

Гипербазиты как фактор геодинамики по результатам исследований на Таймырском геофизическом полигоне

Д.Г. Кушнир

АО «Таймыргеофизика» (группа компаний АО «Башнефтегеофизика»), г. Дудинка

E-mail: d.kushnir@tmrgeo.ru

Аннотация. Данные сейсморазведки показывают повсеместное инверсионное происхождение крупнейших геоструктур Таймырского полуострова и фиксируют неоднократные изменения направления тектонических движений. Инверсия в пределах Енисей-Хатангского прогиба привела к образованию над древним депоцентром системы мегавалов, в основании которых, на уровне раздела Мохоровичича, максимумом силы тяжести маркируются широкомасштабные гипербазитовые внедрения. В условиях перманентного сжатия, сопровождавшего формирование тектоники региона, эти интрузивные процессы оцениваются как важнейший фактор, способный инициировать инверсию и в значительной степени способствовать ее развитию.

Согласно геофизическим данным, формирование прогибов севера Центральной и Западной Сибири связано с образованием под депоцентрами прогибания, на уровне раздела Мохо, эклогитов. В соответствии с геоэлектрическими аномалиями эклогиты пластичны и перекрывают мантийные гипербазиты с меньшей плотностью, что создает предпосылки для гравитационного всплывания ультраосновных образований. Это совместно с метаморфическими и метасоматическими процессами служит импульсом для роста поднятий в осевой части прогибов. Одновременно, за счет вытеснения пластичных эклогитов и коромантийной смеси из зоны внедрения в направлении периферийных частей осадочного бассейна, происходит расширение и ускорение прогибания с некомпенсированным характером накопления осадков и формированием неокомского клиноформного комплекса.

Ключевые слова: Таймыр, геодинамика, тектоника, верхняя мантия, земная кора, граница Мохоровичича, коромантийная смесь, эклогиты, Енисей-Хатангский прогиб, Гулинский массив ультрамафитов, неокомский клиноформный комплекс осадков.

Для цитирования: Кушнир Д.Г. Гипербазиты как фактор геодинамики по результатам исследований на Таймырском геофизическом полигоне // Актуальные проблемы нефти и газа. 2020. Вып. 2(29). С. 3–27. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art1>

Введение

На склонах Анабарской антеклизы известен ряд гипербазитовых интрузий, в том числе крупнейший в мире Гулинский массив ультраосновных и щелочных пород, приуроченный к области ее сочленения с Енисей-Хатангским прогибом. Поскольку по размерам этот массив на порядки превосходит

другие подобные плутоны, его появление традиционно соотносят с теми или иными особенностями формирования глубинной геологии Таймырского полуострова в целом, которые могли создать условия для проникновения столь значительных объемов мантийного вещества на поверхность [1–5].

В начале 2000-х гг., по результатам гравиметрической съемки масштаба 1 : 50 000 в пределах Гулинского комплекса, было зафиксировано несоответствие аномального поля силы тяжести распространению гипербазитов на

поверхности, потому что соотносимая с ними гравитационная аномалия в значительной степени смещена и объясняется, по-видимому, преимущественно другим, залегающим глубже аномалиеобразующим объектом (рис. 1).

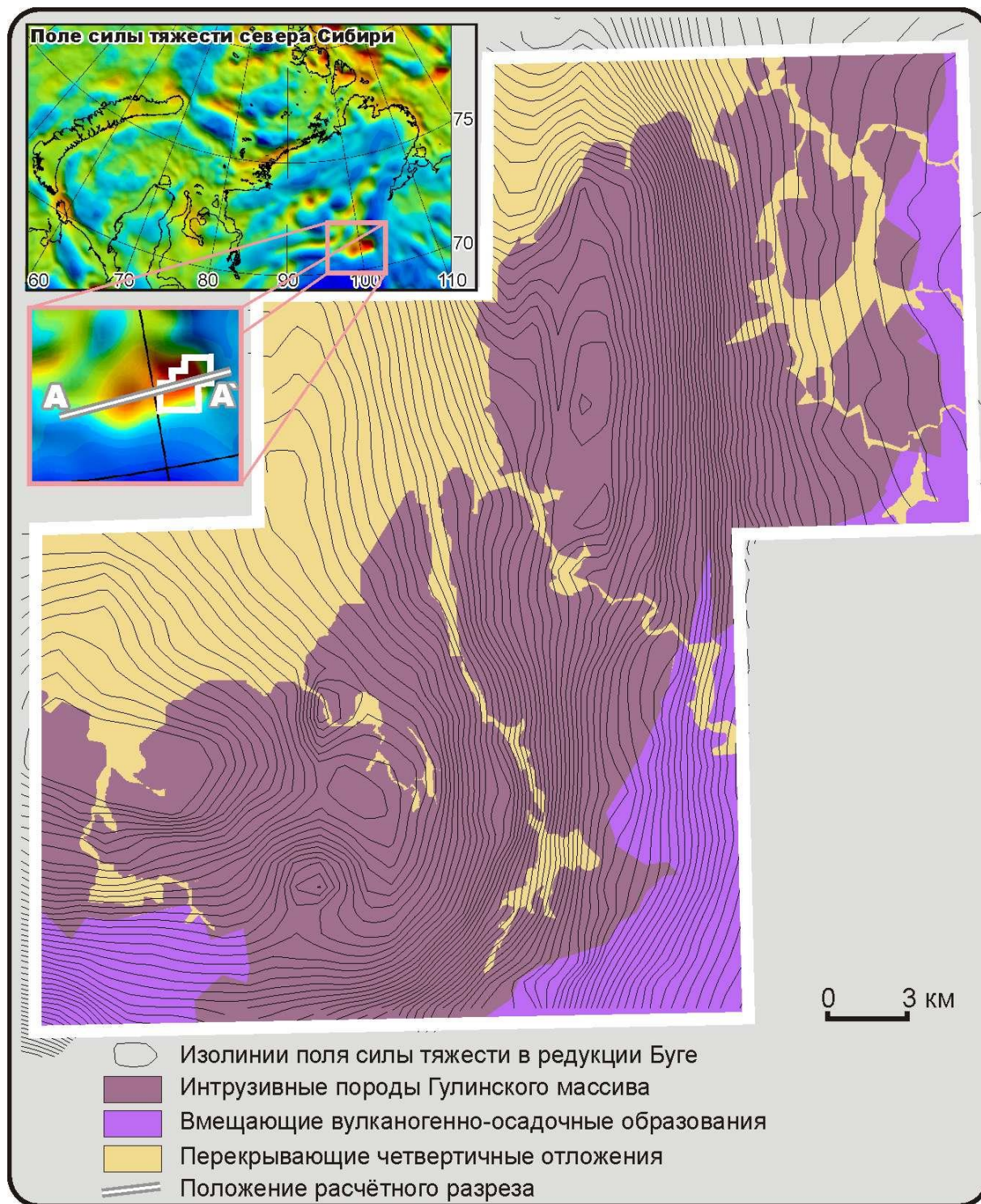


Рис. 1. Поле силы тяжести и интрузивные образования Гулинского массива ультрамафитов [6]

В итоге был сделан вывод о основной объем интрузивных масс двухуровневом строении интрузии, когда расположен в низах земной коры (рис. 2).

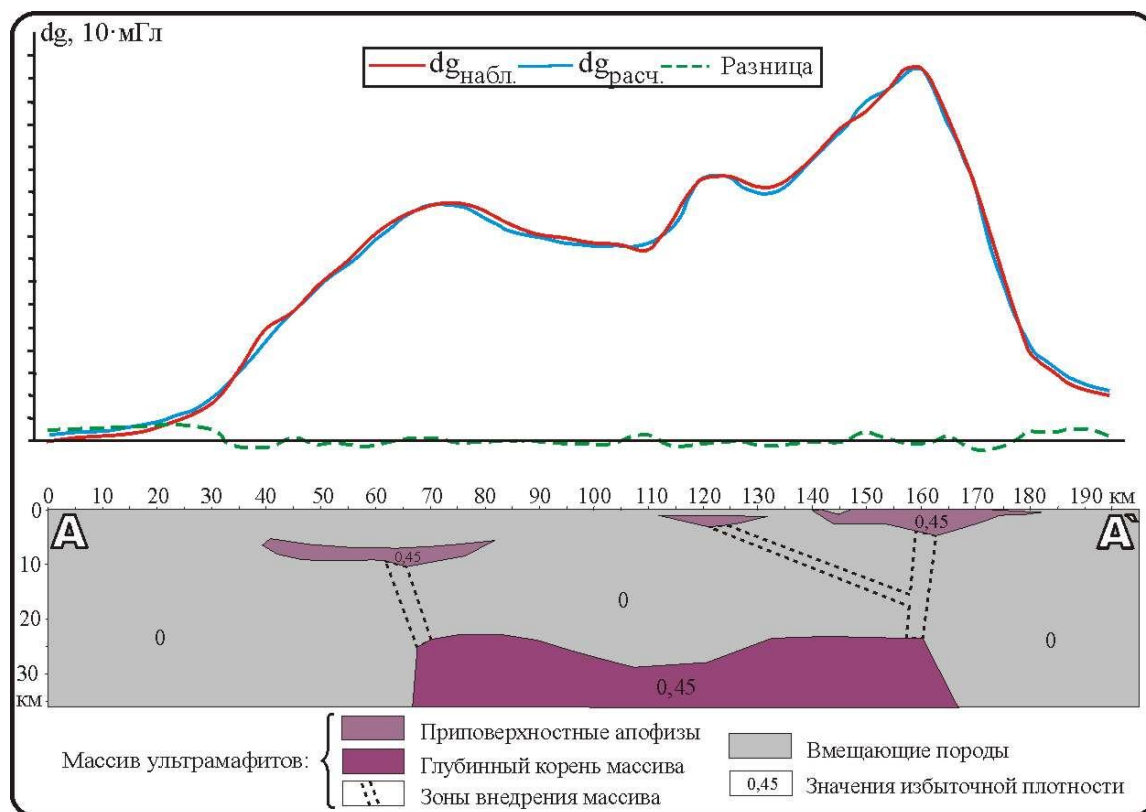


Рис. 2. Принципиальная модель строения Гулинского массива ультрамафитов по направлению, показанному на рис. 1 [6]

Выполненный в последние годы анализ гравитационных аномалий прилегающих районов Енисей-Хатангского прогиба [7] позволяет говорить об еще более широком распространении мантийных плутонов в его основании, так как предполагается единство связанного с ними аномалиеобразующего объекта и корневой части Гулинского массива (рис. 3). В свою очередь, протянувшиеся через весь полуостров положительные аномалии поля силы тяжести тоже традиционно соотносятся с ультрамафитами, поскольку их интенсивность измеряется десятками миллигал и может быть объяснена только высокоплотными внедрениями [8]. Следовательно, еще острее встает вопрос механизма подобных интрузивных процессов, потому как появление столь масштабных объектов определяется геодинамикой континента,

а их становление должно подчиняться неким общепланетарным законам.

Возможность для непосредственного детального изучения влияния гипербазитов на геодинамику появилась в последние годы по результатам нового этапа регионального изучения Таймыра, когда в пределах полуострова и прилегающих территорий был создан уникальный геофизический полигон, включающий на сегодня уже почти 50 тыс. пог. км сейсморазведки МОГТ и электро-разведки методом МТЗ. Он охватывает полосу шириной от 300 до 700 км, тянущуюся почти на 1500 км, и позволяет изучать строение земной коры до глубин 50–60 км с небывалой для континентальной литосферы плотностью – по сети маршрутов, расстояние между которыми местами не превышает 10 км [9–15].

