

НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ПАЛЕОГЕОГРАФИИ, ВОЗРАСТУ ФУНДАМЕНТА И СЕЙСМИЧНОСТИ ВОСТОЧНОГО СЕКТОРА РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Прокопьев А.В.¹, Ершова В.Б.², Акинин В.В.³, Козьмин Б.М.¹

¹ *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН (ИГАБМ СО РАН), Якутск, Россия*

² *Институт Наук о Земле Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет», Санкт-Петербург, Россия*

³ *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило Дальневосточного отделения Российской академии наук (СВКНИИ ДВО РАН), Магадан, Россия*
prokopiev@diamond.ysn.ru

Введение

Восток Арктики является перспективным регионом для прироста ресурсной базы РФ. Труднодоступность, короткое время для проведения полевых работ определяют все еще относительно слабую изученность восточных районов Арктики. Моря Лаптевых и Восточно-Сибирское являются потенциально нефтегазоносными, но в связи с отсутствием на акватории глубоких скважин судить об их геологическом строении и тектонической истории возможно лишь изучая обнажения прилегающей континентальной части и островов. Представленное исследование посвящено реконструкции тектонической истории восточной части арктического сектора Сибири и архипелага Новосибирских островов на основе новых изотопно-геохимических данных, структурно-геологических и сейсмологических исследований и направлено на изучение палеогеографии, тектоники, глубинного строения и сейсмичности зоны сочленения морей Восточно-Сибирского и Лаптевых.

1) На основе седиментологических данных и датирования обломочных цирконов из верхнепалеозойских песчаников о. Котельный (архипелаг Новосибирские острова) реконструированы источники сноса осадочного материала. Впервые установлено, что для тектонического блока, к которому принадлежит о. Котельный, в позднем палеозое основными питающими провинциями могли служить магматические и метаморфические породы Гренвилльского, Тиманского, Каледонского и Уральского орогенных поясов, но не Сибирского кратона и его складчатого обрамления [10].

Проведено датирование обломочных цирконов из трех образцов из франских (нерпалахская свита), фамен-турнейских (чекурская свита) и верхнекаменноугольно-пермских отложений о. Котельный (рис. 1, 2А) U/Pb методом в лаборатории Apatite to Zircon (Университет штата Вашингтон) с использованием LA-ICP-MS. Результаты U/Pb исследования показаны на рис. 2Б.

В настоящее время имеются две модели, рассматривающие расположения архипелага в палеозое: 1) вдоль окраины Лаврентии [22] и 2) вдоль окраины Сибири [12 и др.].

Возраста цирконов из верхнедевонских-нижнекаменноугольных обломочных пород показывают отчетливые пики в диапазоне 630–1700 млн. лет. Многочисленные цирконы с возрастом 1090–940 млн. лет предполагают существенное поступление осадков с Гренвилльского-Свеконорвежского орогенов [8]. Эти орогены простирались от восточной прибрежной полосы Северной Америки до юго-западной Скандинавии, возможно, протягиваясь к северу до края Евразийского бассейна [13]. Популяция обломочных

цирконов возрастом 2.0–1.3 млрд. лет может быть отнесена к ранней эволюции Гренвилльской провинции [18] и коррелирует с возрастом мезопротерозойских и самых поздних палеопротерозойских террейнов в Свеконорвежском орогене [7], в то время как магматические и метаморфические породы этого временного интервала имеют ограниченное распространение в фундаменте Сибирского кратона [21]. Для фундамента Сибирского кратона типичны архейские возраста и в диапазоне 1800–1950 млн. лет. Однако лишь несколько цирконов близких этому возрасту были датированы в изученных образцах.

Многочисленные позднепротерозойские–раннекембрийские цирконы в верхнедевонских–нижнекарбоновых осадках предполагают существенный вклад кластического материала из гранитоидов и/или осадочных пород (переотложение), связанных с Тиманским складчатым поясом [13].

Присутствие ордовик–силурийских цирконов в исследованных образцах свидетельствует о поступлении в бассейн осадконакопления продуктов разрушения Каледонского орогена, фрагменты которого находятся в северной Скандинавии, на востоке Гренландии и на севере Британии [17]. Цирконы позднепротерозойского–раннекембрийского возраста редки в породах Сибирского кратона. Полученные нами данные о распределении возрастов обломочных цирконов в верхнедевонских–нижнекаменноугольных отложениях не подтверждают связь о-ва Котельный с Сибирским кратоном, а свидетельствует о его родстве с Лаврентией и Балтикой.

Были построены графики кумулятивной возрастной вероятности (рис. 3) для различных регионов Арктики и проведено сравнение, используя тест Колмогорова–Смирнова (K-S тест), который определяет вероятность сходства возрастных распределений. Данные, приведённые на рис. 3А, предполагают один источник сноса для верхнедевонских–нижнекаменноугольных отложений о-вов Бельковский и Котельный (Новосибирские о-ва). Сравнение с возрастными обломочных цирконов из разновозрастных толщ других регионов Арктики показывает, что верхнедевонские–пермские осадочные породы архипелага Северная Земля, о-ва Врангеля и Новосибирских о-ов, вероятно, имели близкий источник обломочного материала. Предполагается, что эти арктические регионы, вероятно, являлись частью единого тектонического домена, располагавшегося вдоль северной окраины Лаврентии–Балтики в позднедевонско–раннекаменноугольное время (рис. 4).

В отличие от более древних толщ, популяция палеозойских цирконов из верхнекаменноугольных–пермских отложений на о-ве Котельный может быть скоррелирована с позднепалеозойскими магматическими породами, известными на Урале [8]. По нашим данным резкая смена источника сноса обломочного материала с северной периферии Лаврентии–Балтики на Уральский ороген на о-ве Котельном произошла в позднем карбоне. Полученные возрасты обломочных цирконов из верхнекаменноугольных–нижнепермских песчаников о-ва Котельный тоже очень близки таковым из нижнепермских пород соседнего о-ва Бельковский (рис. 3Б) и триасовых отложений о-ва Врангеля. Уральский ороген также был предположен в качестве главного источника сноса для нижнепермских пород о-ва Бельковский, а Э. Миллер и др. [13] интерпретировали Урал как источник сноса для триасовых обломочных толщ на о-ве Врангеля, Чукотке и Новосибирских о-вах. K-S тест показал высокую вероятность одинакового возрастного распределения, что предполагает схожий источник сноса для пермских обломочных пород Новосибирских о-вов и триасовых отложений о-ва Врангеля. Таким образом, Новосибирские о-ва и о-в Врангеля, вероятно, располагались довольно

близко друг от друга и осадочный материал поступал туда из Уральского орогена в период от позднего карбона до раннего мезозоя.

Девонско–каменноугольный рифтогенез, хорошо документированный на всей территории Арктики [9], вероятно, привёл к разделению Новосибирских о-вов, о-ва Врангеля (с Чукоткой) и Северной Земли, затем последовал дрейф этих континентальных блоков в восточном направлении (в современных координатах). Другой вероятностью является отрыв всех этих террейнов от окраины Лаврентии во время открытия Арктического океана в мезозое.

Полученные новые данные могут быть использованы при создании палеотектонических реконструкций Арктического региона на палеозойское время до открытия мезозойских океанических бассейнов.

