

Научная статья

УДК 551.24.05"616"(571.5-12)

doi:10.52349/0869-7892_2025_101_153-167

**Геодинамические режимы
в позднем архее Алданского щита****И. М. Фрумкин**✉

АО «Якутскгеология», Якутск, Россия, isaakfrumkin@gmail.com✉

Ключевые слова: Алданский щит, поздний архей, metabазальты, геодинамические режимы, структурно-формационные зоны, актуализм

Для цитирования: Фрумкин И. М. Геодинамические режимы в позднем архее Алданского щита // Региональная геология и металлогения. 2025. Т. 32, № 1. С. 153–167. https://doi.org/10.52349/08697892_2025_101_153-167

Аннотация. Выявление геодинамических режимов архейского комплекса Алданского щита стало возможным благодаря расчлененности его на структурно-вещественные комплексы и структурно-формационные зоны и признанию соответствия химического состава основных кристаллических сланцев архея базальтам. При этом соотношение таких элементов, как K и Ti, K и P, в metabазальтах различно в разных геодинамических обстановках. В статье рассматривается тимптоно-джелтулинский структурно-вещественный комплекс, слагающий восточную половину Алданского щита, в основном Тимптоно-Учурское междуречье. По данным Sm-Nd метода измерения возраста он отнесен к позднему архею (2,6–2,8 млрд лет). В комплексе выделены четыре структурно-формационные зоны (с востока на запад): Учурская, Тыркандинская, Джелтулинская и Тимптонская. Положение фигуративных точек химических анализов metabазальтов каждой зоны на геодинамических диаграммах K-Ti и K-P показало принадлежность зон к различным геодинамическим режимам. Установлены следующие режимы в зонах формирования позднеархейских пород тимптоно-джелтулинского комплекса: Учурская зона — серия небольших (сотни км) островных дуг, Тыркандинская зона — карбонатно-вулканогенная островная дуга, Джелтулинская зона — осадочный бассейн на пассивной континентальной окраине, Тимптонская зона — внутриконтинентальный осадочный бассейн, развившийся из континентальных рифтов (авлакогенов). Все эти геодинамические режимы демонстрируют с высокой вероятностью действие механизма тектоники литосферных плит при формировании континентальной земной коры уже в архейское время.

Original article

UDC 551.24.05"616"(571.5-12)

doi:10.52349/0869-7892_2025_101_153-167

**Geodynamic regimes
in the Late Archean Aldan Shield****I. M. Frumkin**✉

Yakutskgeologiya, Yakutsk, Russia, isaakfrumkin@gmail.com✉

Abstract. Dividing the Archean complex of the Aldan Shield into structural and material complexes, and structural and formational zones, as well as matching the chemical composition of the Archean main crystalline shales to basalts led to identify the complex's geodynamic regimes. Meanwhile, the ratio of such elements as K and Ti, K and P in metabasalts varies in different geodynamic settings. The paper considers the Tipton-Dzheltulin structural and material complex located in the eastern half of the Aldan Shield, mainly the Tipton-Uchur interstream. The Sm-Nd dating method attributed the complex to the Late Archean (2.6–2.8 bn years). There are four structural and formational zones in the complex (from east to west): Uchur, Tyrkandin, Dzheltulin, and Tipton. The geodynamic diagrams K-Ti and K-R, which locate figurative points of the metabasalts chemical analyses in each zone, demonstrate that the zones belong to different geodynamic regimes. Zones of forming Late Archean rocks in the Tipton-Dzheltulin complex establish the following regimes: the Uchur zone relates to a series of small



Keywords: Aldan Shield, Late Archean, metabasalts, geodynamic regimes, structural and formational zones, actualism

For citation: Frumkin I. M. Geodynamic regimes in the Late Archean Aldan Shield. *Regional Geology and Metallogeny*. 2025; 32 (1): 153–167. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2025_101_153-167

(hundreds of km) island arcs, the Tyrkandin zone — a carbonate-volcanogenic island arc, the Dzheltulin zone — a sedimentary basin on a passive continental margin, the Tipton zone — an intracontinental sedimentary basin developed from continental rifts (aulacogens). All these geodynamic regimes are likely to demonstrate how the mechanism of lithospheric plates tectonics works during the continental crust formation already in the Archean period.

ВВЕДЕНИЕ

Выявление геодинамических режимов формирования (архейских) пород представляет собой сложную и важную общегеологическую проблему, т. к. позволяет прояснить вопрос о времени начала действия механизма тектоники литосферных плит как корообразующего процесса, ибо еще существует мнение, что этот механизм проявился на довольно

позднем (палеозойско-мезозойском) этапе геологической жизни Земли.

Алданский щит, занимающий всю Южную Якутию (рис. 1), является подходящим объектом для решения такой задачи, т. к. глубокометаморфизованные образования архея здесь распространены на очень большой площади — 270 тыс. км² и представлены породами огромного стратиграфического диапазона — от 4,0 до 2,5 млрд лет.