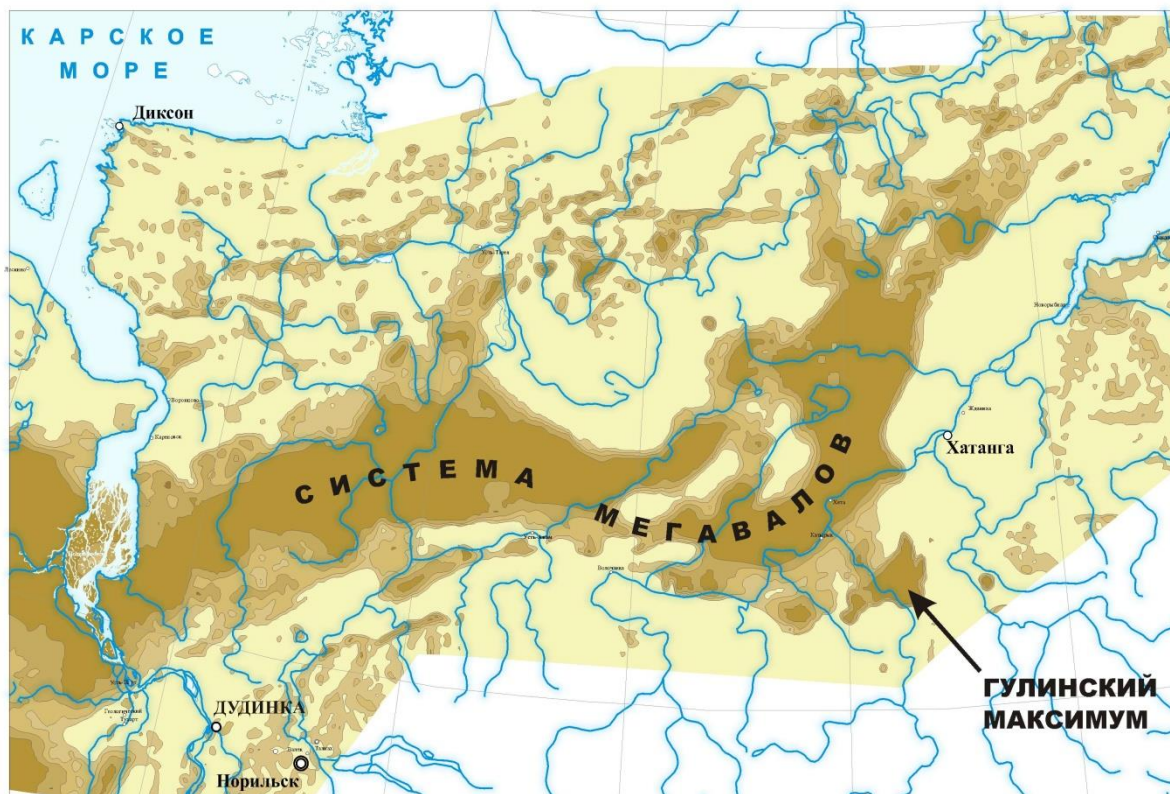


Рис. 3. Аномальные плотности нижней коры по результатам анализа поля силы тяжести [7]

В сочетании с еще более доскональным освещением строения осадочного чехла, который хранит в себе следы всех важнейших тектонических событий, обусловивших современный структурный план региона, это позволяет надежно реконструировать историю и механизмы становления его глубинной геологии. Больше всего исторической информации заключают в себе Енисей-Хатангский прогиб и прилегающие депрессии, где в разрезе и по площади с достаточной степенью надежности прослеживаются отложения, накопившиеся с верхнего протерозоя по мел включительно (рис. 4).

Исходные данные

Осадочный чехол

Материалы сейсморазведки МОГТ выявили, что не только юрско-меловые, но и доюрские уровни геологического разреза гораздо больше подвержены пликативным

дислокациям, нежели нарушены дизъюнктивной тектоникой [14]. Так, амплитуда погружения в Енисей-Хатангском прогибе с рифея по триас составляла до 15 км, в юрско-меловое время в некоторых депоцентрах она возросла еще на 15 км, а осложняющие прогиб складки достигают по амплитуде 3–5 км, на периферии – 10–15 км. В то же время амплитуда разрывных нарушений, картируемых по данным сейсморазведки МОГТ, за редким исключением не превышает первых десятков метров (если не учитывать надвиговые дизъюнктивно-пликативные дислокации и соляную тектонику). Даже смещения по глубинным разломам, картируемые с поверхности в Норильском рудном районе, не превышают первых сотен метров, то есть на фоне пликативных дислокаций они как региональный тектонический фактор себя никак не проявляют.

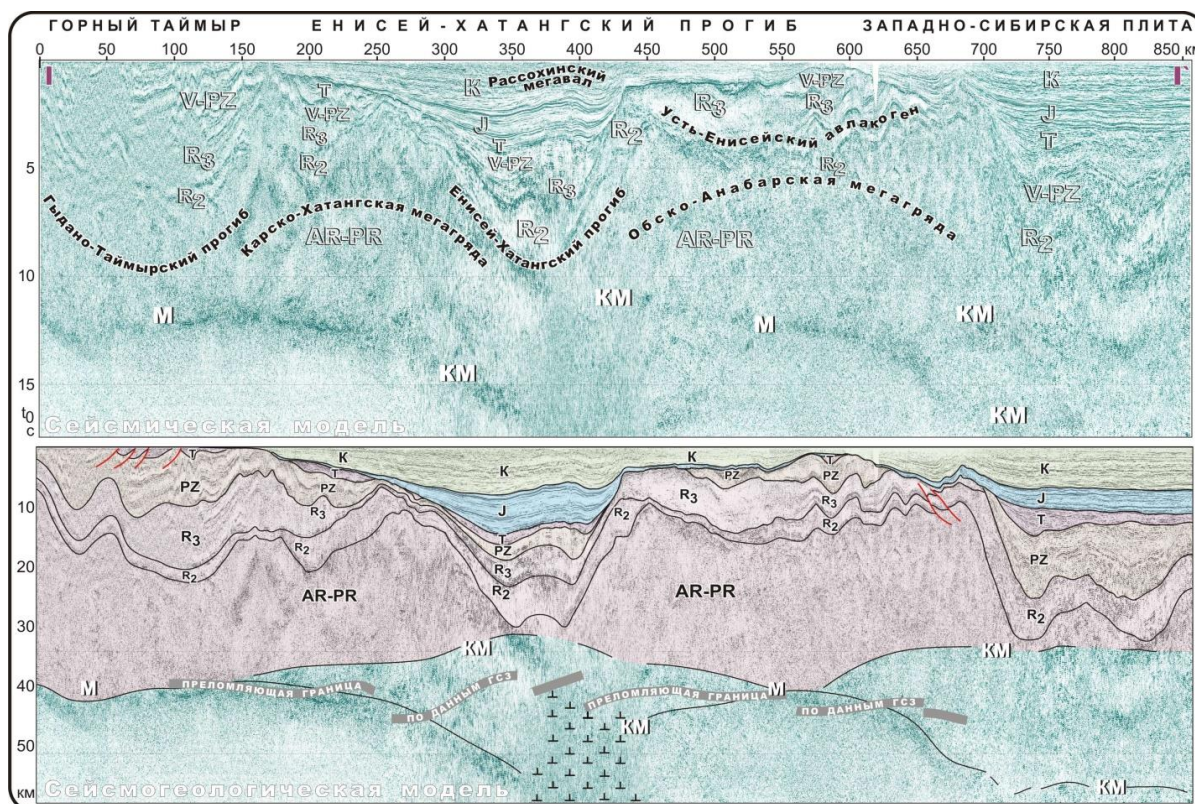


Рис. 4. Сейсмогеологическая модель Западного Таймыра (положение профиля на рис. 5)

Амплитуда разломов несопоставимо меньше амплитуды картируемых складок, поэтому приходится делать вывод, что при формировании основных геоструктур осадки погружались и воздымались преимущественно крупными блоками, без существенного нарушения сплошности.

Исключением из этого правила являются дизъюнктивно-пликативные структуры надвиговых систем, которые распространены по всему полуострову и обеспечивают перемещения аллохтона до десятков километров. Однако их подавляющая часть сосредоточена в верхних, наименее уплотненных слоях разреза, и играет осложняющую роль. Следовательно, появление складок, определяющих глубинное геологическое строение региона, – Обско-Анабарской мегагрязи, Енисей-Хатангского прогиба с осложняющей его системой мегавалов, Карско-Хатангской мегагрязи, Гыдано-Таймырского прогиба и

ряда других (см. рис. 4, рис. 5), – невозможно объяснить надвиганием, поскольку они, в отличие от надвигов, охватывают практически всю толщу земной коры [10, 12–16].

Примером может служить Гыдано-Таймырский прогиб, который максимально осложнен системой надвигов и соляной тектоникой [10, 17, 18]. По материалам сейсморазведки в его пределах верхние несколько километров осадков обладают заметно более сложной дислоцированностью – они нарушены многочисленными разломами и дополнительными складками амплитудой до 2–3 км, затухающими с глубиной (см. рис. 4). Но сейсмические отражения по глубоким горизонтам демонстрируют, что сам прогиб и ограничивающие с юга и севера Карско-Хатангская мегагрязь и Карский свод создают перегиб амплитудой до 20 км, на фоне которого дизъюнктивно-пликативные дислокации соляной и надвиговой тектоники почти не заметны.

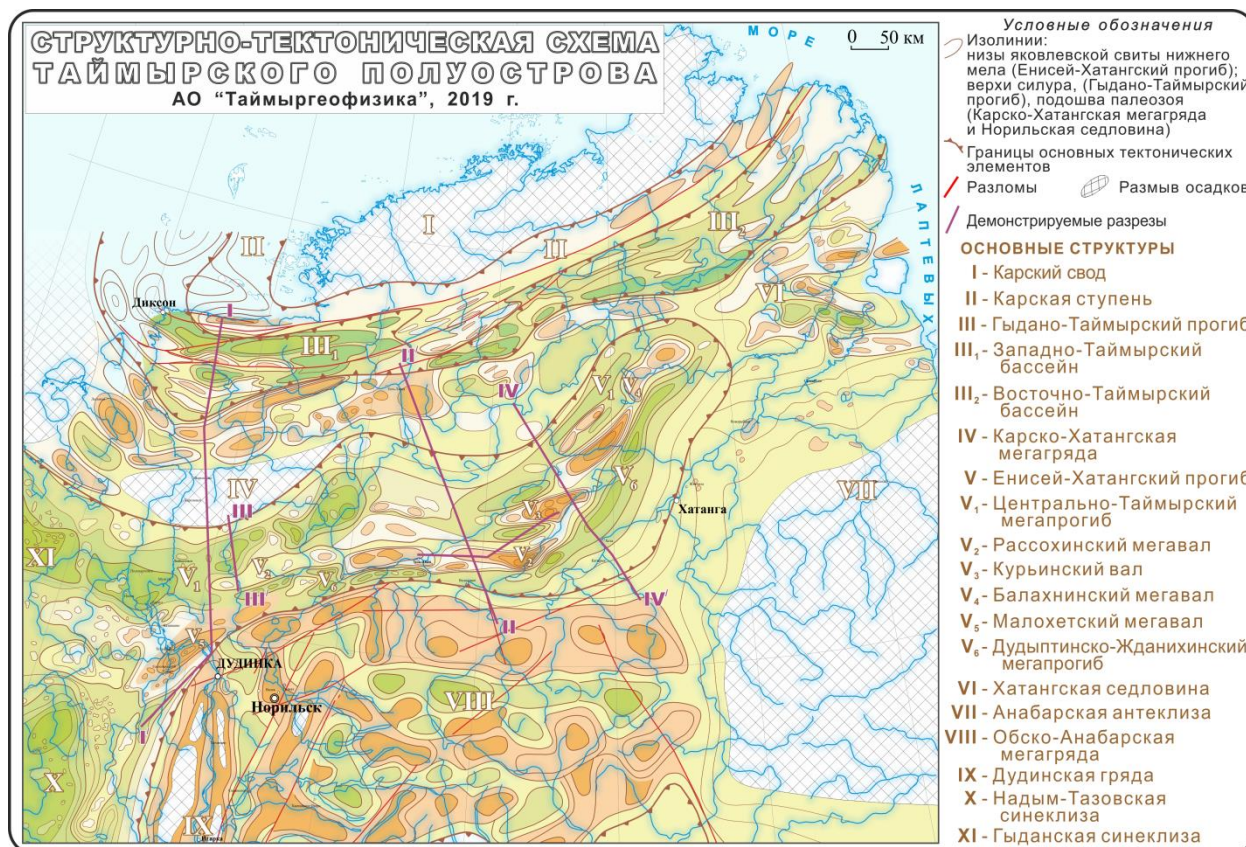


Рис. 5. Структурно-тектоническая схема Таймыра

Палеорекострукции сейсмоданных показывают, что изначально в регионе существовала система складок, включающая синклинали и антиклинали близкого порядка, и погружение в пределах Енисей-Хатангского прогиба сопровождалось воздыманием на его периферии, в пределах Карско-Хатангской и Обско-Анабарской мегагрд [12, 14]. Однако в юре и мелу ограничивающие прогиб валы были захвачены все более расширяющимся опусканием, которое и привело к возникновению мезозойских депрессий Западно-Сибирского типа. Депоцентр этого первоначального погружения наследовал свое положение всю палеозойскую эру и в начале мезозоя, но к концу юры он инверсировал. В меловой период на его месте сформировалась система мегавалов, которая в дальнейшем тоже опускалась, но уже гораздо медленнее и реже. Появились новые