2) Впервые получены независимые данные о составе и возрасте фундамента островов архипелага Де-Лонга. Датирование цирконов из коровых ксенолитов в базанитах о. Жохова показало возраст 600–660 млн. лет (U-Pb, SHRIMP-RG). Вместе с близкими датировками протолитов гранитных интрузий и ортогнейсов на арктическом побережье Чукотки этот факт доказывает связь магматизма в блоке Арктическая Аляска–Чукотка с Протоуральской орогенцией. Датирование детритовых цирконов из ксенолитов песчаников о. Жохова указывает на послепермский возраст осадконакопления и схожесть с позднепалеозойскими отложениями о. Врангеля и арктического побережья Чукотки, что позволяет предположить общий источник детрита для отложений о-ов архипелага Де-Лонга и чукотской части континентального блока Арктическая Аляска–Чукотка. Впервые для восточного сектора Арктики в датированных цирконах измерены изотопные метки Hf и O и на этом основании установлено, что ювенильная кора, формирующаяся в эдиакарии, затем последовательно рециклировалась и модифицировалась [1].

Время проявления активного базанитового вулканизма на о.Жохова (рис. 5А), судя по нашим новым результатам К-Аг датирования, относится к интервалу от 3.6 ± 0.6 до 1.4 ± 0.1 млн лет. Коровые ксенолиты представлены кварц-полевошпатовыми песчаниками, гранито-гнейсами, мраморами, полевошпат-амфиболовыми пегматитами, диоритами и относятся к захваченным породам неглубокозалегающего фундамента. Были выделены цирконы и продатированы U-Pb методом (SHRIMP-RG) и проведено исследование гафния и кислорода.

U-Pb SHRIMP-RG возраст циркона из двух образцов плагиигранито-гнейсов варьирует от 660 до 600 млн лет. В трех кристаллах установлены унаследованные ядра с Pb-Pb возрастом >1.4 млрд лет. Изотопный состав кислорода ($\delta^{18}\text{O}$ VSMOW) в датированных кристаллах циркона варьирует от +4.8 до +2.6 ‰ (средневзвешенное значение $+3.32 \pm 0.59$), что характеризует интрузию гранитной магмы с относительно низким $\delta^{18}\text{O}$. Изотопный состав Hf в этих позднепротерозойских цирконах относительно деплетированный, $\epsilon\text{Hf}_{(i)} = +8.6 \dots +12.7$, а $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{(i)} = 0.282641 - 0.282684$ (табл. 1, рис. 5Б). Расчетный модельный Hf возраст цирконов составил 880–740 млн лет, при принятом среднекоровом значении $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0093$. Полученные для цирконов из жоховских коровых ксенолитов U-Pb и Hf модельные возраста указывают на связь с Протоуральско-Тиманским магматизмом и орогенцией. Восемь кристаллов циркона из кварцевого песчаника показали $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ возраста 1.6–1.0 млрд лет, в одном из кристаллов $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраст 460 ± 14 млн лет, что определяет максимальный возраст осадконакопления моложе, чем среднеордовикский. Изотопный состав гафния в цирконах этого образца варьирует в широких пределах ($\epsilon\text{Hf}_{(i)} = -0.7 \pm 1.3 \dots +6.3 \pm 1$; табл. 1, рис. 5Б).

Возраста восьми кристаллов циркона из двух образцов мелкозернистых песчаников лежат в интервале от протерозойского до триасового, в пяти из них U-Pb даты соответствуют карбону и перми. Один из молодых кристаллов имеет $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраст 216 ± 2 млн лет, что определяет максимальный возраст осадконакопления как нижнетриасовый и моложе (рис. 6, табл. 1). В другом молодом кристалле циркона конкордантные $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ и $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ возраста составили около 160 млн лет, что предполагает возраст осадконакопления моложе, чем среднеюрский. $\varepsilon\text{Hf}_{(t)}$ в восьми датированных фанерозойских цирконах изменяется от +5.5 до -10 ± 1.4 , в целом точки составов выстраивают генеральный тренд из области ювенильных деплетированных магматических цирконов в область значений для зрелой коры (рис. 5Б, табл. 1).

Проведено сравнение полученных данных с известными по возрастам детритовых цирконов из осадков разного возраста в Циркум-Арктике. На рис. 6 показано, что в спектре возрастов цирконов из ксенолитов песчаников о. Жохова (бары гистограммы) доминирует детрит с карбон–триасовым возрастом, что в определенной степени характерно и для мезозойских песчаников, обнажающихся на островах и побережье российской части Арктики. Детритовые популяции цирконов из эрратических валунов песчаников о-ов Жохова и Генриетта демонстрируют возраста, характеризующие Протоуральско-Тиманские магматические источники. Наши данные по коровым ксенолитам песчаников, напротив, ясно указывают на происхождение из более молодых отложений.

На основании полученных данных мы можем заключить, что коровые ксенолиты в плио-плейстоценовых базанитах о. Жохова были захвачены из неглубокозалегающего фундамента архипелага Де-Лонга, сложенного неопротерозойскими гранито-гнейсами и чехлом фанерозойских осадочных пород с возрастом моложе раннего триаса и, возможно, средней юры. По возрасту и стратиграфии довулканический фундамент на о. Жохова коррелирует с геологическими комплексами чукотской части континентального блока Арктическая Аляска–Чукотка. Изотопные метки гафния в датированных цирконах из коровых ксенолитов о. Жохова указывают на ювенильное магматическое корообразование для региона в течение эдиакария и на переработку этого домена коры в течение палеозойских и мезозойских событий.

3) По совокупности геолого-геофизических данных впервые выделена Лено-Таймырская аномалия сейсмоактивной среды на западе шельфа моря Лаптевых. Она прослеживается от дельты р. Лены через Оленекский и Анабарский заливы моря Лаптевых и прибрежные районы к п-ву Таймыр. Установлены взаимосвязи сейсмичности, полей тектонических напряжений по данным фокальных механизмов землетрясений с разрывной тектоникой и полем силы тяжести, а также особенности современной геодинамики, объясняющие высокий сейсмический потенциал этой зоны [4].

Полученные данные основаны на мониторинге сейсмичности в арктической части Якутии на морском побережье и в северо-восточных районах (9 сейсмических станций ЯФ ГФ СО РАН). Выявлена крупная Лено-Таймырская аномалия сейсмоактивной среды (ЛТСА) с проявлениями землетрясений умеренной и слабой интенсивности. Она наблюдается на расстоянии 750 км в северо-западном направлении от губы Буор-Хая через дельту р. Лены, Оленёкский и Анабарский заливы моря Лаптевых и прибрежные континентальные районы к о-ву Бол. Бегичев, огибает его с востока и протягивается к п-ву Таймыр (рис. 7). За последние 100 лет в пределах ЛТСА было зарегистрировано около 400 землетрясений с энергетическим классом $K=7-14$ (магнитуда $M \leq 6$), установлен ряд участков с