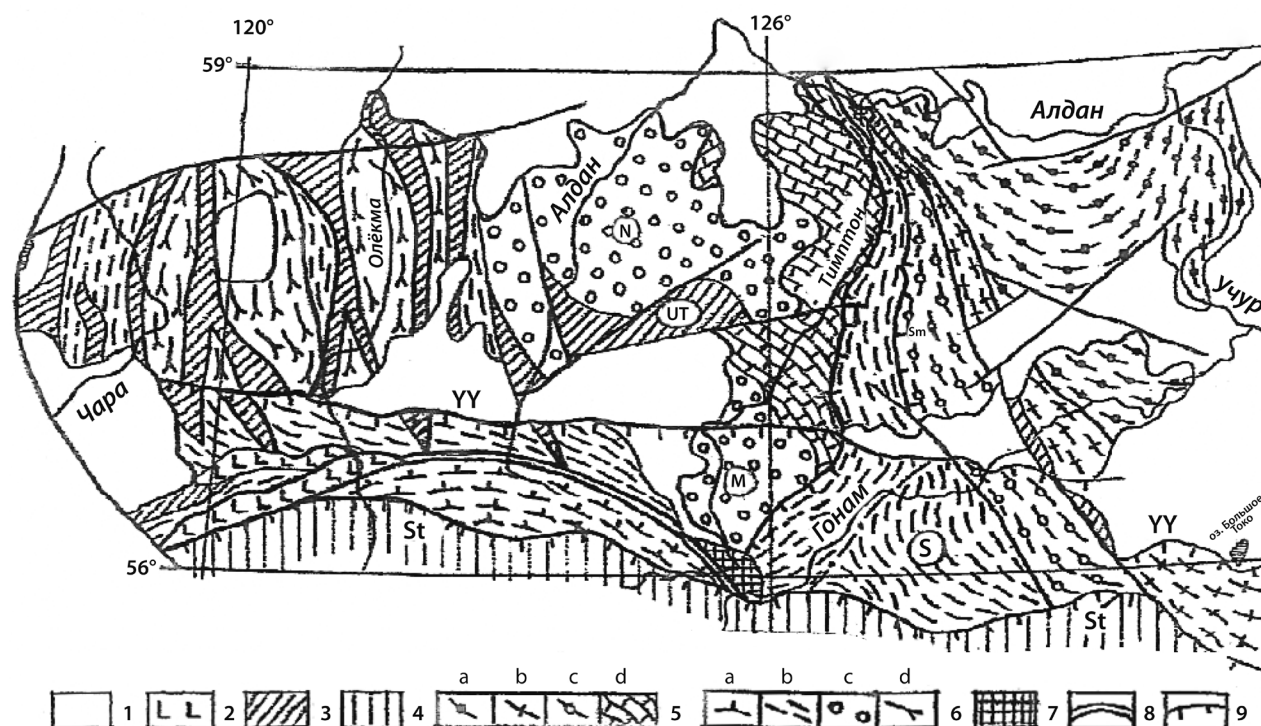


Рис. 1. Тектоническая схема археид Алданского щита

1 — постархейские платформенные образования; 2, 3 — поздний архей: 2 — анортозиты, 3 — структуры (зеленокаменные пояса) субганского структурно-вещественного комплекса; 4 — нерасчлененные архейские структуры Станового хребта; 5 — поздний архей: структурно-формационные зоны Тимптоно-Джелтулинского структурно-вещественного комплекса: а — Учурская, б — Тыркандинская, с — Джелтулинская, d — Тимптонская; 6 — ранний архей: структурно-формационные зоны иенгровского структурно-вещественного комплекса: а — Зверевская, б — Чаро-Сеймская, с — Нимырская, d — Олёкминская; 7 — катархей: Тангракский блок; 8 — Алдано-Становой структурный шов; 9 — надвиги: St — Становой, YY — Южно-Якутский, T — Тимптонский, Sm — Сеймский. Буквы в кружках: N — Нимырский, M — Модемконский, S — Сутамский блоки, UT — Унгра-Тимптонская зона

Источник: по [1]

Fig. 1. Tectonic diagram of the Aldan Shield archaides

1 — Post-Archean platform formations; 2, 3 — Late Archean: 2 — anorthosites, 3 — structures (greenstone belts) of the Subgan structural and material complex; 4 — undifferentiated Archean structures of the Stanovoy Ridge; 5 — Late Archean: structural and formational zones of the Tipton-Dzheltulin structural and material complex: a — Uchur, b — Tyrkanda, c — Dzheltulin, d — Tipton; 6 — Early Archean: structural and formational zones of the Iyengra structural and material complex: a — Zverevskaya, b — Charo-Seim, c — Nimyr, d — Olyokma; 7 — Katarchean: Tangrak block; 8 — Aldan-Stanovoy structural suture; 9 — thrusts: St — Stanovoy, YY — South Yakut, T — Tipton, Sm — Seim. Letters in circles: N — Nimyr, M — Molemkon, S — Sutam blocks, UT — Ungra-Tipton zone

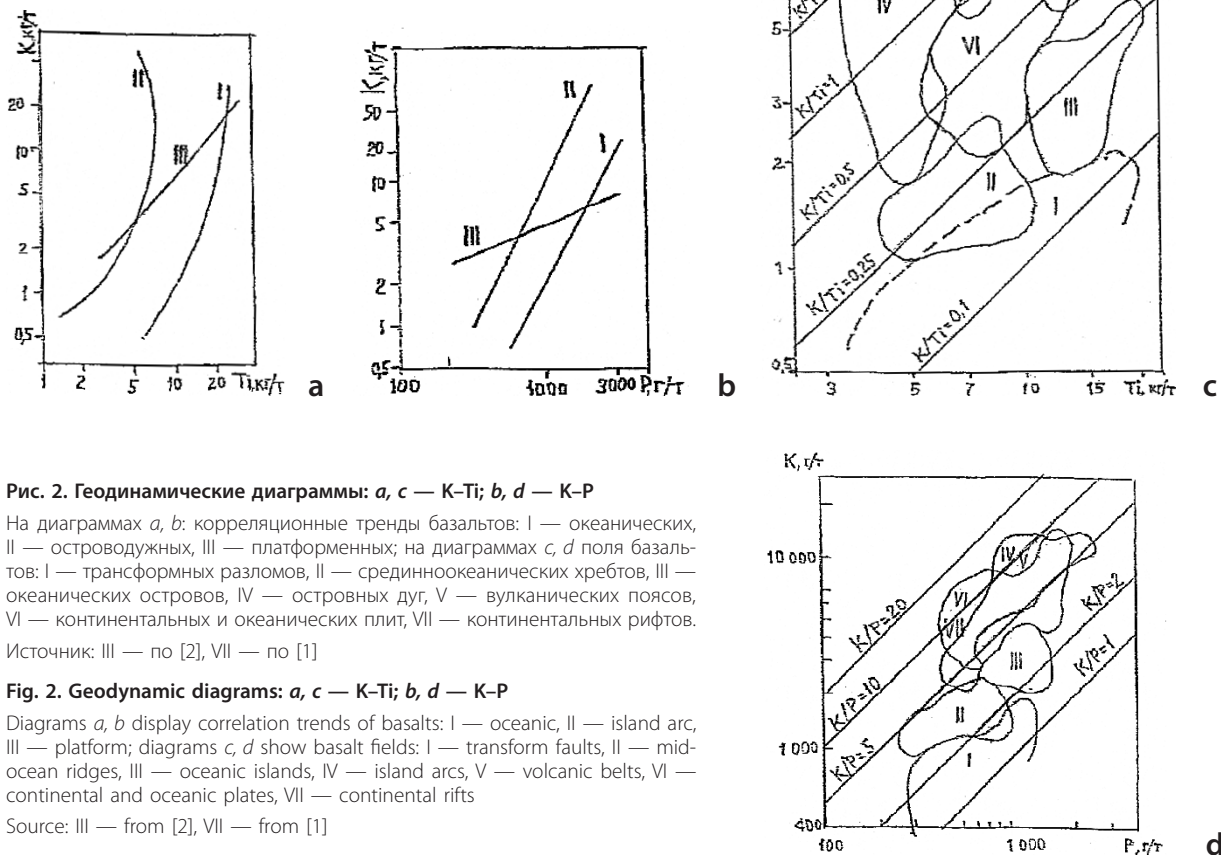
Source: from [1]

Методика выявления геодинамических режимов для архейских метаморфических комплексов подробно изложена в предыдущей статье [1]. Методологической основой исследования являются два фундаментальных обстоятельства. Первое — латеральная структурно-вещественная дифференцированность архейских метаморфических образований Алданского щита, выраженная в расчлененности их на ряд структурно-вещественных комплексов (иенгрский, тимптоно-желтулинский, субганский), состоящих из нескольких структурно-формационных зон (далее — СФЗ). Этот объективный факт (структурированность архейских образований) является основополагающим при решении любых проблем архея. Второе обстоятельство — изохимический характер регионального метаморфизма гранулитовой фации, что сделало возможным актуалистическую реконструкцию исходного состава и природы древних метаморфических пород.