депоцентры на периферии бассейна – Центрально-Таймырский и Дудыптинско-Жданихинский мегапрогибы (см. рис. 5).

Соответственно, при переходе от юры к мелу зафиксирован период значительного повышения тектонической активности.

С ним связаны, во-первых, существенное расширение и резкое ускорение прогибания, приведшее к повсеместному образованию впадин, с глубиной моря до нескольких сот метров, которые заполняются за счет бокового сноса осадков и обуславливают накопление неокомского клиноформного комплекса.

Во-вторых, к этому же времени приурочена инверсия тектонических движений в осевой части прогиба и рост инверсионной системы мегавалов, ставший причиной размыва до 3 км юрских отложений.

В-третьих, в юрское и меловое время продолжилось развитие надвиговых систем, которые активны практически по всему полуострову, включая растущие валы, и маркируют условия регионального сжатия для тектоники Таймыра рассматриваемого периода [12–15].

Инверсия, когда с течением времени депрессии превращаются в поднятия, а поднятия захватываются опусканием, характерны для всех изученных крупнейших геоструктур Таймырского полуострова [14]. Помимо Енисей-Хатангского прогиба, который подвергся пока лишь частичной инверсии, полная смена режима погружения на режим воздымания произошла в Гыдано-Таймырском прогибе, где толщи рифея, палеозоя и триаса мощностью до 20 км сегодня слагают горы Бырранга и местами уже в значительной мере размыты. Карско-Хатангская мегагрязь, разделяющая Гыдано-Таймырский и Енисей-Хатангский прогибы,

будучи источником сноса вследствие своего роста с рифея по триас, в мезозое была охвачена нисходящими движениями, сопровождающими расширение Енисей-Хатангского желоба (см. рис. 4). В своде Обско-Анабарской мегагрязи, воздымавшейся большую часть палеозойской эры и вновь охваченной опусканием на рубеже юры и мела, отмечается авлакоген, заполненный рифейскими и палеозойскими осадками мощностью свыше 10 км, что свидетельствует уже о двукратной тектонической инверсии.

Глубокие горизонты земной коры

Области юрско-мелового погружения, осложняющая их система инверсионных валов и сопредельные структуры, представленные более древними осадками, в существенной степени различаются по строению глубоких горизонтов земной коры, которые по-разному проявляют себя в геофизических полях (см. рис. 4, рис. 6).

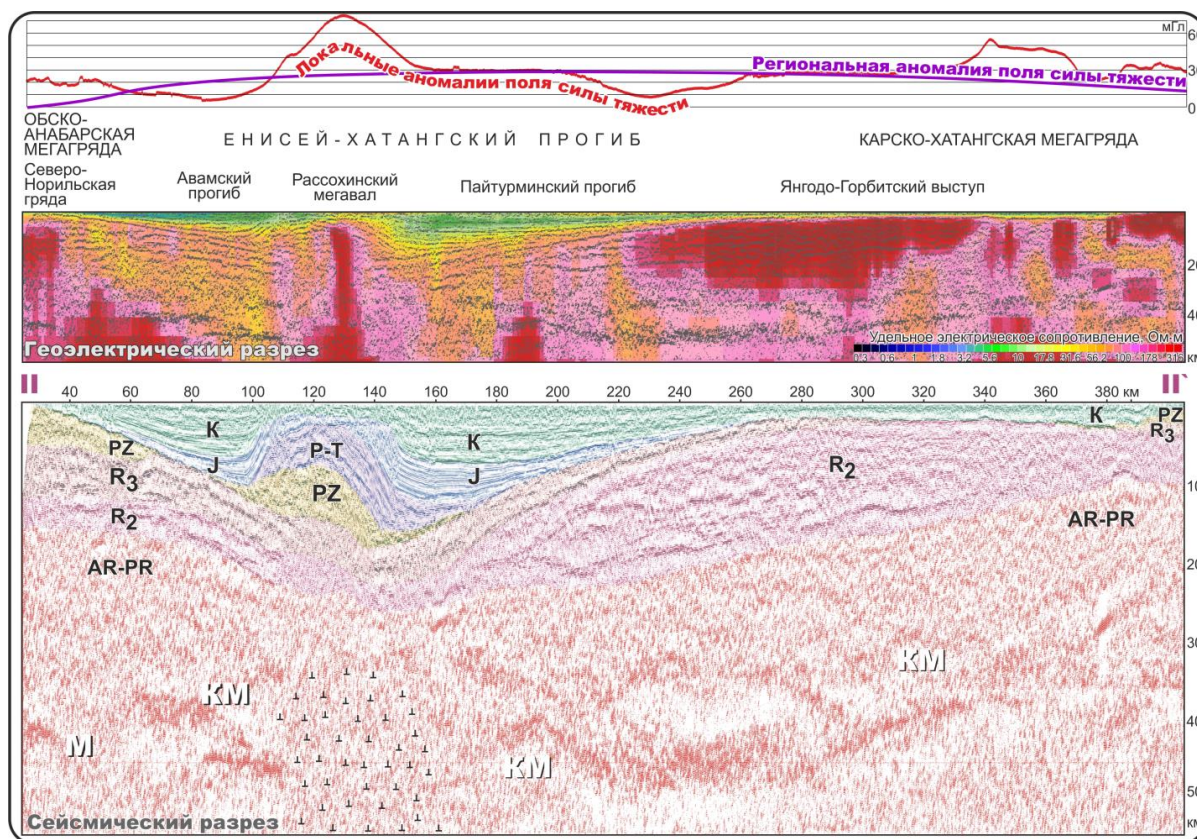


Рис. 6. Геофизическая модель строения Центрального Таймыра [14] (положение профиля на рис. 5)

Наиболее крупная аномальная зона соответствует мезозойским депрессиям. На разрезах МОГТ она проявляется раздвоением сейсмической границы М, в результате чего на глубинах 30–60 км в основании Енисей-Хатангского желоба оконтуривается своего рода линза. Внутри этой линзы оказывается значительная часть консолидированной коры, погружившейся при формировании прогиба, а также мантийное вещество, о присутствии которого свидетельствует положение преломляющей границы Мохоровичича между отражениями от кровли и подошвы линзы (см. рис. 4). Кроме того, в ней заключены переходные по своему составу образования, обладающие промежуточными значениями скорости распространения упругих колебаний (до 6.9–7.4 км/с по продольным волнам и до 4.2 км/с по поперечным [19, 20]). Учитывая

то, что эта линза частично охватывает и нижнюю кору, и верхнюю мантию, ее границы, фиксируемые по данным сейсморазведки на отраженных волнах, должны рассматриваться как кровля и подошва коромантийной смеси (КМ).

Со стороны коры эта смесь преимущественно включает измененные под влиянием мантийных флюидов базальты (прежде всего, уплотненные, согласно региональному максимуму поля силы тяжести амплитудой до 30 мГл, см. рис. 6). А если учитывать, что кровля кристаллического фундамента в наиболее погруженных депрессиях смыкается с границей КМ (рис. 7), то местами можно предполагать участие в процессах уплотнения всей консолидированной коры вплоть до осадочного чехла.

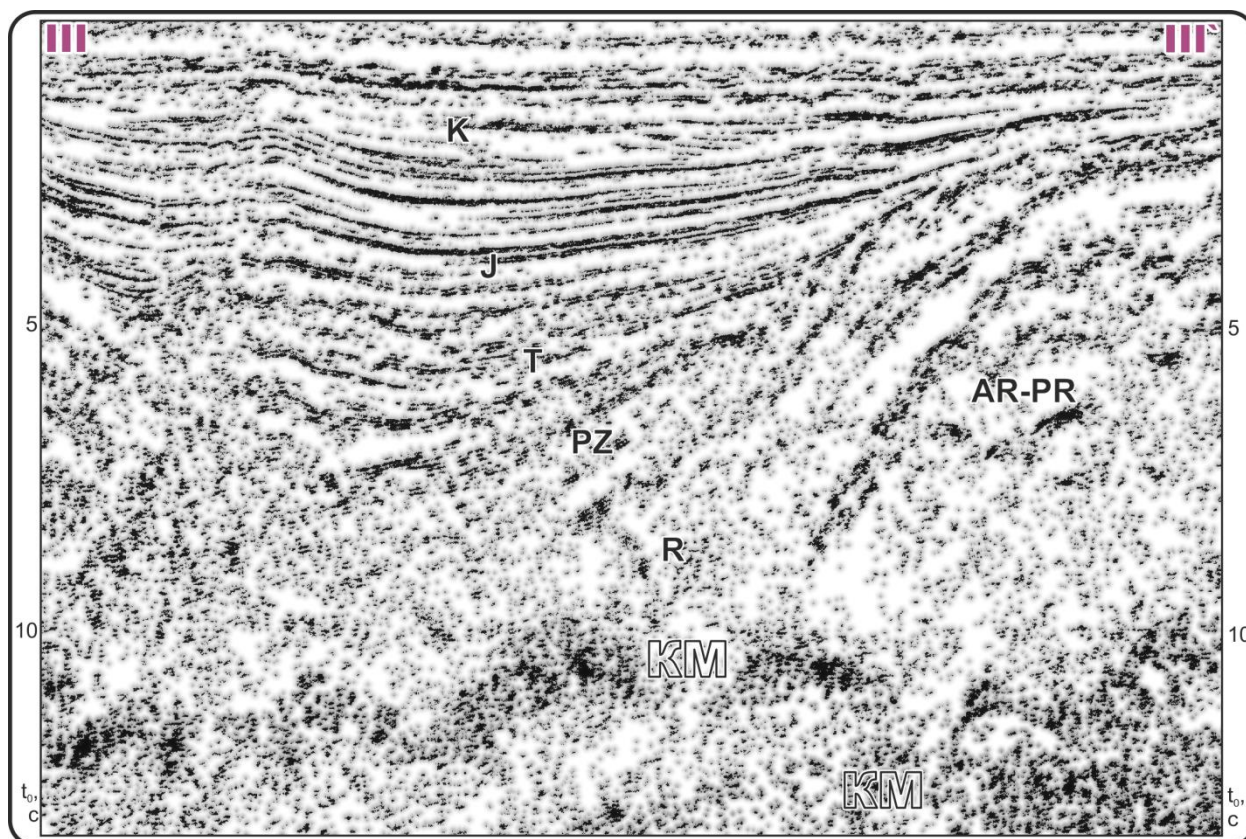


Рис. 7. Взаимоотношение сейсмических отражений от осадков Енисей-Хатангского прогиба с горизонтом КМ (разрез энергии сейсмической записи, положение профиля на рис. 5)

Принимая во внимание, что в относительно компактном слое коромантийной смеси сконцентрированы базальтовый и гранитный слои коры с участием мантийного материала, приходится предполагать там повышенное давление. Совместно с увеличенным значением геотермического градиента, область которого соответствует рассматриваемому уплотнению и юрско-

меловому прогибанию (рис. 8), следует вывод о протекающих на уровне раздела Мохо процессах эклогитизации, напрямую связанных с ужесточением термодинамических условий (рис. 9). Считается, что именно эти процессы служат исходным импульсом для начала формирования глубоких депрессий на континентах [21–25].