повышенной плотностью эпицентров землетрясений. Для их надёжного выделения на основе пространственного распределения эпицентров землетрясений была построена карта плотности. В пределах полосы, ограниченной изолинией плотности 1–5, выделились 3 значительных максимума сейсмичности с крупными скоплениями землетрясений (Быковский, Оленекский и Терпай-Тумсинский) (рис. 8). ЛТСА приурочена к зоне влияния Лено-Анабарского краевого шва Сибирской платформы, который прослеживается под покровом мезозойских и кайнозойских отложений одноименного прогиба между устьями рек Лены и Анабара. Он отчетливо диагностируется по линейной магнитной аномалии и градиентной ступени силы тяжести. Другой Дюлюнгский сейсмоактивный разлом трассируется параллельно названному шву вдоль Оленёкской протоки в дельте р. Лены и дальше к западу в пришельфовой части территории [3]. К зоне влияния этих разрывов тяготеет большинство проявлений арктических землетрясений. Все гипоцентры землетрясений располагаются в верхней части земной коры на глубинах 1–20 км. Наблюдается взаимосвязь сейсмических проявлений с рисунком поля силы тяжести, которое представляет собой систему чередующихся линейных положительных и отрицательных гравитационных аномалий, пространственно ориентированных на северо-запад, близко к простиранию Лено-Анабарского разлома. Среди них наиболее ярко выражены Быковский, Оленекский и Чекановский максимумы поля силы тяжести, а также минимумы: Усть-Ленский и дельты р. Лены (рис. 9). Наблюдается надежная пространственная корреляция между сейсмическими и гравитационными максимумами: Быковским и Оленёкским (рис. 8 и 9). Их совпадение указывает на наличии крупной неоднородности в земной коре, к которой и приурочены все местные очаги землетрясений. Анализ фокальных механизмов землетрясений с $M=5.5-6.2$, произошедших в 1960–2013 гг. на юго-восточном окончании арктического хр. Гаккеля и шельфе моря Лаптевых показывает, что все их решения в пределах главной эпицентральной зоны (границы между Евразийской и Североамериканской плитами) соответствуют механизмам растяжения, ориентированного субширотно вкост простирания основных структурных элементов, а подвижки в очагах землетрясений соответствуют сбросам (Имаев и др., 2000). Механизмы очагов землетрясений ЛТСА также характеризуются сбросовыми смещениями с небольшой компонентой левого сдвига (рис. 8, табл. 2), но азимут действия напряжений растяжения σ_1 при сравнении с подобными в главной сейсмической полосе шельфа моря Лаптевых (хр. Гаккеля–Янский залив) меняется здесь с широтного на северо-восток–юго-западный (табл. 2).

Выявленная ЛТСА совместно с главной полосой сейсмичности оконтуривают Лаптевский тектонический блок, расположенный к западу от границы Евразийской и Североамериканской плит. При этом, на западной окраине Лаптевского блока (район Таймыра), по данным механизма очага события 1900 г., действует режим сжатия как реакция на рифтинг, господствующий в пределах главной полосы эпицентров. Это также подтверждают скорости видимого поднятия побережья моря Лаптевых, устанавливаемые по длительным рядам наблюдений за уровнем Мирового океана. Так, при вычитании из последних значения скорости движения уровня океана за примерно 10-летний период измерений скорости современного тектонического поднятия для п-ва Таймыр составили $+(1-2)$ мм/год.

Таким образом, современная геодинамическая обстановка на шельфе моря Лаптевых, возникшая при взаимодействии крупных Евразийской и Североамериканской литосферных плит, способствовала образованию здесь Лаптевского блока, что, возможно, объясняет преобразование линейной сейсмичности хр. Гаккеля в «диффузную» на шельфе

моря Лаптевых. Возникшая на западной границе этого блока ЛТСА, для которой устанавливается отчётливая связь сейсмических, тектонических и гравитационных характеристик среды, подтверждает наличие здесь крупной неоднородности в земной коре. Выделенные максимумы являются наиболее сейсмоопасными участками территории, где могут генерироваться землетрясения с интенсивностью до 7–8 баллов в эпицентре и магнитудой до $M=6$.

Представленная характеристика ЛТСА объясняет природу местной сейсмичности и оценивает уровень её сейсмической опасности, который может ожидаться на данной территории и должен учитываться при активном освоении региона.

Заключение

Широкое применение современных прецизионных методов анализа позволяет выйти на новый уровень знания в области тектоники и геодинамики арктических регионов Северо-Востока Азии, совершенствовать модели формирования структур этого региона и ведет к новым представлениям об истории его геологического развития.

1) Впервые созданы палеорекострукции верхнего палеозоя Новосибирских островов на основе U-Pb датирования обломочных цирконов, изотопных, литохимических и седиментологических исследований. Полученные данные позволили проверить существующие палеотектонические модели и точнее определить палеозойскую палеогеографию архипелага Новосибирских островов.

2) Впервые установлен возраст фундамента архипелага Де-Лонга на основе изучения коровых ксенолитов из базанитов о-ва Жохова.

3) Значительно уточнены особенности современных сейсмотектонических процессов на шельфе моря Лаптевых и прилегающем побережье на границе литосферных плит.

Литература:

1. В.В. Акинин, Э. Готтлиб, Э. Миллер, Г.О. Ползуненков, Н.М. Столбов, Н.Н. Соболев. *Доклады академии наук*, 2015 (в печати)
2. В.Б. Ершова, А.К. Худолей, А.В. Прокопьев. *Геотектоника*, 2013, **2**, 32–41.
3. В.С. Имаев, Л.П. Имаева, Б.М. Козьмин. *Сейсмотектоника Якутии*, М.:, ГЕОС, 2000, 227
4. Б.М. Козьмин, С.В. Шибяев, А.Ф. Петров, К.В. Тимиршин. *Наука и образование*, 2014, **2(74)**, 105–110.
5. А.В. Прокопьев, В.Б. Ершова, Э.Л. Миллер, А.К. Худолей. *Геология и геофизика*, 2013, **54(10)**, 1530–1542.
6. O.A. Anfinson, A.L. Leier, A.F. Embry, K. Dewing. *Geological Society of America Bulletin*, 2012, **124(3-4)**, 415–430.
7. B. Bingen, O. Nordgulen, G. Viola. *Norwegian Journal of Geology*, 2008, **88**, 43–72.
8. D. Brown, C. Juhlin, C. Ayala, A. Tryggvason, F. Bea, J. Alvarez-Marron, R. Carbonell, D. Seward, U. Glasmacher, V. Puchkov, A. Perez-Estaun. *Earth-Science Reviews*, 2008, **89**, 177–195.
9. J.F. Dewey, R.A. Strachan. *Journal of the Geological Society of London*, 2003, **160 (2)**, 219–229.
10. V.B. Ershova, A.V. Prokopiev, A.K. Khudoley, N.N. Sobolev, E.O. Petrov. *Lithosphere*, 2015, DOI: doi:10.1130/L387.1 (in press).
11. D. Gasser, A. Andresen. *Geological Magazine*, 2013, **150(6)**, 1103–1126.
12. A.B. Kuzmichev. *Tectonophysics*, 2009, **463(1-4)**, 86–108.
13. N.B. Kuznetsov, A.A. Soboleva, O.V. Udoratina, O.V. Gertseva, V.L. Andreichev. *Gondwana Research*, 2007, **12**, 305–323.