Установление конкретного геодинамического режима формирования кристаллических пород архея осуществляется при помощи предложенных Б. Г. Лутцем [2] геохимических соотношений K/Ti и K/P , которые, по мнению его и других [3; 4], индивидуальны в разных геодинамических условиях. Б. Г. Лутц на геохимических диаграммах показал только корреляционные тренды современных океанических, островодужных и платформенных базальтов, причем платформенный тренд пересекает два других (рис. 2). Для архейских метаморфических пород такая форма

диаграмм оказалась недостаточной. Автору пришлось вместо трендов отстроить на диаграммах поля для базальтов трансформных разломов, срединно-океанических хребтов, океанических островов, островных дуг, континентальных и океанических плит, вулканических поясов и континентальных рифтов. Перекрытие некоторых смежных полей на диаграмме $K-Ti$ не превышает 5 %. В итоге такой трансформации получилась новая эффективная геодинамическая диаграмма (диаграмма Лутца-Фрумкина), пригодная для выяснения геодинамических режимов структур любого возраста. Кроме соотношений K/Ti и K/P , использовалось отношение K/Na как показатель глубины магмогенерации [2].

В предыдущей статье автора [1] были выявлены геодинамические условия формирования пород раннеархейского иенгрского структурно-вещественного комплекса (далее — СВК), развитого в центральной и западной частях щита (рис. 1). Теперь надо выяснить то же для позднеархейского тимптоно-желтулинского СВК, развитого на восточной половине Алданского щита. Без выполнения этой задачи невозможно построить геодинамическую карту архея щита.



Тимптоно-желтулинский комплекс впервые был выделен автором (вначале как тимптоно-желтулинская серия) [5; 6]. Комплекс распространен в основном на обширном Тимптоно-Учурском междуречье. Общая занимаемая им площадь — 125 тыс. км². Комплекс состоит из четырех СФЗ (с востока на запад): Учурская, Тыркандинская, Желтулинская и Тимптонская.

Возраст тимптоно-желтулинского комплекса не вполне однозначен. Автор до сих пор относил его к среднему архею (при трехчленном делении архея), определяя временной интервал 3,4–3,0 млрд лет. Такая возрастная позиция гранулитового тимптоно-желтулинского комплекса основывалась на существовании на Алданском щите зеленокаменных поясов субганского комплекса, возраст которого определен Sm-Nd методом в 3,0–2,6 млрд лет, т. е. как позднеархейский.

В 2020 г. С. Д. Великославинский предоставил автору массив из 40 цифр возраста тимптоно-желтулинских пород, измеренных Sm-Nd методом. Ни одна из этих цифр не достигает 3 млрд лет. Максимальное значение возраста пород Учурской зоны составляет 2,59, Желтулинской зоны — 2,60, Тимптонской зоны — 2,67 млрд лет. Поэтому приходится признать позднеархейский возраст тимптоно-желтулинского комплекса. Хотя трудно вообразить существование на одном щите разновозрастных гранулитового и зеленокаменного комплексов. В то же время более молодой возраст тимптоно-желтулинского комплекса относительно иенгрского признавался всегда.

Независимым подтверждением разновозрастности образований иенгрского и тимптоно-желтулинского комплексов Алданского щита стали исследования изотопии серы в их метапородах [7]. Обнаружено широкое распространение сульфатной серы в тимптоно-желтулинских породах (в Тимптонской и Учурской зонах) и ее полное отсутствие в иенгских породах, что указывает на существенное изменение геохимической обстановки в послеиенгское (после раннего архея) время.

Свидетельством разновозрастности двух комплексов является принципиальное различие складчатых деформаций слагающих их толщ. Если в иенгском комплексе это брахиформные и короткие линейные структуры, то в тимптоно-желтулинском комплексе, возможно, впервые в геологической истории щита возникли линейные син- и антиклинории большой протяженности (сотни км), к тому же формирующие местами (в Учурской зоне) сложные складчатые системы [6]. Такое принципиальное изменение стиля складчатости стало возможным благодаря появлению в послеиенгское время первой континентальной плиты за счет консолидации Нимнырской континентальной и Чаро-Сеймской островодужной структурно-формационных зон раннеархейского иенгрского комплекса.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ниже приводится краткое изложение геологического и геохимического материала по СФЗ тимп-

тоно-желтулинского структурно-вещественного комплекса позднего архея Алданского щита. При этом обоснование и история выделения зон здесь приводиться не будут, т. к. это сделано в ряде предыдущих работ [6; 8]. Средний химический состав метабазальтов, определяющих геодинамический режим СФЗ тимптоно-желтулинского комплекса, приведен в таблице ниже.

Учурская структурно-формационная зона (рис. 1) занимает большую часть Тимптоно-Учурского междуречья. Она ограничена двумя субпараллельными глубинными разломами: Буголинским на западе и Улканским на востоке. Среднее расстояние между ними — 200 км, а занимаемая зоной площадь — 75 тыс. км². Метаморфические образования Учурской СФЗ формируют сложнопостроенную дугообразную систему протяженных линейных син- и антиклиналей [6]. Наиболее значительные из них Северо-Суннагинский антиклинорий (270 км) и Южно-Суннагинский синклинорий (320 км).

Метаморфические породы Учурской СФЗ объединены в гынымскую серию мощностью около 8 км [8]. Ее слагают гиперстеновые, амфибол-гиперстеновые, биотит-гиперстеновые, двупироксеновые, часто с гранатом плагиогнейсы и кристаллические сланцы (это суннагинская свита); выше залегает толща биотит-гранатовых, изредка силлиманитовых гнейсов, переслаивающихся с гиперстеновыми, двупироксеновыми, диопсидовыми плагиогнейсами и кристаллосланцами, пластами и линзами доломитовых мраморов и кальцифиров (селиглинская свита); завершает разрез локально развитая толща диопсидовых, гранатовых, гиперстеновых гнейсов, насыщенная пластами кальцифиров и мраморов, а также диопсидовых пород с флогопитом (Маган-Тасское месторождение флогопита, мугу-сканская свита). В самом низу разреза гыимской серии в ядерной части Северо-Суннагинского антиклинория на хр. Суннагин (бассейн верховьев рек Бол. Дьюнюкен и Бол. Селигли) вскрыта толща довольно меланократовых пород, представленных грубым чередованием амфибол-двупироксеновых, обычно гранатсодержащих, двупироксеновых, иногда биотит-двупироксен-амфиболовых кристаллических сланцев, амфиболитов. Эта нижняя часть разреза суннагинской свиты достойна быть выделена в отдельную дьюнюкенскую толщу.

Региональный метаморфизм пород гыимской серии типично гранулитовый: $P = 7\text{--}8$ кбар и $T = 800\text{--}900$ °C [9]. Из основных кристаллических сланцев Учурской СФЗ отобрано и подвергнуто химическому анализу 79 образцов, в т. ч. 22 из пород дьюнюкенской толщи. Химический состав всех образцов соответствует различным базальтам (рис. 3). Следует обратить внимание на некоторые особенности учурских метабазальтов (без 22 анализов пород дьюнюкенской толщи). Преобладающими являются породы островодужного типа — 56 %. При этом среди них большинство толеитов (43 %), меньше известково-щелочных метабазальтов (36 %), еще меньше субщелочных пород (21 %). Такой показатель глубины магмогенерации, как отношение K_2O/Na_2O , у учурских толеитовых метабазальтов

островодужного типа равен 0,27. Он может указывать на относительно небольшую глубину магмогенерации в Учурской СФЗ.