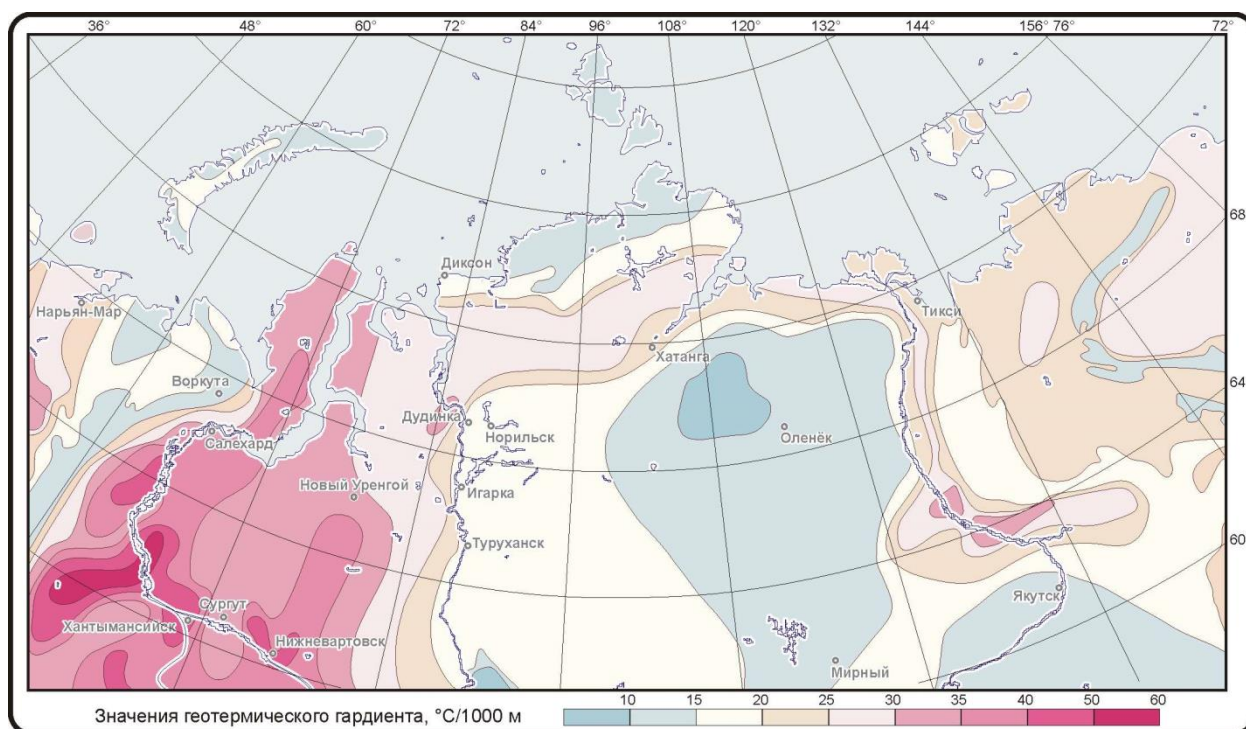


Рис. 8. Выкопировка из карты геотермического градиента земной коры территории СССР [26]

Превращение габбро в гранатовые гранулиты, а затем – в эклогит под влиянием мантийных флюидов подтверждается понижением удельного электрического сопротивления эклогитизированной коромантийной смеси (см. рис. 6), что показывает насыщенность ее флюидами мантийного происхождения [27] и вытекающую из этого повышенную пластичность.

Повышение пластичности, в свою очередь, объясняет появление на границах

размягченного флюидами тела отражающих сейсмических горизонтов, которые на уровне раздела Мохоровича сопоставляют с движением литосферных плит и возникающими при этом расслоением и неровностями в области соприкосновения коры и мантии [28]. Следовательно, и границы КМ можно считать своего рода разломами, формирующимися в результате перемещения кратонов, создающими точки дифракции и отражающие сейсмические площадки.

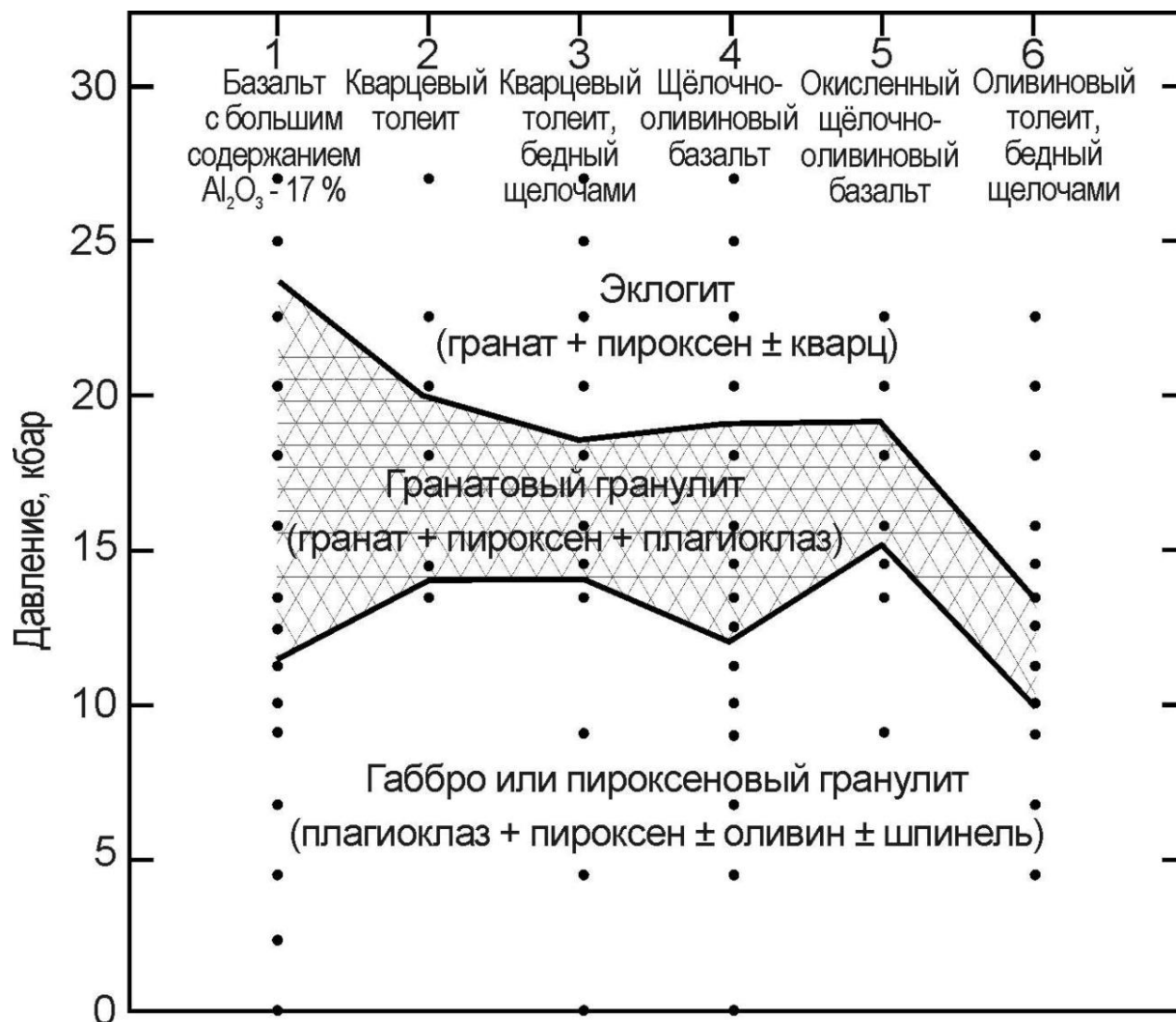


Рис. 9. Основные минеральные ансамбли некоторых базальтов как функция давления при температуре 1100 °С (точки обозначают экспериментальные данные) [29]

Они могут развиваться аналогично надвиговым дислокациям [19], но в большинстве случаев вынуждены замыкаться преимущественно на уровне раздела Мохо – ввиду приуроченности к области повышенной пластичности в основании земной коры, выше которой, изначально, залегают монолитные образования, препятствующие распространению надвигания в направлении дневной поверхности.

Дизъюнктивы такого типа на глубинах 20–30 км достаточно широко распространены не только на полуострове,

но и под акваторией арктических морей [30, 31]. Исходя из этого, можно предполагать распространение генетически близких процессов и на Таймырском шельфе.

Рассматриваемая система геофизических аномалий (в сейсмическом поле отраженных и преломленных волн, в поле силы тяжести, в геоэлектрическом и геотемпературном полях) тянется через Таймыр и Гыдан до 1500–2000 км при ширине от 300 до 700 км, расширяясь в направлении Западной Сибири.

С ней закономерно совпадает в плане область юрско-мелового прогибания, которое, судя по всему, во многом определяется становлением в низах земной коры обширного линзовидного тела с существенно более высокой по отношению к вмещающим образованиям плотностью. Погружение уплотненных литосферных блоков и опускание всей толщи связанных с ними пород происходит под действием гравитационного поля Земли и направлено на изостатическое уравнивание [13–15].

Региональные геофизические аномалии осложнены серией экстремумов более высокого порядка, среди которых выделяются те, что отвечают инверсионным валам – Малохетскому, Рассохинскому, Курьинскому и Балахнинскому. Они характеризуются максимумом удельного электрического сопротивления, охватывающим почти весь изученный интервал геологического разреза, и интенсивным увеличением поля силы тяжести, а также прекращением прослеживания отражающих сейсмических площадок на уровне раздела Мохоровичича и в нижней коре (см. рис. б). Эти аномалии при ширине до 200 км тянутся на сотни километров и в юго-восточной части региона объединяются с аналогичными аномалиями Гулинского массива ультрамафитов (см. рис. 3), что говорит об их возможной генетической близости.

Гулинский массив ультрамафитов

С учетом амплитудных максимумов и высоких градиентов поля силы тяжести до начала 2000-х гг. предполагалось значительное распространение интрузивных ультраосновных горных пород в разрезе. Чтобы выбрать соотносимую с ними гравитационную аномалию, массив должен обладать по простиранию размерами порядка 200 км с мощностью около 10 км и

представлять собою гигантское пластообразное тело, выходящее на поверхность в районе р. Гулэ и полого погружающееся в северо-западном направлении.

Вместе с тем, детальный анализ поля силы тяжести совместно с геологической ситуацией в районе Гулинского комплекса позволил сделать вывод, что выходы гипербазитов на поверхность прослеживаются и за границами соотносимого с ними гравитационного максимума (см. рис. 1). На восточном фланге интрузии область распространения гипербазитовых внедрений без изменения состава пересекает зону повышенного градиента гравитационного поля, по которой традиционно проводились ее границы.

