усовершенствовать представления о геологической истории этого громадного и сложного в геологическом отношении региона и расширяют познания образования и жизни Земли. Они могут быть использованы в дальнейшем, как для создания новых геологических карт, так и для выяснения закономерностей формирования месторождений полезных ископаемых.

Основные публикации по теме исследования

Prokopiev A.V., Ershova V.B., Stockli D.F. Provenance of the Devonian–Carboniferous clastics of the southern part of the Prikolyma terrane (Verkhoyansk–Kolyma orogen) based on U–Pb dating of detrital zircons // GFF. 2019. V. 141:4. P. 272–278. DOI: 10.1080/11035897.2019.1621373

Третьяков Ф.Ф. Террейны Верхоянского складчато-надвигового пояса (Восточная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019. Т. 24. № 4. С. 67–78. DOI: 10.31242/2618-9712-2019-24-4-5

Васильев Д.А., Ермаков Н.Н., Прокопьев А.В. Тектоника юго-восточного фланга Иньяли-Дебинского синклинория (Верхояно-Колымская складчатая область) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020. Т. 25. № 4. С. 30–41. DOI: 10.31242/2618-9712-2020-25-4-2.

Третьяков Ф.Ф. Современные аспекты тектонического строения Южно-Верхоянского синклинория // Тихоокеанская геология. 2021. № 3. С. 103–113. DOI: 10.30911/0207-4028-2021-40-3-103-113

Васильев Д.А., Прокопьев А.В. Новые данные о тектонике Адыча-Тарынской зоны разломов (Восточная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26. № 4. С. 5 —15. DOI: 10.31242/2618-9712-2021-26-4-5–15.