Заметную роль (26 %) в Учурской СФЗ играют толеитовые метабазалты, соответствующие плато-базальтам стабильных плит, хотя неясно каких — океанических или континентальных. На возможное участие океанического ложа намекают присутствующие в составе учурских метабазалтов породы океанического типа (СОХ, ОО), причем в максимальном числе (16 %) по сравнению со всеми другими СФЗ тимптоно-желтулинского комплекса. Кроме того, учурские метабазалты с р. Гоном демонстрируют Ni/Co отношение (более 1,5), характерное для океанических базальтов [2], а на диаграмме Ni–Co они попадают только в поле океанических базальтов [10]. Показатель глубины магмогенерации метабазалтов стабильных плит Учурской СФЗ K_2O/Na_2O равен 0,29, что значительно меньше, чем у базальтов континентальных плит (0,40), и он почти совпадает с таким же показателем у толеитовых метабазалтов островодужного типа в этой зоне (0,27), что, возможно, указывает на одинаковую глубину выплавления тех и других. Эти свойства метабазалтов позволяют признать присутствие в Учурской СФЗ океанического плато с небольшими островными дугами на нем.

Основные кристаллические сланцы дьюнукенской толщи выделяются своим химическим составом среди всех пород гынымской серии. Поэтому на петрохимические диаграммы (рис. 3) они нанесены отдельным знаком (xxx). Их средний химический состав (таблица) отвечает субщелочному метабазальту K–Na серии. На диаграмме K–Ti они в основном попадают в поле базальтов континентальных вулканических поясов (64 %). Показатель глубины магмогенерации K_2O/Na_2O у них максимальный — 0,39, что характерно для континентальных базальтов. Базальное положение и петрохимические свойства основных кристаллосланцев дьюнукенской толщи допускают предположение о формировании пород гынымской серии частично на континентальном основании.

Таким образом, геодинамический режим Учурской СФЗ может быть определен как ряд небольших (первые сотни км) островных дуг как на океаническом (в одних местах), так и на континентальном (в других местах) ложе в условиях вероятного окраинного морского бассейна, расположенного между большой Тыркандинской островной дугой и Среднеамгинским континентальным массивом (сейчас скрыт под платформенным чехлом) из образований раннеархейского иенгского комплекса [11]. Наблюдаемые ныне протяженные (250–350 км) субпараллельные складки Учурской дугообразной складчатой системы, возможно, соответствуют бывшей здесь в позднем архее серии островных дуг.

Тыркандинская структурно-формационная зона (рис. 1) расположена непосредственно к западу от Учурской СФЗ, с которой граничит по Буголинскому разлому. Западным ограничением зоны служит Тыркандинский разлом. Пространство между этими разломами четко выделяется полосой положительных магнитных аномалий. Тыркандинская СФЗ

в виде дуги большого радиуса протягивается через весь Алданский щит в юго-восточном направлении от устья р. Тимптон до верховьев рек Мая и Зея. Длина ее 550 км при максимальной ширине 60 км (на южном фланге). По магнитометрическим данным зона прослеживается под чехлом венд-кембрийских платформенных отложений еще на 200 км на север на Лено-Амгинский водораздел [11].

В сложении Тыркандинской СФЗ участвует своеобразная ассоциация пироксеновых кристаллических сланцев и карбонатных пород, объединенных в тыркандинскую стратиграфическую серию [8]. Наиболее полный разрез серии обнажен на юго-восточном фланге зоны в бассейнах рек Альванар и Худуркан. Здесь он подробно описан Ю. Б. Казминым и др. (1962 г.)¹. Им выделены (снизу вверх): худурканская свита (до 2500 м) — внизу пачка лейкократовых гиперстеновых плагиогнейсов, выше — меланократовые двупироксен-амфиболовые кристаллосланцы, амфиболиты, еще выше — пачка переслаивающихся биотит-гранатовых, пироксеновых плагиогнейсов и основных кристаллосланцев, сверху — редкие линзы мраморов; ивакская свита (до 2600 м) — меланократовые кристаллосланцы основного состава и пироксеновые плагиогнейсы с многочисленными пластами и линзами мраморов и кальцифиров; утукская свита (до 2000 м) — монотонная толща меланократовых кристаллосланцев основного состава; альванарская свита (до 1500 м) — переслаивание основных кристаллосланцев, пироксеновых, пироксен-амфиболовых плагиогнейсов и мраморов.

Пликативные деформации пород Тыркандинской СФЗ привели к формированию сложных линейных складок, параллельных дизъюнктивным ограничениям зоны. Осевые плоскости складок часто запрокинуты на запад, а крылья сорваны разломами. В связи с последним не исключено удвоение некоторых частей разреза.

Прогрессивный региональный метаморфизм пород тыркандинской серии соответствует условиям гранулитовой фации: $P = 8,0–8,5$ кбар, $T = 720–800$ °C [12]. 33 образца тыркандинских двупироксеновых, двупироксен-амфиболовых, гиперстеновых, диопсид-амфиболовых, амфиболовых основных кристаллических сланцев подвергнуты химическому анализу. Они в основном соответствуют собственно базальтам и трахибазальтам. Преобладают метабазалты повышенной щелочности, K–Na серии, умеренно глинозёмистые, мезократовые. На диаграмме K–Ti фигуративные точки тыркандинских метабазалтов в основном легли в поле островодужных базальтов — 60 % (рис. 4). Такое их положение видно и на диаграмме K–Р. Обращает на себя внимание щелочность тыркандинских метабазалтов островодужного типа: среди них по сравнению с метабазальтами всех остальных структурно-формационных зон архея Алданского щита менее всего толеитовых метабазалтов — всего 1/8 часть, половина известково-щелочных, остальные субщелочные. При сопоставлении средних

¹ Казмин Ю. Б., Филиппович И. З., Гиммельфарб Г. Б. Новые данные по стратиграфии архея юго-восточной части Алданского щита // Тр. БАГТ. 1962. Вып. 8.