Подобная ситуация, по-видимому, сложилась в результате относительно малой мощности выходящих на поверхность интрузивных образований, в то время как основной максимум силы тяжести связан с залегающим гораздо глубже более крупным объектом. Поскольку, согласно данным сейсморазведки, подстилают Гулинский массив хорошо сохранившиеся осадочные толщи, и внедрение значительного объема интрузивных масс можно предположить только под ними (рис. 10), то искать обуславливающее гравитационную аномалию тело приходится уже на уровне раздела Мохоровичича. Следовательно, подтверждается двухуровневое строение плутона (см. рис. 2), когда большая часть ультрамафитов находится в низах земной коры. Помимо гравитационных аномалий и отражающих сейсмических площадок, она фиксируется также преломляющими границами в кровле и подошве корневой части массива, которые отмечаются по данным глубинных сейсмических зондирований на профиле Воркута-Тикси в виде раздвоения границы М (рис. 11).

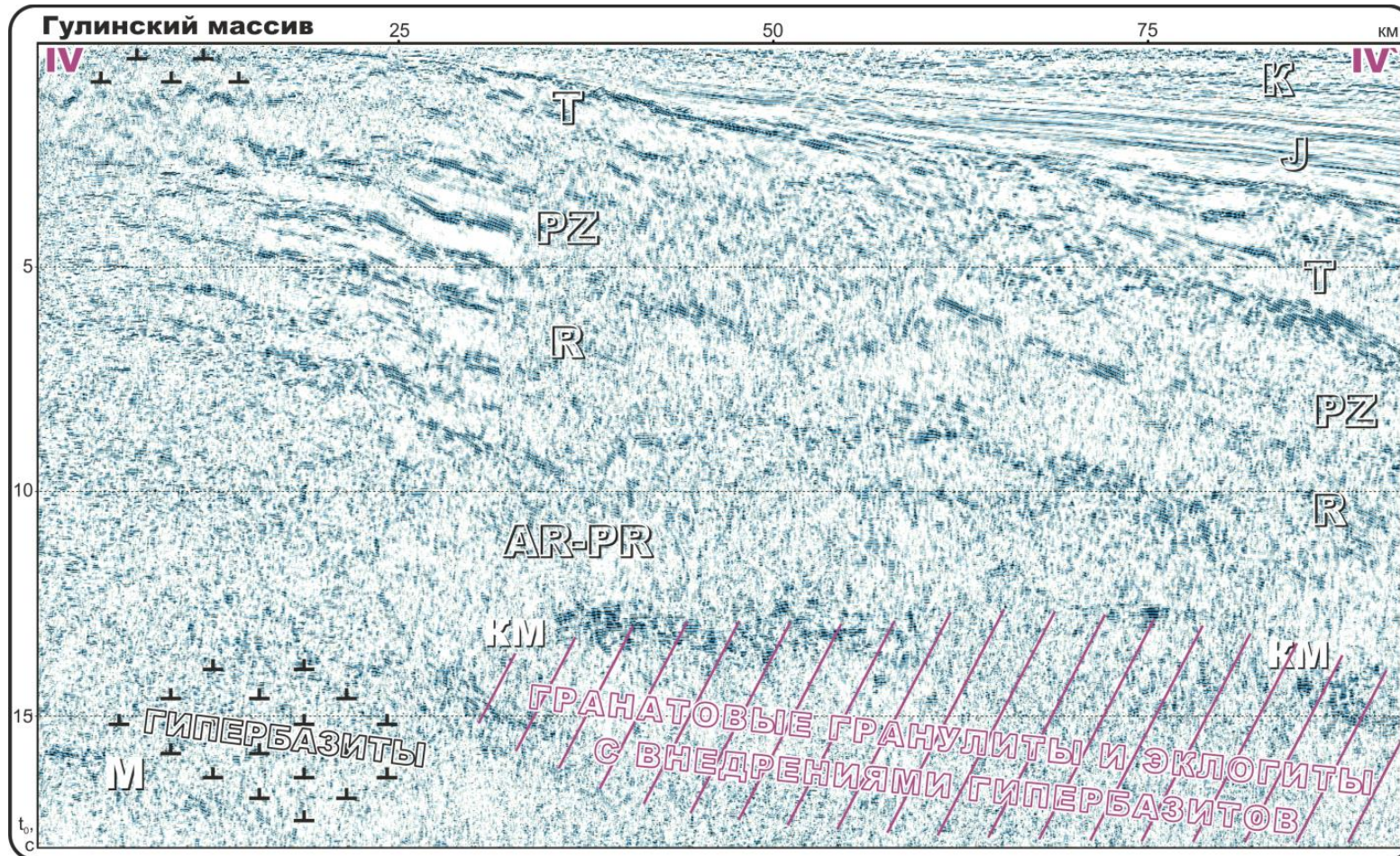


Рис. 10. Наиболее крупные интрузивные и метаморфические тела в районе внедрения Гулинского массива ультрамафитов по данным сейсморазведки МОГТ (положение профиля на рис. 5)

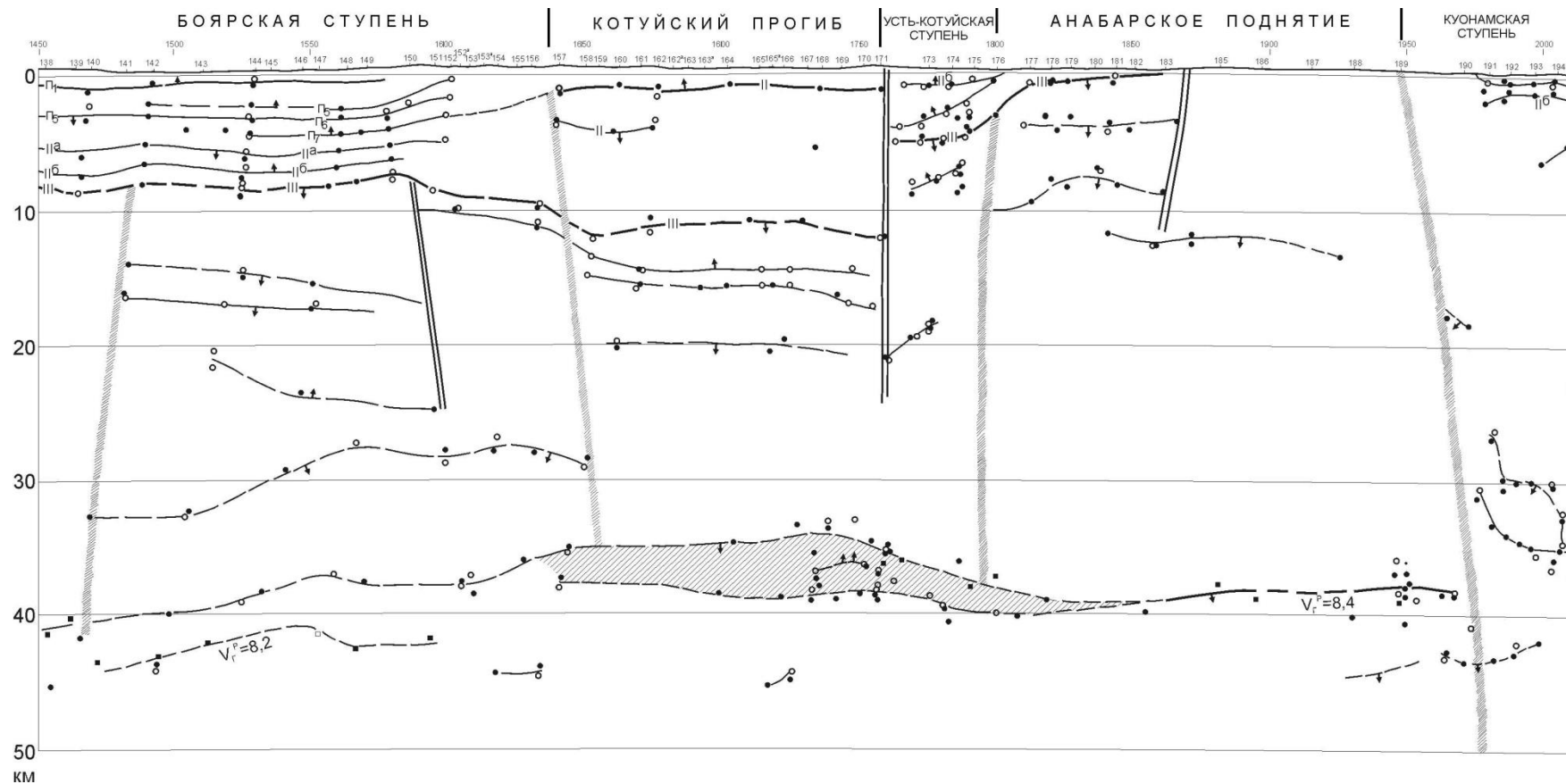


Рис. 11. Область с переходными свойствами на границе коры и мантии (показана штриховкой) по данным глубинных сейсмических зондирований (Чернышев Н.М., Егоркин А.В., 1978)

Объединение плотностных аномалий под Гулинским интрузивом с аналогичными неоднородностями в основании Енисей-Хатангского прогиба (см. рис. 3, 10) может быть признаком существования на уровне раздела Мохоровичича единого колоссального массива гранатовых гранулитов и эклогитов с многочисленными внедрениями мантийных гипербазитов, апофизом которых являются выходящие на поверхность ультрамафитовые тела.

Обсуждение

Наиболее очевидный и всеми признаваемый геодинамический фактор, контролирующий тектонику рассматриваемого региона, – коллизионные процессы на стыке Сибирской платформы и Карского кратона. Создаваемые при этом субмеридионально ориентированные напряжения предопределяют преимущественно субширотное простирание валов и прогибов первого порядка уже с венда. О влиянии горизонтальных напряжений красноречиво свидетельствуют картируемые домезозойские складки, составляющие систему, которая включает антиклинали и синклинали близкого порядка (см. рис. 5), характерные для обстановки сжатия. Показателем такого сжатия служит и Таймырская надвиговая система, дизъюнктивно-пликативные структуры которой максимально широко развиты на побережье морей Карского и Лаптевых, протягиваясь вглубь континента, на расстояние до 500 км [12, 14].

Однако, несмотря на становление геологии Таймыра в условиях коллизии и подчиненность ее субмеридиональным напряжениям с надвиговыми системами соответствующего простирания, самые значимые тектонические элементы региона не связаны напрямую с горизонтальным сжатием и являются инверсионными. В их

пределах воздымание и опускание сменяли друг друга, причем в некоторых случаях можно уверенно говорить, что это происходило неоднократно.

На уровне раздела Мохоровичича картируются контрастные аномалии, которые маркируют изменения плотности и электропроводности, совпадающие в плане с крупнейшими геологическими структурами севера Центральной и Западной Сибири (см. рис. 6). Взаимосвязь появления мегавалов и мегапрогибов с уплотнением или разуплотнением их основания показывает, с одной стороны, протекающий там под действием астеносферных флюидов метаморфизм, с другой – определяющую роль изостатического выравнивания при формировании этих тектонических элементов [14].

Исходя из этого, возникновение мезозойских депрессий севера Центральной и Западной Сибири слабо связано с континентальным рифтогенезом. Более того, с учетом совершенного доминирования пликативных дислокаций и высокой степени сохранности всех уровней осадочного чехла с рифея по кайнозой, рифтогенная природа прогибания в этом случае полностью исключается [12, 14].

В пределах Енисей-Хатангского прогиба рифтовой природе тектоногенеза противоречит также то, что все наиболее значимые глубинные геологические процессы (изменение режима прогибания в его осевой части на режим воздымания, рост инверсионных валов и развитие новых депоцентов) протекали при сохранении сжимающих напряжений. Перманентные условия сжатия, сопровождавшие мезозойское прогибание, доказываются продолжением надвигания в своде растущих валов, которое зафиксировано расходящимися сейсмофациями нижнего мела на фронте аллохтона [12, 14].