14. L.A. Lawver, A. Grantz, L.M. Gahagan. *Geological Society of America Special Paper* 360, 2002, 333–358.
15. H. Lorenz, D.G. Gee, A. Simonetti. *Norwegian Journal of Geology*, 2008, **88(4)**, 235–258.
16. H. Lorenz, D.G. Gee, E. Korago, G. Kovaleva, W.C. McClelland, J.A. Gilotti, D. Frei. *Terra Nova*, 2013, **25(6)**, 496–503.
17. W.S. McKerrow, C. Mac Niocaill, J.F. Dewey. *Journal of the Geological Society of London*, 2000, **157**, 1149–1154.
18. J.M. McLelland, B.W. Selleck, M.E. Bickford. *Geological Society of America Memoir* 206, 2010, 21–49.
19. E.L. Miller, G.E. Gehrels, V. Pease, S. Sokolov. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2010, **94**, 665–692.
20. E.L. Miller, A.V. Soloviev, A.V. Prokopiev, J. Toro, D. Harris, A.B. Kuzmichev, G.E. Gehrels. *Gondwana Research*, 2013, **23(4)**, 1631–1645.
21. A.P. Smelov, V.F. Timofeev. *Gondwana Research*, 2007, **12**, 279–288.
22. L.P. Zonenshain, M.I. Kuz'min, L.M. Natapov, B.M. Page, eds. *Geology of the USSR: A Plate-Tectonic Synthesis: American Geophysical Union Geodynamics Monograph* 21, 1990, 242.

Рисунки.

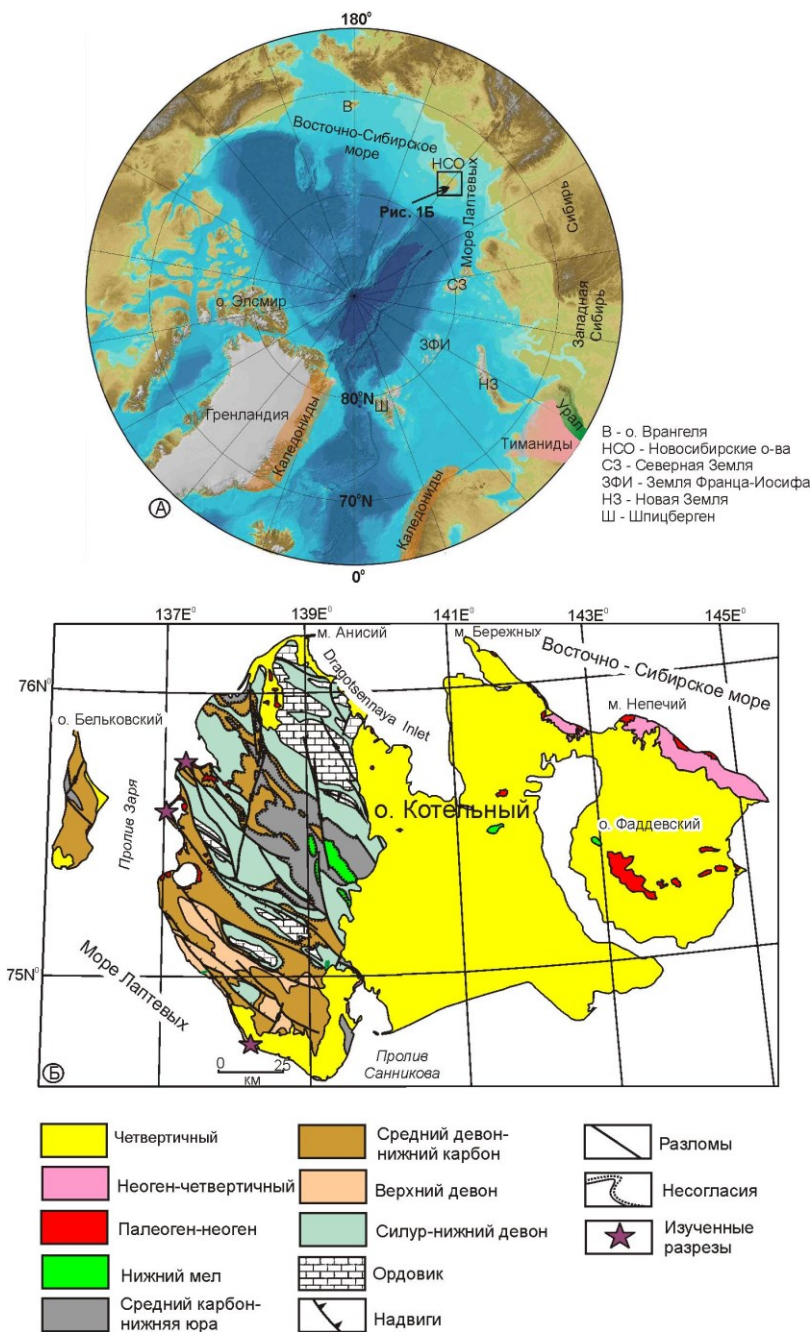


Рис. 1. (А) Местоположение изученного региона. (Б) Геологическая карта о. Котельный и расположение изученных разрезов.

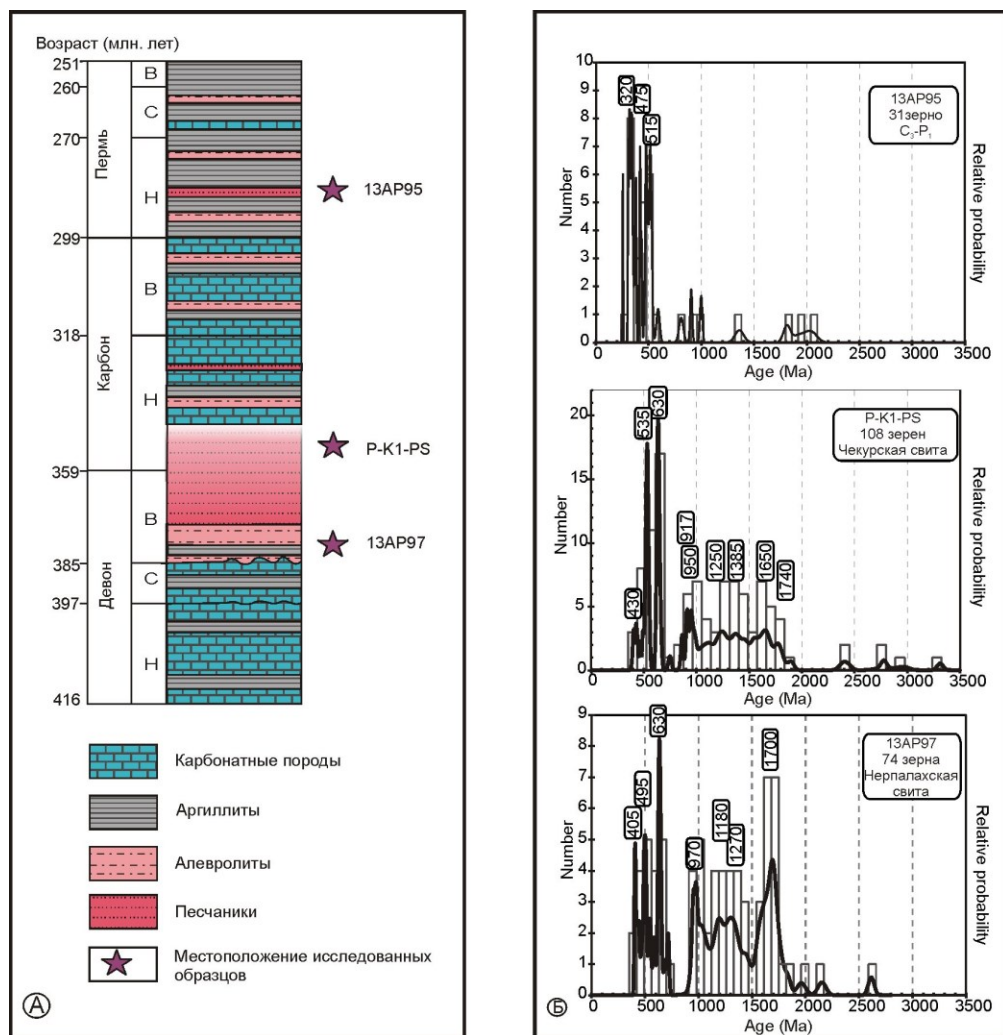


Рис. 2. (А) Схематичная стратиграфическая колонка девон–пермских отложений о. Котельный. (Б) Диаграммы распределения возрастов обломочных цирконов [10].