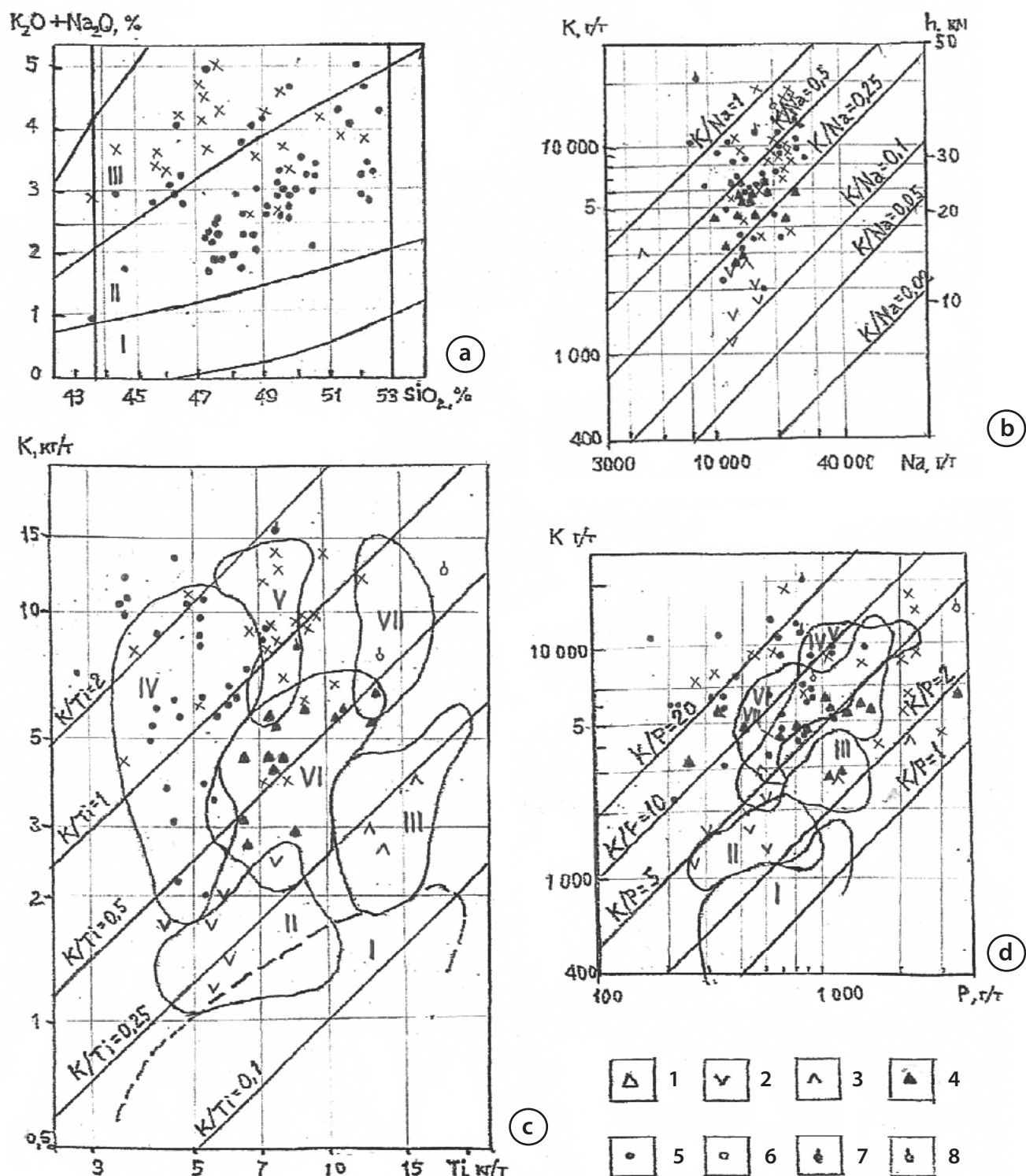


Рис. 3. Положение фигуративных точек химических составов метабазальтов Учурской структурно-формационной зоны на петрохимических *a* — SiO_2 — $(K_2O + Na_2O)$, *b* — $K-Na$ и геодинамических *c* — $K-Ti$, *d* — $K-P$ диаграммах

На диаграммах: *a* — поля: I — пикритобазальтов, II — толеитобазальтов, III — субщелочных базальтов; *b* — вероятная глубина магмогенерации базальтов h км. Фигуративные точки метабазальтов: 1 — трансформных разломов, 2 — срединноокеанических хребтов, 3 — океанических островов, 4 — океанических плит, 5 — островных дуг, 6 — континентальных плит, 7 — вулканических поясов, 8 — континентальных рифтов. Крестики (x) — метабазальты дзюноукенской толщи. Содержание полей I-VII на диаграммах *c*, *d* см. в условных обозначениях к рис. 2

Fig. 3. Petrochemical *a* — SiO_2 — $(K_2O + Na_2O)$, *b* — $K-Na$ and geodynamic *c* — $K-Ti$, *d* — $K-P$ diagrams, with figurative points of metabasalts chemical compositions located (the Uchur structural and formational zone)

The diagrams display *a* — fields: I — picrite basalts, II — tholeiitic basalts, III — subalkaline basalts; *b* — probable depth of basalt magma generation h km. Figurative points of metabasalts: 1 — transform faults, 2 — mid-ocean ridges, 3 — oceanic islands, 4 — oceanic plates, 5 — island arcs, 6 — continental plates, 7 — volcanic belts, 8 — continental rifts. Crosses (x) relate to metabasalts of the Duniyken Unit. Symbols in Fig. 2 refer to the content of fields I-VII in diagrams *c*, *d*

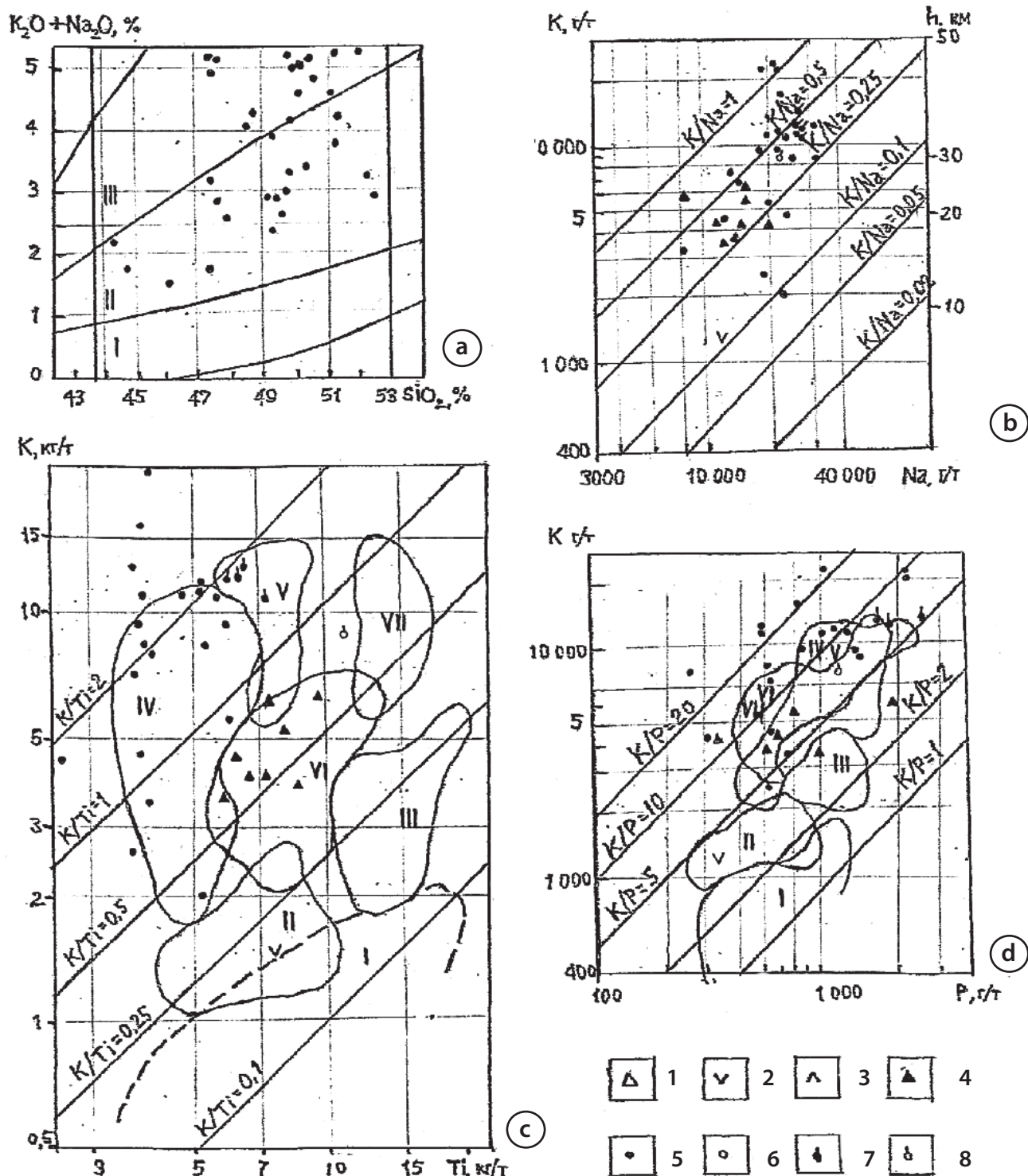


Рис. 4. Положение фигуративных точек химических составов метабазальтов Тыркандинской структурно-формационной зоны на петрохимических а — $SiO_2 - (K_2O + Na_2O)$, б — K-Na и геодинамических с — K-Ti, д — K-P диаграммах