Таким образом, впервые прямыми геофизическими наблюдениями показано, что становление тектоники не исчерпывается простыми горизонтальными перемещениями кратонов и связанными с ними деформациями. Согласно полученным данным, глубинное геологическое строение региона, помимо коллизий, объясняется вертикальными напряжениями, связанными с уплотнением или разуплотнением земной коры под воздействием поступающего из мантии вещества и изостатическим выравниванием, компенсирующим эти изменения плотности [14].

Вертикальные тектонические движения не являются однонаправленными и периодически меняют свой знак, о чем говорит инверсионный характер крупнейших структур осадочного чехла Таймыра. В ходе геологического развития на месте прогибов, как правило, образуются валы, а поднятия и гряды в той или иной степени захватываются опусканием. Такие изменения, согласно полученным данным, определяются структурой нижней коры и верхней мантии, мощностью и степенью преобразованности коромантийной смеси, внедрениями в нее гипербазитов.

Самая молодая и наиболее доступная сегодня для анализа инверсия – рост валов в осевой части Енисей-Хатангского прогиба. Согласно классическим геотектоническим представлениям [32, 33] подобную инверсию осевой части депрессий можно объяснить только влиянием дополнительных вертикально ориентированных напряжений, какие создаются, обычно, интрузивными процессами.

В границах прогиба уплотнение нижней коры в значительной мере влияет на погружение уже в триасе, а начиная с юрского времени, практически полностью его обуславливает и приводит к появлению

крупных осадочных бассейнов. С расширением и ускорением прогибания совпадают по времени инверсия осевой части Енисей-Хатангского прогиба и относительно быстрый рост пересекающей его системы мегавалов. Следствием структурной перестройки стали одновременный разрыв более трех километров юрских осадков в своде растущих инверсионных поднятий, а за их пределами – накопление полутораклометровых клиноформных толщ во вновь образованных депоцентрах [13–15].

На момент инверсии депоцентры домелового опускания характеризуются максимальной продолжительностью и стадией метаморфизма на уровне коромантийной смеси. На этих участках эклогитизация ближе всего к завершению, а образующиеся гранулиты и эклогиты существенно превосходят по плотности не только все окружающие образования коры, но и подстилающие гипербазиты верхней мантии, у которых в такой ситуации возникают предпосылки для гравитационного всплывания в вышележащие уровни. Тем более что уплотненная эклогитизированная коромантийная смесь обладает еще и увеличенной пластичностью вследствие флюидонасыщения, которое создает условия для вытеснения метаморфических образований вдоль измененного слоя.

В этой связи при внедрении мантийных гипербазитов можно предположить латеральное перетекание значительных объемов эклогитов в направлении периферийных частей осадочного бассейна, проявлением которого становятся новые депоцентры. Такие контрастные локальные прогибы, непосредственно примыкающие к начинающему свой рост валу, отмечаются при палеовыравнивании по кровле юрских отложений (рис. 12, реконструкция 1).

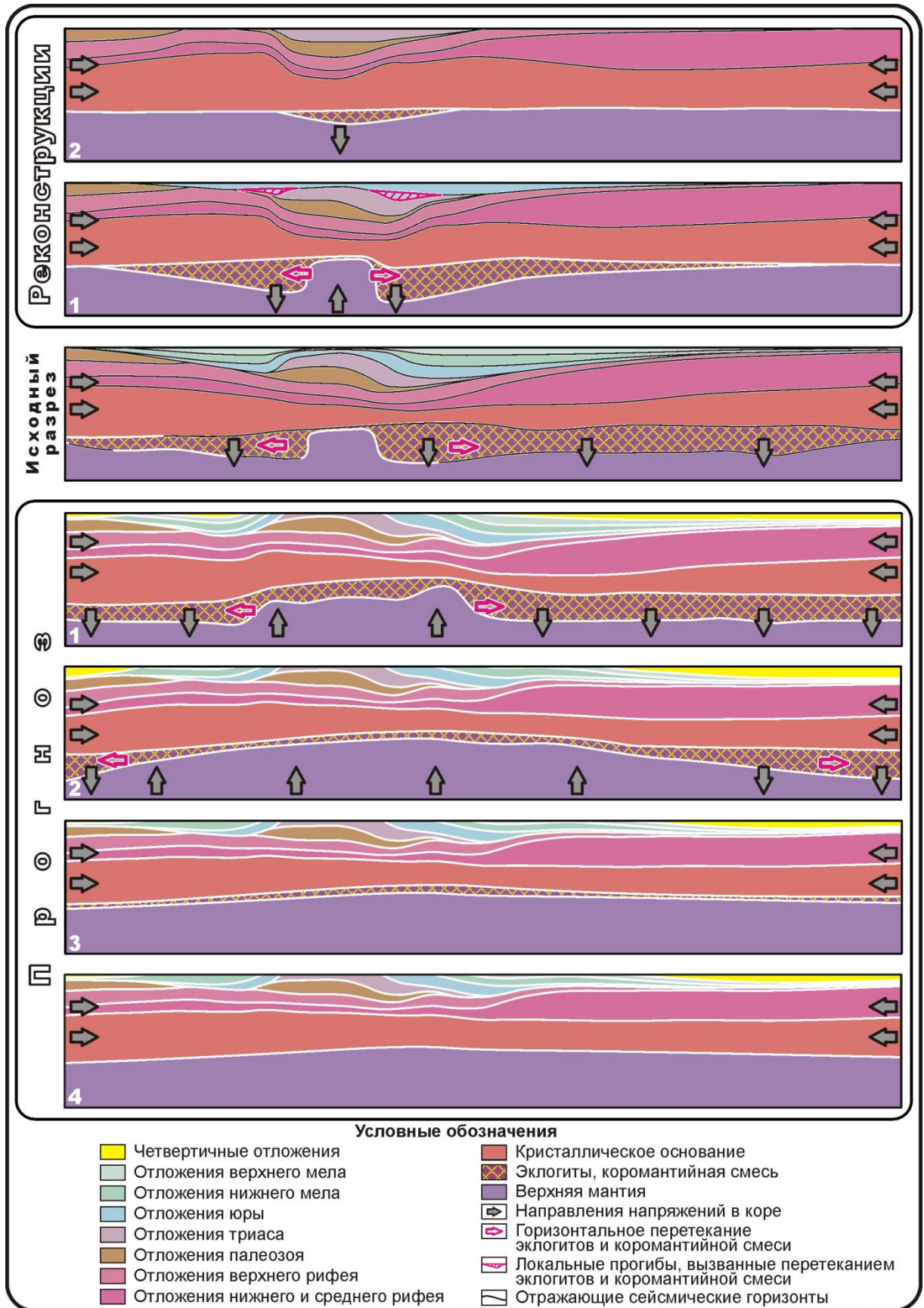


Рис. 12. Палеорекострукции по данным сейсморазведки и прогноз развития Енисей-Хатангского осадочного бассейна (на основе разреза, приведенного на рис. 6)

Очевидно, что, как и другие процессы мезозойского прогибания, эти локальные депоцентры тоже связаны с уплотнением на уровне границы Мохоровичича. В меловой период они постепенно отдаляются от инверсионных валов, что фиксируется максимумами мощности клиноформных тел*. Судя по всему, подобное волнообразное смещение депоцентров свидетельствует о соответствующем перемещении разогретого и размягченного мантийными флюидами, максимально измененного процессами эклогитизации вещества коромантийной смеси, импульсом для которого послужили внедрения гипербазитов, вызвавшие инверсию прогибания и рост поднятий в осевой части древней депрессии.

На следующем этапе, после ускоренного погружения и накопления толщ некомпенсированного осадконакопления, коромантийная смесь, испытавшая «эклогитовую волну» и связанные с ней дополнительные метаморфические изменения, обуславливает продолжение опускания, которое равномерно охватывает расширившийся район ее распространения и компенсируется осадками.

Расширение области, охваченной прогибанием, сохраняется вплоть до кайнозоя. Следовательно, можно предполагать продолжение растекания пластичных эклогитов и гранулитов, сопровождающееся увеличением мощности метаморфического слоя на уровне раздела Мохо (см. рис. 12, исходный разрез).

В свою очередь, увеличение объема метаморфитов и ускорение метаморфизма в

низах коры опять же должно рано или поздно привести к новым интрузиям мантийного вещества и связанным с ними инверсиям, к новому расширению и валов, и депрессий (см. рис. 12, прогноз 1). Вероятно, аналогичные процессы будут продолжаться до тех пор, пока пластичные эклогитизированные образования в основной своей массе не будут вытеснены полностью (либо не отделятся от коры и в той или иной форме не станут частью мантии). При этом существенный дефицит массы коры, ввиду полного или частичного выпадения из разреза кристаллических образований, которые переработаны в области метаморфизма (см. рис. 4, 6, 7), должен будет привести к восстановлению изостатического равновесия (см. рис. 12, прогноз 2). Эта компенсация обусловит наиболее значимые воздымания и размыв осадков, которые в той или иной степени охватят всю площадь прогибания и будут продолжаться, пока уплотнение коры за счет интрузивных и метаморфических процессов не обусловит выравнивание средневзвешенной плотности депрессий с плотностью окружающих геоструктур (см. рис. 12, прогнозы 3 и 4).

Рассмотренный прогноз в отличие от палеореконовструкций, следует считать сугубо ориентировочным, демонстрирующим лишь принципиальные моменты возможного развития тектоники региона. В данном случае для упрощения приходится пренебрегать влиянием внедрения огромных объемов гипербазитов на вещество коры, которые закономерно меняют ее свойства. Воздействие интрузий привело к стиранию всех регулярных сейсмических отражений на уровне раздела Мохо (см. рис. 4, 6) и интенсивному метасоматозу, вызванному высвобождающимися при их остывании термальными растворами.

* См. дополнительный видео-материал к статье – «Динамика формирования неокомского клиноформного комплекса Западной Сибири (смещение депоцентра прогибания в неокоме)» – http://oilgasjournal.ru/issue_29/neocomium.html

Метасоматоз охватил почти весь вышележащий геологический разрез, где заметно выросли и удельное электрическое сопротивление, и плотность, что соответствующим образом отразилось на геоэлектрических разрезах МТЗ и в поле силы тяжести (см. рис. 6). Используемая модель не учитывает также движение прилегающих геоблоков, которые при своем развитии испытали такие же тектонические инверсии (см. рис. 4) и сегодня продолжают расти (горы Бырранга, плато Путорана) в связи с освобождением от эклогитовой составляющей разреза и начавшейся компенсацией результирующего дефицита массы [25].

Если учитывать взаимодействие соседних блоков земной коры, можно предположить также, что какая-то часть пластичного эклогитового слоя попала под Енисей-Хатангский прогиб вследствие горизонтального перетекания со стороны окружающих структур. Подобно тому, как мезо-кайнозойское прогибание, расширяясь, взаимодействует с прилегающими мегагрядами и постепенно втягивает их в новое опускание (см. рис. 4).

Итак, повсеместное погружение в пределах депрессий севера Центральной и Западной Сибири продолжалось до тех пор, пока уплотнение коромантийной смеси под первоначальными депоцентрами не превысило плотность подстилающих перидотитов. Оказавшись перекрыты более плотными и в то же время пластичными толщами, мантийные образования начали внедряться в метаморфические массивы нижней коры. В результате этих интрузий очень быстро (по геологическим меркам) выросли мегавалы, пересекающие сегодня весь Енисей-Хатангский прогиб и маркирующие древний депоцентр. Одновременно расширение и ускорение

прогибания (вследствие выжимания уплотненного вещества в периферийные части бассейна) приводит к волнообразному появлению там новых депоцентров, постепенно удаляющихся от области инверсии (см. рис. 13). В результате аномально высокой скорости опускания они не успевают компенсироваться осадочным материалом, который попадает туда уже только за счет бокового сноса и формирует клиноформный комплекс неокома.