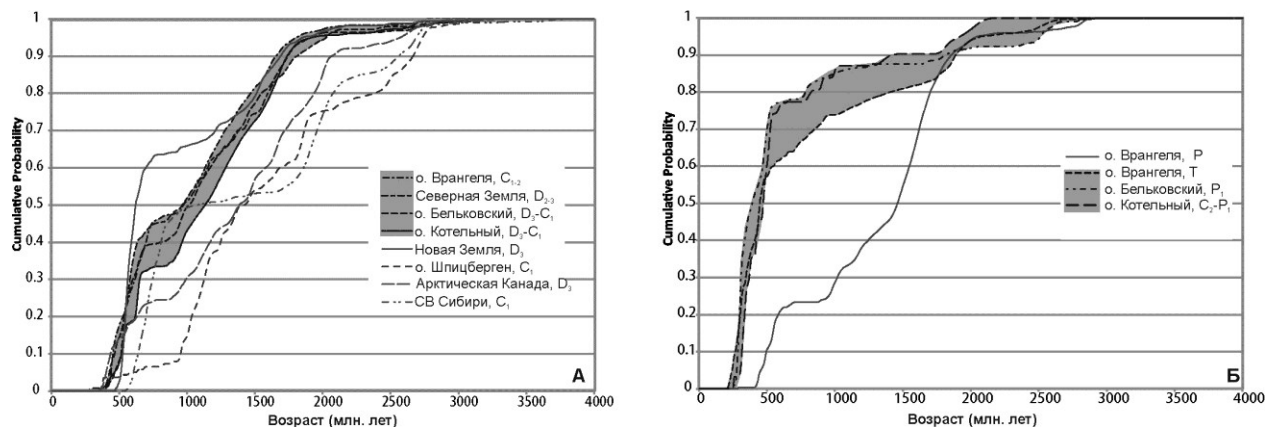


Рис. 3. Графики кумулятивной возрастной вероятности: (А) верхний девон–нижний карбон о. Котельный, девон Северной Земли [15], верхний девон–нижний карбон о. Бельковский (наши данные), карбон о-ва Врангеля, верхний девон Арктической Канады [6], карбон о. Шпицбергеа [11], верхний девон–нижний карбон Новой Земли [16] и нижний карбон

северо-востока Сибирской платформы (наши данные, [2, 5]) [10]. (В) верхний карбон–пермь о. Котельный (наши данные), пермь о. Бельковский (наши данные), пермь–триас о. Врангеля [19] [10].



Рис. 4. Палеогеографическая реконструкция для позднего девона-раннего карбона (с использованием данных [14, 19]). AA – Арктическая Аляска, CH – Чукотка, W – о. Врангеля, SV – Свальбард, KT – Карский террейн, NZ – Новая Земля, К – о. Котельный.

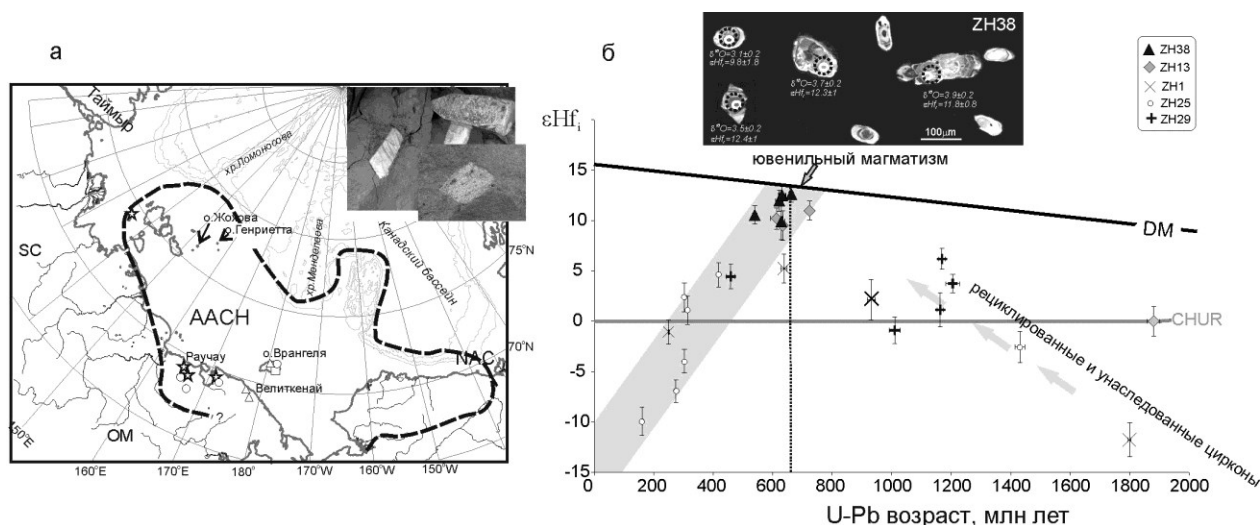


Рис. 5. (А) Схема размещения обсуждаемых образцов, из которых датированы детритовые и магматические цирконы. Фото коровых ксенолитов о.Жохова - вверху справа. Сеткой показаны древнейшие архейские кратоны в обрамлении Арктики: SC – Сибирский кратон, OM – Омолонский террейн, NAC – Северо-Американский кратон. AACN – континентальный блок Арктическая Аляска-Чукотка ограничен пунктирной линией. Темно серым фоном показаны протерозойские интрузии, светло серым фоном – палеозойские осадочные комплексы, черным – палеозойские интрузии. Значками показано расположение главных образцов с исследованными детритовыми цирконами из песчаников и парагнейсов разного возраста и обсуждаемых на рис. 2: верхнеюрско-

меловые (открытые звезды), триасовые (открытый круг), пермо-карбоновые (квадраты), девонско-карбоновые (треугольники). (Б) Диаграмма «U-Pb даты – $\epsilon\text{Hf}_{(t)}$ » для цирконов из коровых ксенолитов о. Жохова, показывающая возможное ювенильное магматическое корообразующее событие в течение эдиакария и последующую изотопную эволюцию коры в фанерозое. Фото вверху – цирконы из ксенолита плагиогранито-гнейса в катодолюминесцентном излучении, кружки показывают области, где был проанализирован изотопный состав кислорода и гафния [1].