Условные обозначения см. на рис. 2 и 3

Fig. 4. Petrochemical a — $SiO_2 - (K_2O + Na_2O)$, b — K-Na and geodynamic c — K-Ti, d — K-P diagrams, with figurative points of metabasalts chemical compositions located (the Tyrkanda structural and formational zone)

Refer to the symbols in Fig. 2, 3

химических составов этих метабазальтов и базальтов современных островных дуг (таблица) выявляется более высокая общая щелочность и калиево-содержание древних пород. А отношение K_2O/Na_2O , являющееся индикатором глубины магмогенерации, здесь максимальное: 0,37 для метабазальтов нормального и 0,42 для пород субщелочного ряда. Эти геохимические особенности тыркандинских островодужных метабазальтов указывают на большую глубину базальтового магматического очага.

24 % метабазальтов легли в поле стабильных плит. Все они являются толеитами. По отношению K_2O/Na_2O , равному 0,28, эти метабазальты принадлежат к океаническому плато.

Таким образом, петрохимические особенности основных кристаллических сланцев — метабазальтов Тыркандинской СФЗ совместно с ее размерами, формой и положением вблизи раннеархейского континентального массива (Нимнырского) допускают возможность формирования метаморфизованной вулканогенно-карбонатной толщи пород тыркандинской серии в обстановке позднеархейского островодужного геодинамического режима. По сос-

таву пород Тыркандинская островная дуга преимущественно вулканическая.

Джелтулинская структурно-формационная зона (рис. 1) расположена на правобережье р. Тимптон и в низовьях р. Сутам к западу от Тыркандинской СФЗ, от которой она отделена одноименным разломом. Западная граница зоны также тектоническая и проходит по Сеймскому разлому-надвику, по которому образования зоны надвинуты на структуры Сеймской ветви Чаро-Сеймской СФЗ раннего архея, сформировавшей вместе с Нимнырской СФЗ первый континентальный массив (Иенгрский).

Джелтулинская СФЗ представляет собой линейную структуру — Сутамский синклиорий, протянувшийся в юго-восточном направлении от приустьевой части р. Тимптон через весь Алданский щит почти на 400 км при ширине от 15 до 50 км. Сложена зона гранулитовыми породами джелтулинской серии, разделенной на две свиты. Нижняя свита — кюриканская — очень пестрая по составу, представляет собой толщу переслаивающихся лейкократовых биотит-гранатовых (нередко с силлиманитом) гнейсов, диопсидовых, гиперстеновых, двупироксеновых гнейсов и кристаллических

Средний химический состав метабазальтов тимптоно-джелтулинского структурно-вещественного комплекса позднего архея Алданского щита

Table. Average chemical composition of metabasalts, the Timpton-Dzheltulin structural and material complex of the Late Archean Aldan Shield

№ п/п	n	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
1	22	48,00	1,30	15,91	2,94	9,50	0,19	7,08	10,43	2,77	1,09	0,35
2	31	49,67	0,83	15,42	1,81	9,62	0,18	6,78	10,30	2,36	0,86	0,15
3	16	48,55	1,59	15,95	1,99	11,80	0,20	5,74	9,79	2,25	0,65	0,31
4	20	50,06	0,76	15,91	2,20	8,30	0,17	6,84	9,43	3,06	1,14	0,20
5	8	48,41	1,25	14,30	2,43	9,70	0,18	6,14	12,65	2,03	0,57	0,20
6	24	49,60	0,84	15,49	2,09	8,99	0,18	7,56	10,26	2,48	0,71	0,08
7	12	49,10	1,38	14,33	3,22	10,86	0,21	6,58	10,40	2,65	0,51	0,16
8	8	48,28	2,08	13,42	5,35	9,78	0,18	6,24	9,01	3,13	1,02	0,27
9	14	50,45	1,22	17,69	4,44	4,86	0,16	5,50	8,02	3,15	1,40	0,39
10	49	50,40	0,82	16,69	4,02	5,50	0,18	7,60	10,29	2,92	1,20	0,24
11	7	47,72	2,93	14,48	3,35	10,12	0,23	5,52	11,20	3,00	1,18	0,56

Примечание. Метабазальты: 1 — вулканического пояса дьюнукенской толщи Учурской структурно-формационной зоны; 2 — островных дуг Учурской структурно-формационной зоны; 3 — океанического плато Учурской структурно-формационной зоны; 4 — островной дуги Тыркандинской структурно-формационной зоны; 5 — океанического плато Тыркандинской структурно-формационной зоны; 6 — островодужные Джелтулинской структурно-формационной зоны; 7 — континентальной плиты Джелтулинской структурно-формационной зоны; 8 — континентальных рифтов Тимптонской структурно-формационной зоны. Базальты: 9 — мезозойско-кайнозойского Охотско-Чукотского вулканического пояса; 10 — современных островных дуг; 11 — рифта Грегори, Кения; n — число анализов

Источник: 10, 11 — по [2]

Note. Metabasalts: 1 — volcanic belt of the Dyunyken unit, the Uchur structural and formational zone; 2 — island arcs of the Uchur structural and formational zone; 3 — oceanic plateau of the Uchur structural and formational zone; 4 — island arc of the Tyrkanda structural and formational zone; 5 — oceanic plateau of the Tyrkanda structural and formational zone; 6 — island arcs of the Dzheltulin structural and formational zone; 7 — continental plate of the Dzheltulin structural and formational zone; 8 — continental rifts of the Timpton structural and formational zone. Basalts: 9 — Mesozoic-Cenozoic Okhotsk-Chukotka volcanic belt; 10 — modern island arcs; 11 — Gregory Rift, Kenya; n — number of tests

Source: 10, 11 — from [2]

сланцев, в верхней трети разреза — прослои мраморов, кальцифиров, для самых низов свиты характерны графитосодержащие разности пород. Мощность — 2700 м. Верхняя свита — сутамская — весьма монотонная толща полосчатых лейкократовых биотит-гранатовых, гранатовых, нередко с графитом и (или) силлиманитом гнейсов, маломощные (1–5 м) прослои иных пород (диопсидовых гнейсов, двупироксеновых кристаллосланцев, мраморов) весьма редки. В наиболее погруженных частях Сутамского синклинория над монотонной толщей лейкократовых гнейсов сохранилась верхняя часть свиты мощностью до 500 м, весьма насыщенная мраморами, кальцифирами, диопсидовыми гнейсами. Мощность сутамской свиты — до 3500 м, а джелтулинской серии — 6000 м.