Дополнительное тектоническое воздействие горизонтального сжатия, обусловленного коллизией Карской плиты и Сибирского кратона, интенсифицирует внедрение и обеспечивает выжимание гипербазитов вверх по разрезу. В исключительных ситуациях щелочным ультраосновным породам даже удается достигать поверхности, как это произошло в случае ультрамафитовых массивов на склоне Анабарской антеклизы.

Столь масштабные интрузии, приводящие к инверсии осевой части мегапрогиба и росту мегавалов протяженностью порядка тысячи километров, можно было бы считать уникальными, если бы не широкая известность подобных структур в аналогичных осадочных бассейнах [32]. Для большинства крупных депрессий инверсия является характерным этапом развития, о чем свидетельствует, в частности, история развития всех изученных на Таймыре древних прогибов. Поэтому существует вероятность, что гравитационное всплывание гипербазитов в нижние уровни земной коры является важным геодинамическим фактором и одной из основных причин появления первых поднятий в центре континентальных впадин при начальной стадии смены направлений тектоногенеза, на старте воздымания.

Заключение

Таймырский геофизический полигон предоставляет уникальную возможность изучения строения глубоких горизонтов земной коры и закономерностей, определяющих ее формирование, непосредственно на фактическом материале, без опоры на существовавшие ранее концепции и прогнозы, часть из которых подтверждается новыми данными, другие опровергаются. Благодаря этому открывается возможность для перехода на новый уровень понимания природы деформации континентальной литосферы.

Впервые прямыми геофизическими наблюдениями фиксируются геодинамические механизмы, которые явно не исчерпываются простыми горизонтальными перемещениями кратонов и обусловленными этим движением деформациями. В соответствии с полученными данными глубинное геологическое строение Таймыра, помимо коллизий, объясняется вертикальными напряжениями. На границе коры и мантии отмечаются контрастные аномалии, которые свидетельствуют об обширных изменениях плотности и электропроводности, совпадающих в плане с самыми значимыми тектоническими элементами севера Центральной и Западной Сибири. С одной стороны, уплотненная кора под депрессиями и облегченная под горными районами демонстрируют определяющую роль изостатического выравнивания при становлении этих структур. С другой стороны, флюидонасыщенность, маркируемая понижением удельного электрического сопротивления, доказывает тесную взаимосвязь аномального уплотнения с метаморфизмом. Таким образом,

подтверждаются представления об эклогитизации как основном факторе образования сверхглубоких осадочных бассейнов и, наоборот, освобождении от эклогитовой составляющей под депрессиями как о принципиальном условии для наиболее широкой инверсии и горообразования [21–25].

Подтверждается и предполагавшаяся ранее взаимосвязь региональных прогибов с дизъюнктивами надвигового типа на уровне раздела Мохоровичича [19, 30, 31]. На Таймыре за счет высокой детальности и глубинности геофизических наблюдений последних лет впервые удалось надежно зафиксировать, что эти разломы, ответвляясь от поверхности М, замыкаются, зачастую, на нее же, формируя своеобразный дуплекс по границам высокоплотной и пластичной коромантийной смеси.

Также в новых данных находит косвенное доказательство предполагавшееся ранее перераспределение вещества земной коры в форме горизонтального течения [34]. Палеореконструкции данных сейсморазведки показывают, что рост инверсионных мегавалов сопровождался одновременным образованием депоцентров в самой непосредственной близости от растущего свода, которые в дальнейшем постепенно смещаются, удаляясь от зоны инверсии. Следовательно, погружение, вероятно, увязывается с ростом поднятий и интрузивными явлениями в их основании, из-за которых уплотненное пластичное вещество насыщенного эклогитами коромантийного композита вытесняется из районов внедрения в направлении периферии, где плотность в результате еще больше возрастает, интенсифицируя прогибание.

Вместе с тем, первые же полученные фактические геофизические данные повышенной детальности полностью исключают рифтогенную природу Енисей-Хатангского прогиба и связанных с ним депрессий Западной Сибири. Аналогичный вывод сделан и для целого ряда древних авлакогенов, изученных на Таймыре, поскольку повсеместно зафиксирована высокая степень сохранности всех уровней осадочного чехла с рифея по кайнозой и очевидно подчиненный характер дизъюнктивной тектоники, амплитуды которой никак не могут обеспечить становление наблюдаемых впадин. По-видимому, процессы рифтогенеза на континентах распространены в гораздо меньшей степени, чем предполагалось до сих пор, и большинство осадочных бассейнов на материках обязаны своим появлением метаморфизму, протекающему в низах земной коры, и

переходу габбро в эклогит под влиянием мантийных флюидов.

Инверсионное происхождение крупнейших геоструктур Таймырского полуострова доказывает, что вертикальные перемещения континентальных блоков не являются однонаправленными и периодически меняют свой знак. В ходе геологического развития на месте прогибов, как правило, образуются валы, а поднятия и гряды в той или иной степени захватываются опусканием, что определяется колебанием термодинамических характеристик литосферы, а также гравитационным всплыванием мантийных гипербазитов и горизонтальным течением насыщенного флюидами уплотненного эклогитизированного вещества. Подобные вертикальные колебательные тектонические движения, судя по всему, широко распространены на континентах, то есть их дальнейшее изучение позволит глубже понять глобальную геодинамику в целом.

Литература

1. *Васильев Ю.Р.* Петрология ультрабазитов Гулинского плутона (север Сибирской платформы) // Проблемы петрологии ультраосновных и основных пород. М.: Наука. 1972. С. 7–25.
2. Гулинская интрузия ультраосновных-щелочных пород / Под ред. Н.А. Елисеева и Ю.М. Шейнманна. М.: Госгортехиздат, 1961. 274 с. (Труды НИИГА. Т. 122).
3. *Егоров Л.С.* Форма, структура и эволюция Гулинского массива ультраосновных щелочных пород и карбонатитов // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1989. № 11. С. 41–56.
4. *Жабин А.Г.* О строении и последовательности формирования Гулинского комплекса дунитов, ультраосновных и ультраосновных-щелочных лав, щелочных пород и карбонатитов // Петрология и геохимические особенности комплекса ультрабазитов, щелочных пород и карбонатитов. М.: Наука. 1965. С. 159–192.
5. *Шейнманн Ю.М.* О новой петрографической провинции на севере Сибирской платформы // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1947. № 1. С. 123–134.
6. *Кушнир Д.Г.* Новые представления о глубинном строении Гулинского массива ультрамафитов по геофизическим данным // Геофизика. 2006. № 1. С. 59–61.
7. *Афанасенков А.П., Лыгин И.В., Обухов А.Н., Соколова Т.Б., Кузнецов К.М.* Объемная реконструкция тектонических элементов Енисей-Хатангской рифтовой системы по результатам комплексной геолого-геофизической интерпретации // Геофизика. 2017. № 2. С. 60–70.
8. *Яскевич В.И., Яковлев Ю.К., Четвергов А.П., Ключко В.П., Степанов В.И.* Результаты и проблемы изучения тектоники западной части Сибирской платформы и Енисей-Хатангского

прогиба по геолого-геофизическим данным // Тектоника Сибири. Тектоника и нефтегазоносность Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск. 1980. Т. 10. С. 79–84.

9. *Казаис В.И., Мельник А.И., Кушнир Д.Г.* Эффективность нового этапа региональной сейсморазведки на Таймыре // Перспективы развития нефтегазодобывающего комплекса Красноярского края: Материалы конф. Красноярск. 2007. С. 70–75.

10. *Кушнир Д.Г.* Нефтегазоносность Таймырского побережья по результатам нового этапа региональных работ // Нефть и газ Арктического шельфа: Материалы конф. Мурманск. 2008. С. 96–99.

11. *Кушнир Д.Г.* Эффективность региональных сейсморазведочных работ на Таймыре // Природные ресурсы Красноярского края. 2013. № 18. С. 38–41.

12. *Кушнир Д.Г.* Глубинное геологическое строение и перспективы нефтегазоносности Приенисейской полосы Таймыра и Гыдана // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2016. Т. 11, № 1. С. 8. https://doi.org/10.17353/2070-5379/6_2016

13. *Кушнир Д.Г.* Глобальные геодинамические процессы в свете уникальных геофизических данных, полученных в последние годы на Таймыре // Геосочи-2017. Нефтегазовая геология и геофизика: Материалы конф. 2017. С. 59–62.

14. *Кушнир Д.Г.* Геодинамика полуострова Таймыр по геофизическим данным // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 1. С. 81–92. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0338>

15. *Кушнир Д.Г., Жужель А.С.* Глобальная геодинамика по данным Таймырского геофизического полигона // Результаты комплексного изучения сильнейшего Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 г., его место в ряду важнейших сейсмических событий XXI века на территории России: Материалы XXI науч.-практ. Щукинской конф. с междунар. участием. М.: ИФЗ РАН, 2018. С. 209–213.

16. *Кушнир Д.Г.* Палеозойские мегавалы на севере Центральной и Западной Сибири // Геотектоника. 2006. № 5. С. 85–91.

17. *Верниковский В.А.* Геодинамическая эволюция Таймырской складчатой области. Новосибирск. Изд-во Сиб. отд. РАН, НИЦ ОИГТМ. 1996. 202 с.

18. *Верниковский В.А., Казанский А.Ю., Матушкин Н.Ю., Метёлкин Д.В., Советов Ю.К.* Геодинамическая эволюция складчатого обрамления и западная граница сибирского кратона в неопротерозое: геолого-структурные, седиментологические, геохронологические и палеомагнитные данные // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 4. С. 502–519.

19. *Костюченко С.Л.* Структура коры и глубинные механизмы формирования Приарктических континентальных осадочных бассейнов Сибири // Региональная геология и металлогения. 2000. № 10. С. 125–135.

20. *Сурков В.С., Смирнов Л.В., Жеро О.Г.* Раннемезозойский рифтогенез и его влияние на структуру литосферы Западно-Сибирской плиты // Геология и геофизика. 1987. № 9. С. 3–11.

21. *Артюшков Е.В.* Геодинамика. М.: Наука. 1979. 328 с.

22. *Артюшков Е.В.* Механизм образования сверхглубоких осадочных бассейнов. Растяжение литосферы или эклогитизация? // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 12. С. 1675–1686.

23. *Артюшков Е.В., Чехович П.А.* Изменения уровня моря и быстрые движения земной коры в платформенных областях в позднем палеозое // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 10. С. 1567–1592.