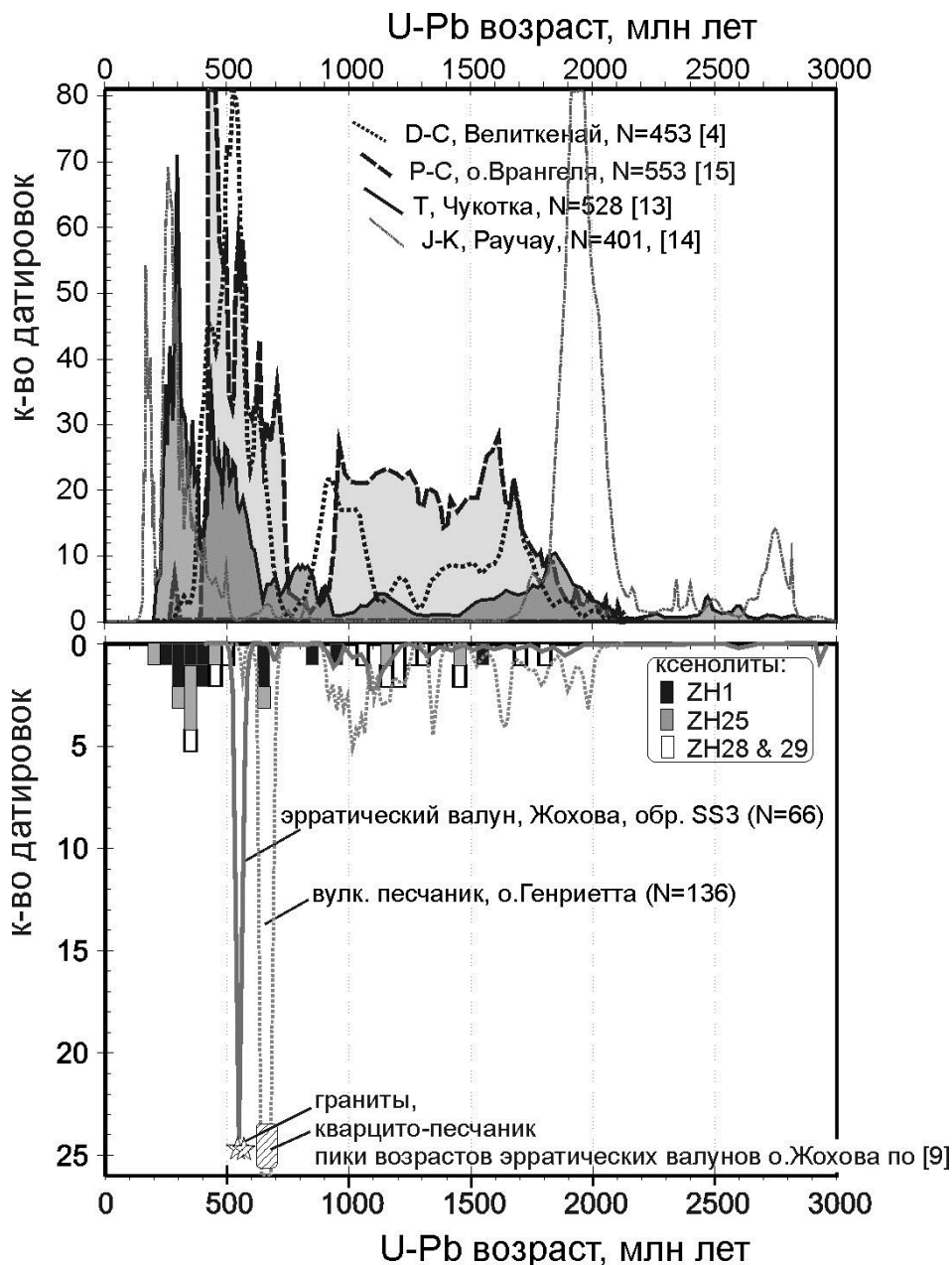


Рис. 6. Спектры возрастов популяций цирконов из песчаников разного возраста в арктической Чукотке в сравнении с данными по ксенолитам и эратическим валунам песчаников о. Жохова и о.Генриетта [1]. Линии – функции плотности распределения, построенные с помощью программы Isoplot.

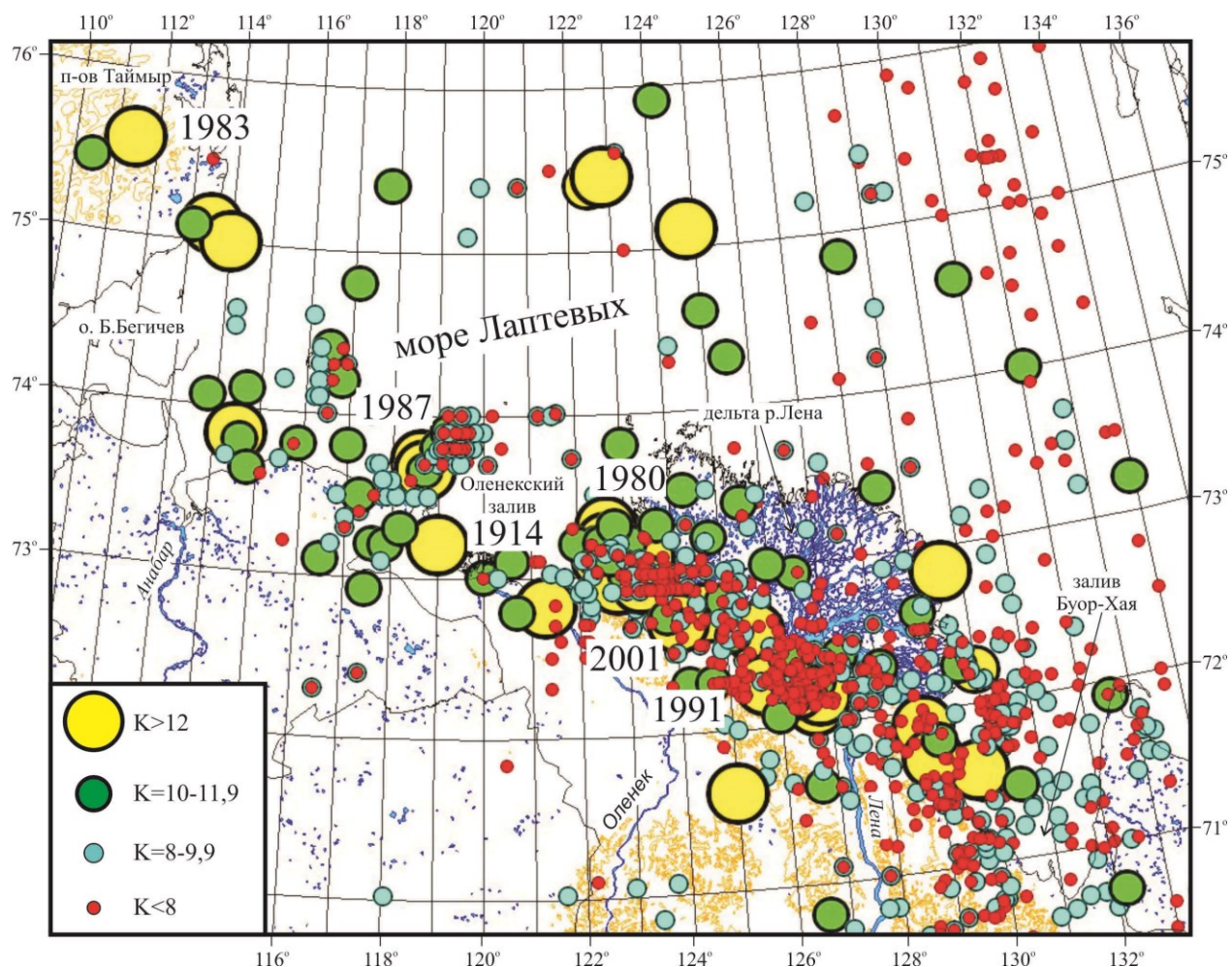


Рис. 7. Карта эпицентров землетрясений Лено-Таймырской аномалии сейсмоактивной среды с энергетическим классом $K=8-14$ за 1914–2013 гг. Рядом с эпицентрами сильных землетрясений проставлен год их возникновения [4].