Особенностью вещественного состава джелтулинской серии является резкое преобладание явно первично осадочных образований (не менее 85 %) над породами первично вулканогенными [6]. Эти породы преобразованы в условиях гранулитовой фации умеренных температур (800 °C) и давлений (7–8 кбар). Резко подчиненные им по объему первично вулканогенные породы основного состава (двупироксен-амфиболовые кристаллосланцы) по результатам химического анализа 37 образцов соответствуют в равной мере толеитовым и известково-щелочным метабазальтам Na и K-Na серий. Их средний химический состав приведен в таблице. На диаграмме K–Ti фигуративные точки джелтулинских метабазальтов легли в два поля (рис. 5): островодужных базальтов — 24 точки и платобазальтов — 12 точек. На диаграмме K–P ни одна из них не попала в океанические поля. Присутствие в Джелтулинской СФЗ метабазальтов островодужного типа сомнительно из-за их несовместимости с хорошо дифференцированными осадочными породами джелтулинской серии.

Для разрешения возникшей несогласованности следует обратить внимание на геологическую позицию пород джелтулинской серии: они по Сеймскому надвигу тектонически полого (10–30°) надвинуты на образования гидатской серии Чаро-Сеймской СФЗ раннего архея. Сопоставление островодужных метабазальтов обеих зон свидетельствует об их одинаковости: те и другие нормального ряда, K-Na серии, умеренно глиноземистые, коэффициент железистости почти одинаков — 0,599 и 0,594, а показатель глубины магмогенерации K_2O/Na_2O совсем одинаков — 0,28 и 0,28. В смежной Тыркандинской СФЗ показатель глубины выплавления базальтовой магмы — 0,37. С. Д. Великославинский (1978 г.)¹ оценил давление магмообразования для метабазальтов Чаро-Сеймской СФЗ в 9 кбар (27–30 км). Такая же оценка должна быть и для метабазальтов Джелтулинской зоны. Таким образом, есть основание полагать, что островодужные метабазальты Джелтулинской СФЗ к этой зоне не принадлежат, а относятся к породам подстилающей

гидатской серии Чаро-Сеймской СФЗ. Очень может быть, что вместе с метабазальтами к гидатской серии нижнего архея относится и нижняя половина разреза (докарбонатная) кюриканской свиты джелтулинской серии верхнего архея. Если это так, то тем самым устраняется динамическое противоречие между мощной толщей дифференцированных осадков и активным базальтовым магматизмом в Джелтулинской СФЗ.

Метабазальты, попавшие на диаграмме K–Ti в поле стабильных плит, совершенно уникальны: показатель глубины магмогенерации K_2O/Na_2O у них минимальный — 0,19. В соответствии с этим показателем джелтулинские плитные метабазальты должны были выплавляться на глубине 15–20 км, что противоречит всей геологической ситуации Джелтулинской СФЗ. Возможно, они более молодые. Sm-Nd изотопные датировки этих джелтулинских метабазальтов 2,4–2,3 млрд лет указывают на их раннепротерозойский возраст.

Таким образом, характеристики Джелтулинской СФЗ (формирование между Тыркандинской островной дугой и Иенгским континентальным массивом, скорее всего, на краю последнего; мощная толща терригенно-карбонатных отложений; слабый, точнее отсутствующий основной вулканизм; довольно мощная земная кора) оставляют мало сомнений для возможности определения геодинамического режима позднеархейской Джелтулинской СФЗ как осадочного бассейна на пассивной континентальной окраине.

Тимптонская структурно-формационная зона (рис. 1) расположена в долине р. Тимптон, преимущественно на ее левобережье. Восточной границей зоны является Тимптонский надвиг, по которому раннеархейские породы гидатской серии Чаро-Сеймской СФЗ надвинуты на образования Тимптонской зоны [13]. Этот геологический факт привел к пространственному разобщению выходов пород тимптонской и джелтулинской серий, которые долгое время всеми исследователями описывались в едином разрезе как последовательные толщи. Теперь же приходится их считать синхронными образованиями, накапливавшимися в разных СФЗ единого позднеархейского тимптоно-джелтулинского комплекса.

Выполняющие Тимптонскую СФЗ породы тимптонской серии со структурным несогласием [14] лежат непосредственно на образованиях нижнеархейской верхнеалданской серии в Нимырской СФЗ. Такая позиция тимптонской серии сказалась на некоторых особенностях ее состава. Разрез серии характеризуется относительно повышенным содержанием карбонатных и известково-силикатных пород (мраморы, кальцифиры, диопсидовые кристаллосланцы и диопсидовые породы), широким распространением амфиболовых, биотит-амфиболовых, амфибол-пироксеновых гнейсов и кристаллосланцев, а также присутствием метаморфизованных аналогов соленосных отложений [7; 15]. Этот разрез разделен на две свиты: федоровскую (нижняя) мощностью до 3000 м и иджакскую мощностью 2000 м. Федоровская свита вмещает почти все месторождения флогопита Алданского горнопромыш-

¹Великославинский С. Д. Петрология и геохимия кристаллических сланцев основного состава центральной части Алданского щита : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Л. : Изд-во ВСЕГЕИ, 1978. 26 с.