24. *Артюшков Е.В.* Новейшие поднятия земной коры как следствие инфильтрации в литосферу мантийных флюидов // Геология и геофизика. 2012. Т. 53, № 6. С. 738–760.
25. *Артюшков Е.В., Кориковский С.П., Массон Х.-Й., Чехович П.А.* Новейшие поднятия коры на докембрийских кратонах. Основные закономерности и возможные механизмы // Геология и геофизика. 2018. Т. 59, № 11. С. 1737–1764. <https://doi.org/10.15372/GiG20181101>
26. Карта теплового потока территории СССР и сопредельных районов. Масштаб 1 : 10 000 000 / Под ред. А.А. Смыслова. СПб.: ВСЕГЕИ, Мингео СССР. 1978.
27. *Jones A.G.* Electrical properties of the lower continental crust // Continental lower crust / Ed. by D.M. Fountain, R.J. Arculus, R.W. Kay. Amsterdam: Elsevier, 1992. P. 81–143.
28. *Павленкова Н.И.* Развитие представлений о сейсмических моделях земной коры // Геофизика, 1996. № 4. С. 11–19.
29. *Жарков В.Н.* Внутреннее строение Земли и планет. Элементарное введение в планетную и спутниковую геофизику. М.: ООО «Наука и образование». 2013. 414 с.
30. *Павленкова Н.И., Кашубин С.Н., Гонтовая Л.И., Павленкова Г.А.* Глубинное строение и геодинамика Охотоморского региона // Региональная геология и металлогения. 2018. № 76. С. 70–82.
31. *Павленкова Н.И., Кашубин С.Н., Гонтовая Л.И.* Глубинные нарушения и сейсмичность охотского моря // Результаты комплексного изучения сильнейшего Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 г., его место в ряду важнейших сейсмических событий XXI века на территории России: Материалы XXI науч.-практ. Щукинской конф. с междунар. участием. М.: ИФЗ РАН, 2018. С. 280–284.
32. *Белоусов В.В.* Основы геотектоники. 2-е изд. М.: Недра. 1989. 382 с.
33. *Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. М.: Наука. 1975. 536 с.
34. *Павленкова Н.И., Кашубин С.Н., Павленкова Г.А.* Земная кора глубоких платформенных впадин Северной Евразии и природа их формирования // Физика Земли. 2016. № 5. С. 150–164. <https://doi.org/10.7868/S0002333716050124>

Hyperbasites as a factor of geodynamics: the results of the surveys at the Taimyr geophysical site

D.G. Kushnir

Taimyrgeofizika JSC (Bashneftegeofizika Group of Companies JSC), Dudinka

E-mail: d.kushnir@tmrgeo.ru

Abstract. Seismic data indicate the widespread inversion origin of the largest geological structures of the Taimyr Peninsula and record repeated changes of the direction of tectonic movements. The inversion the Yenisei-Khatanga trough led to the formation of a system of megaarcs over the ancient depocenter containing massive hyperbasite intrusions at the Moho level, which are marked by the gravity maximum. These intrusive processes are an important factor that can initiate inversion and contribute significantly to its development under permanent compressional tectonic regime in the region.

According to the geophysical data, the development of troughs in the north of Central and Western Siberia is associated with the formation of eclogites under the depocenters, at the Moho level. Consistent with the electrical resistivity anomalies, eclogites are plastic and overlap mantle hyperbasites of lower density that leads to gravitational buoying up of ultramafic formations. This, along with metamorphic and metasomatic processes, acts as an impulse for the uplift in the axial parts of the troughs. Simultaneously, expansion and acceleration of sagging, due to the displacement of plastic eclogites and crystal-mantle mixture from the penetration zone towards the peripheral parts of the sedimentary basin, result in the uncompensated sediment accumulation and the formation of the Neocomian clinoform complex.

Keywords: Taimyr, geodynamics, tectonics, upper mantle, crust, Mohorovichich border, coromancy mixture, eclogites, Yenisei-Khatanga trough, Gulinsky ultramafic massif, Neocomian clinoform sedimentary complex.

Citation: *Kushnir D.G.* Hyperbasites as a factor of geodynamics: the results of the surveys at the Taimyr geophysical site // Actual Problems of Oil and Gas. 2020. Iss. 2(29). P. 3–27. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art1> (In Russ.).

References

1. *Vasiliev Yu.R.* Petrology of ultrabasites of the Gulinsky pluton (the north of the Siberian platform) // Problems of petrology of ultrabasic and basic rocks. Moscow: Nauka. 1972. P. 7–25. (In Russ.).
2. Gulinskaya intrusion of ultrabasic alkaline rocks / Ed. by N.A. Eliseev and Yu.M. Sheinmann. Moscow: Gosgortekhizdat, 1961. 274 p. (NIIGA Proceedings, Vol. 122). (In Russ.).
3. *Egorov L.S.* Form, structure and evolution of the Gulinsky massif of ultrabasic alkaline rocks and carbonatites // Izv. AN USSR. Ser. Geol. 1989. No. 11. P. 41–56. (In Russ.).
4. *Zhabin A.G.* On the structure and sequence of formation of the Gulinsky complex of dunites, ultrabasic and ultrabasic-alkaline lavas, alkaline rocks and carbonatites // Petrology and geochemical features of the complex of ultrabasites, alkaline rocks and carbonatites. Moscow: Nauka, 1965. P. 159–192. (In Russ.).
5. *Sheinmann Yu.M.* On the new petrographic province in the north of the Siberian platform // Izv. AN USSR. Ser. Geol. 1947. No. 1. P. 123–134. (In Russ.).

6. *Kushnir D.G.* New ideas about the deep structure of the Gulinsky ultramafic massif based on geophysical data // *Geophysics*. 2006. No. 1. P. 59–61. (In Russ.).
7. *Afanasenkov A.P., Lygin I.V., Obukhov A.N., Sokolova T.B., Kuznetsov K.M.* Volume reconstruction of tectonic elements of the Yenisei-Khatanga rift system based on the results of complex geological and geophysical interpretation // *Geophysics*. 2017. No. 2. P. 60–70. (In Russ.).
8. *Yaskevich V.I., Yakovlev Yu.K., Chetvergov A.P., Klyuchko V.P., Stepanov V.I.* Results and problems of studying the tectonics of the Western part of the Siberian platform and the Yenisei-Khatanga trough from geological and geophysical data // *Tectonics and oil and gas potential of Siberia and the Far East*. Novosibirsk. 1980. Vol. 10. P. 79–84. (In Russ.).
9. *Kazais V.I., Melnik A.I., Kushnir D.G.* Efficiency of a new stage of regional seismic exploration on Taimyr // *Prospects of Development of the Oil and Gas Production Complex of the Krasnoyarsk Territory: Proceedings of the Conference*. Krasnoyarsk, 2007. P. 70–75. (In Russ.).
10. *Kushnir D.G.* Oil and gas potential of the Taimyr coast based on the results of a new stage of regional work // *Oil and Gas of the Arctic Shelf: Proceedings of the Conference*. Murmansk, 2008. P. 96–99. (In Russ.).
11. *Kushnir D.G.* Effectiveness of regional seismic surveys on Taimyr // *Natural Resources of the Krasnoyarsk Territory*. 2013. No. 18. P. 38–41. (In Russ.).
12. *Kushnir D.G.* Deep geological structure and prospects of oil and gas potential of the Yenisei strip of Taimyr and Gydan // *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya i Praktika*. 2016. Vol. 11, No. 1. P. 8. https://doi.org/10.17353/2070-5379/6_2016 (In Russ.).
13. *Kushnir D.G.* Global geodynamic processes in the light of unique geophysical data obtained in recent years on Taimyr // *Geosochi-2017. Oil and Gas Geology and Geophysics: Proceedings of the Conference*. 2017. P. 59–62. (In Russ.).
14. *Kushnir D.G.* Geodynamics of the Taimyr Peninsula from geophysical data // *Geodynamics and Tectonophysics*. 2018. Vol. 9, No. 1. P. 81–92. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0338> (In Russ.).
15. *Kushnir D.G., Zhuzhel A.S.* Global geodynamics according to the data of the Taimyr geophysical polygon // *Results of a comprehensive study of the strongest Altai (Chuya) earthquake in 2003, its place among the most important seismic events of the XXI century on the territory of Russia: Proceedings of the 2nd Scientific and Practical Shchukin Conference with International Participation*. Moscow: IFZ RAS, 2018. P. 209–213. (In Russ.).
16. *Kushnir D.G.* Paleozoic swells in the north of central and western Siberia // *Geotectonics*. 2006. Vol. 40, No. 5. P. 399–404.
17. *Vernikovsky V.A.* Geodynamic evolution of the Taimyr folded region. Novosibirsk: Publishing House of the Sib. Br. of the RAS, SPC UIGGM. 1996. 202 p. (In Russ.).
18. *Vernikovsky V.A., Kazansky A.Yu., Matushkin N.Yu., Metelkin D.V., Sovetov Yu.K.* The geodynamic evolution of the folded framing and the western margin of the Siberian craton in the Neoproterozoic: geological, structural, sedimentological, geochronological and paleomagnetic data // *Russian Geology and Geophysics*. 2009. Vol. 50, No. 4. P. 380–393. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.03.014>
19. *Kostyuchenko S.L.* Structure of the crust and deep mechanisms of formation of the Arctic continental sedimentary basins of Siberia // *Regional Geology and Metallogeny*. 2000. No. 10. P. 125–135. (In Russ.).

20. *Surkov B.C., Smirnov L.V., Zhero O.G.* Early Mesozoic riftogenesis and its influence on the structure of the lithosphere of the West Siberian plate // *Geologiya i Geofizika*. 1987. No. 9. P. 3–11. (In Russ.).
21. *Artyushkov E.V.* Geodynamics. Moscow: Nauka. 1979. 328 p. (In Russ.).
22. *Artyushkov E.V.* Mechanism of formation of superdeep sedimentary basins: lithospheric stretching or eclogitization? // *Russian Geology and Geophysics*. 2010. Vol. 51, No. 12. P. 1304–1313. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.11.002>
23. *Artyushkov E.V., Chekhovich P.A.* Sea level changes and rapid crustal movements in cratonic areas in the Late Paleozoic // *Russian Geology and Geophysics*. 2011. Vol. 52, No. 10. P. 1236–1255. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.09.014>
24. *Artyushkov E.V.* Recent uplift of the Earth's crust as a consequence of infiltration into the lithosphere of mantle fluids // *Russian Geology and Geophysics*. 2012. Vol. 53, No. 6. P. 566–582. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.04.005>
25. *Artyushkov E.V., Korikovskiy S.P., Massonne H.-J., Chekhovich P.A.* Recent crustal uplift of Precambrian cratons: key patterns and possible mechanisms // *Russian Geology and Geophysics*. 2018. Vol. 59, No. 11. P. 1389–1409. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.10.001>
26. Heat flow map of USSR territory and adjacent areas. Scale 1 : 10,000,000 / Ed. by A.A. Smyslov. St. Petersburg: VSEGEI, MINGEO USSR. 1978. (In Russ.).
27. *Jones A.G.* Electrical properties of the lower continental crust // *Continental lower crust* / Ed. by D.M. Fountain, R.J. Arculus, R.W. Kay. Amsterdam: Elsevier, 1992. P. 81–143.
28. *Pavlenkova N.I.* Development of ideas about seismic models of the Earth's crust // *Geophysics*. 1996. No. 4. P. 11–19. (In Russ.).
29. *Zharkov V.N.* Internal structure of the Earth and planets. Elementary introduction to planetary and satellite Geophysics. Moscow: Nauka i Obrazovanie, 2013. 414 p. (In Russ.).
30. *Pavlenkova N.I., Kashubin S.N., Gontova L.I., Pavlenkova G.A.* Deep structure and geodynamics of the Okhotsk Sea region // *Regional Geology and Metallogeny*. 2018. No. 76. P. 70–82. (In Russ.).
31. *Pavlenkova N.I., Kashubin S.N., Gontova L.I.* Deep disturbances and seismicity of the sea of Okhotsk // *Results of a comprehensive study of the strongest Altai (Chuya) earthquake in 2003, its place among the most important seismic events of the XXI century on the territory of Russia: Proceedings of the XXI Scientific and Practical Shchukin Conference*. Moscow: IFZ RAS, 2018. P. 280–284. (In Russ.).
32. *Belousov V.V.* Fundamentals of geotectonics. 2nd ed. Moscow: Nedra. 1989. 382 p. (In Russ.).
33. *Gzovsky M.V.* Fundamentals of tectonophysics. 1975. 536 p. (In Russ.).
34. *Pavlenkova N.I., Kashubin S.N., Pavlenkova G.A.* The Earth's crust of the deep platform basins in the Northern Eurasia and their origin // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2016. Vol. 52, No. 5. P. 770–784. <https://doi.org/10.1134/S1069351316050128>