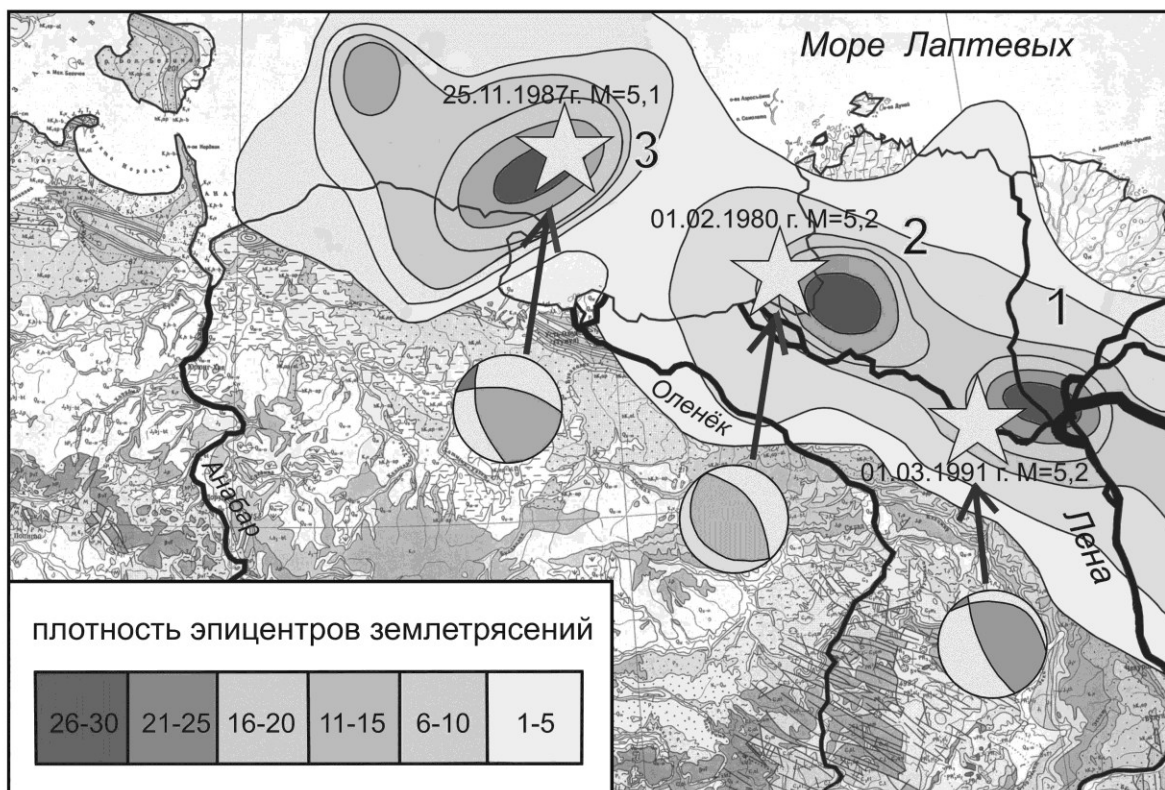


Рис. 8. Карта плотности эпицентров подземных толчков Лено-Таймырской аномалии (число событий на $1^\circ \times 1^\circ$) [4]. 1–3 – крупные максимумы сеймоактивной среды: 1 – Быковский, 2 – Оленёкский, 3 – Терпай-Тумсинский. Звездой обозначено местоположение эпицентра самого сильного землетрясения, рядом проставлена дата возникновения и его магнитуда. В круговых стереограммах приведены фокальные механизмы упомянутых событий (белые области – действие растягивающих напряжений, серые – действие сжимающих напряжений).

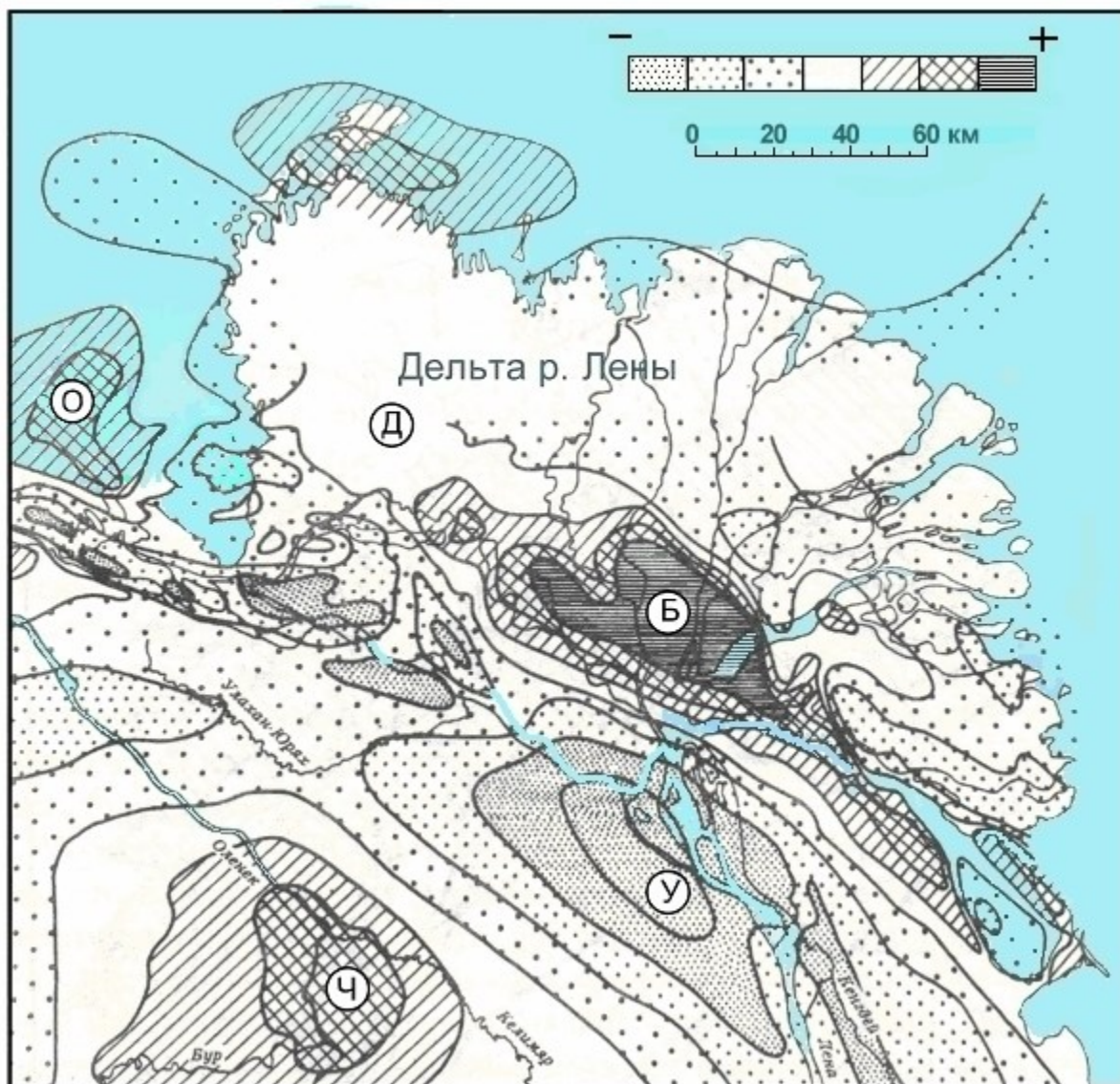


Рис. 9. Фрагмент рисунка гравитационного поля Лено-Таймырской зоны (дельта р. Лены и прилегающие районы) [4]. Максимумы поля силы тяжести: Б – Быковский, О – Оленекский, Ч – Чекановский. Минимумы: У– Усть-Ленский, Д – дельты р. Лены.

Таблица 1.

Образец_точка	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{(m)}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{(cor)}$	$\pm 2\sigma$	U-Pb возраст	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	εHf_0	εHf_i	$\pm 2\sigma$
<i>Обр. ZH38 (плаггиогранито-гнейс, 152.754° E; 76.1501° N)</i>								
ZH38_8	0.282667	0.282709	5.1E-05	629	0.282668	-4.2	9.9	1.8
ZH38_7	0.282721	0.282763	2.6E-05	540	0.282742	-2.3	10.5	0.9
ZH38_5	0.282697	0.282739	2.3E-05	662	0.282724	-3.1	12.6	0.8
ZH38_4	0.282735	0.282777	2.8E-05	634	0.282741	-1.8	12.6	1.0
ZH38_3	0.282712	0.282754	3.0E-05	622	0.282730	-2.6	12.0	1.1
ZH38_1	0.282716	0.282758	2.5E-05	633	0.282739	-2.4	12.5	0.9
<i>Обр. ZH13 (плаггиогранито-гнейс, 152.8209° E; 76.0917° N)</i>								
ZH13_7	0.282634	0.282676	4.1E-05	634	0.282653	-5.3	9.5	1.5
ZH13_6	0.282618	0.282660	2.7E-05	724	0.282637	-5.9	11.0	1.0
ZH13_2	0.281575	0.281617	4.1E-05	1880	0.281585	-42.8	0.0	1.5
ZH13_1	0.282658	0.282700	3.0E-05	613	0.282687	-4.5	10.2	1.1
<i>Обр. ZH1 (песчаник, 152.8469° E; 76.1496° N)</i>								
ZH1_1	0.282225	0.282267	5.7E-05	931	0.282257	-19.8	2.2	2.0
ZH1_4	0.281284	0.281326	4.8E-05	1800	0.281306	-53.1	-11.8	1.7
ZH1_6	0.282561	0.282603	3.4E-05	250	0.282598	-7.9	-1.1	1.2
ZH1_8	0.281887	0.281929	4.1E-05	1511	0.281916	-31.8	3.3	1.5
<i>Обр. ZH25 (песчаник, 152.8125° E; 76.1596° N)</i>								
ZH25_10	0.282621	0.282663	3.4E-05	418	0.282652	-5.8	4.6	1.2
ZH25_9	0.281787	0.281829	4.4E-05	1431	0.281803	-35.3	-2.6	1.6
ZH25_8	0.282623	0.282665	4.0E-05	303	0.282661	-5.7	2.4	1.4
ZH25_5	0.282494	0.282536	4.0E-05	638	0.282530	-10.3	5.2	1.4
ZH25_6	0.282582	0.282624	3.9E-05	314	0.282618	-7.2	1.1	1.4
ZH25_3	0.282380	0.282422	3.1E-05	275	0.282416	-14.3	-6.9	1.1
ZH25_2	0.282442	0.282484	3.3E-05	303	0.282482	-12.1	-4.0	1.2
ZH25_1	0.282365	0.282407	3.9E-05	161	0.282403	-14.9	-9.9	1.4
<i>Обр. ZH29 (песчаник, 152.5606° E; 76.151° N)</i>								
ZH29_10	0.282593	0.282635	3.5E-05	459	0.282621	-6.8	4.4	1.2
ZH29_9	0.282086	0.282128	3.7E-05	1010	0.282120	-24.7	-0.9	1.3
ZH29_8	0.282192	0.282234	2.9E-05	1169	0.282218	-21.0	6.2	1.0
ZH29_7	0.282047	0.282089	4.8E-05	1163	0.282079	-26.1	1.1	1.7
ZH29_4	0.282100	0.282142	2.6E-05	1205	0.282126	-24.2	3.7	0.9

Примечание. $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{(m)}$ - измеренное отношение, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{(cor)}$ - скорректированное на стандарт отношение; $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$ - исходное отношение, с учетом U-Pb возраста.

Таблица 1. Изотопный состав Hf в цирконах из коровых ксенолитов о.Жохова.

Таблица 2.

№	Число. мес. год.	Время в оча- ге, час мин.	φ , N градус	λ , E Градус	К	σ_1		σ_2		σ_3		Тип под- вижки
						Pl	Azm	Pl	Azm	Pl	Azm	
1	20.05.1963	17 01	72.1	126.7	13	03	310	65	46	24	218	Сд -С
2	01.02.1980	17 30	73.0	122.6	14	10	36	10	128	76	262	С
3	15.06.1986	06 55	72.8	126.3	13	06	276	75	69	00	186	Сд
4	25.11.1987	17 28	73.8	118.9	13	07	216	37	311	52	109	С
5	09.06.1990	18 24	75.1	113.1	13	55	25	00	360	88	268	Н
6	01.03.1991	01 57	72.2	126.7	13	24	124	52	357	26	228	С-Сд

Примечание. φ , N и λ , E – координаты эпицентра землетрясения: северная широта и восточная долгота; К- энергетический класс землетрясения; σ_1 , σ_2 , σ_3 - тектонические напряжения: растяжения, промежуточное и сжатия соответственно (Pl- угол наклона оси напряжения к горизонту, градус; Azm- азимут оси напряжения, градус); тип подвижки: Н-надвиг, С-сброс, С-Сд-сбросо-сдвиг, Сд-С-сдвиго-сброс.

Примечание. φ , N и λ , E – координаты эпицентра землетрясения: северная широта и восточная долгота; К- энергетический класс землетрясения; σ_1 , σ_2 , σ_3 - тектонические напряжения: растяжения, промежуточное и сжатия соответственно (Pl- угол наклона оси напряжения к горизонту, градус; Azm- азимут оси напряжения, градус); тип подвижки: Н-надвиг, С-сброс, С-Сд-сбросо-сдвиг, Сд-С-сдвиго-сброс.

Таблица 2. Параметры фокальных механизмов землетрясений Лено-Таймырской аномалии.