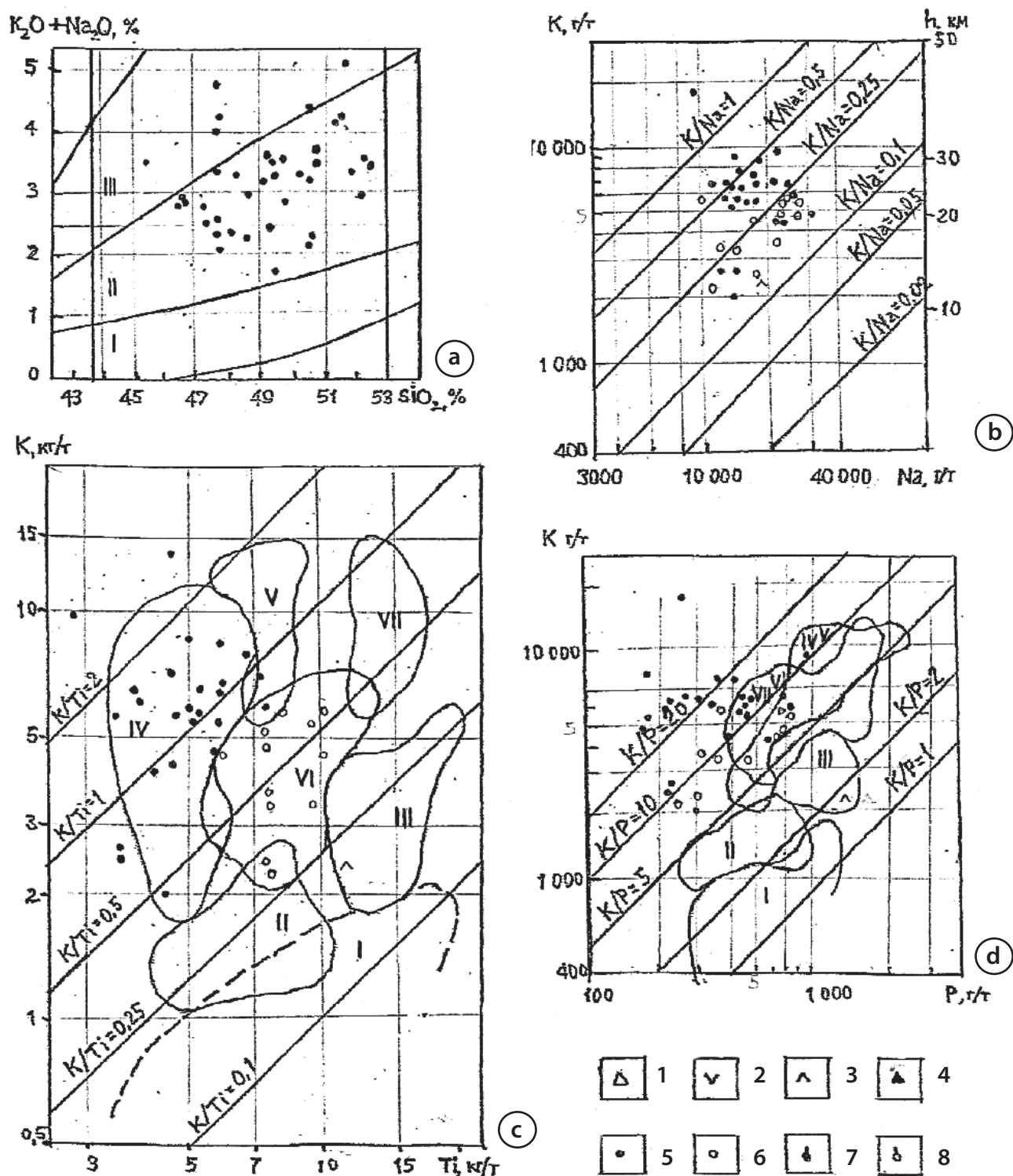


Рис. 5. Положение фигуративных точек химических составов метабазальтов Желтулинской структурно-формационной зоны на петрохимических *a* — SiO_2 — $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$, *b* — K-Na и геодинамических *c* — K-Ti, *d* — K-P диаграммах

Условные обозначения см. на рис. 2 и 3

Fig. 5. Petrochemical *a* — SiO_2 — $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$, *b* — K-Na and geodynamic *c* — K-Ti, *d* — K-P diagrams, with figurative points of metabasalts chemical compositions located (the Dzheltulin structural and formational zone)

Refer to the symbols in Fig. 2, 3

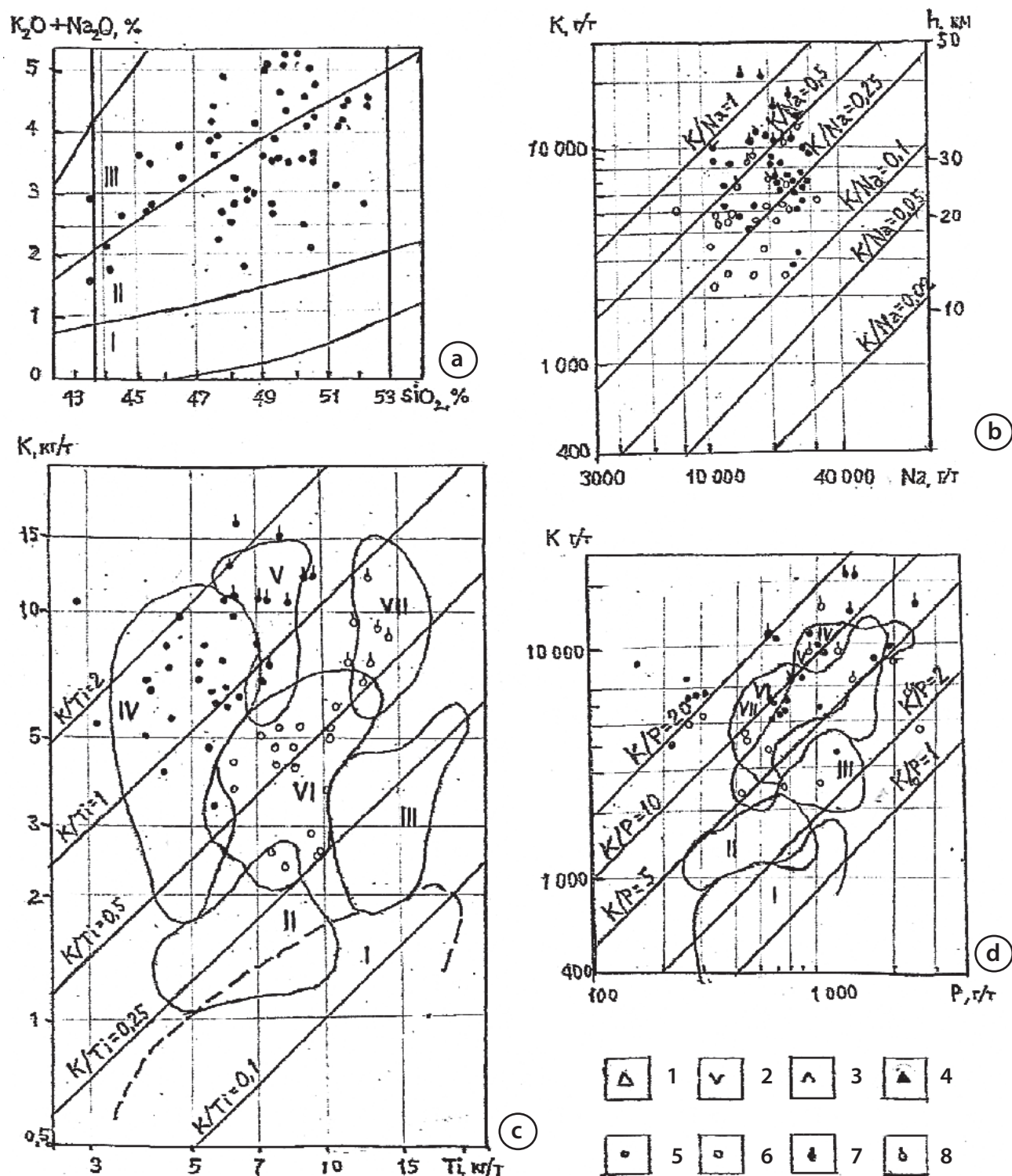


Рис. 6. Положение фигуративных точек химических составов метабазальтов Тимптонской структурно-формационной зоны на петрохимических *a* — SiO_2 — $(K_2O + Na_2O)$, *b* — $K-Na$ и геодинамических *c* — $K-Ti$, *d* — $K-P$ диаграммах

Условные обозначения см. на рис. 2 и 3

Fig. 6. Petrochemical *a* — SiO_2 — $(K_2O + Na_2O)$, *b* — $K-Na$ and geodynamic *c* — $K-Ti$, *d* — $K-P$ diagrams, with figurative points of metabasalts chemical compositions located (the Timpton structural and formational zone)

Refer to the symbols in Fig. 2, 3

ленного района, поэтому она подробно изучена и расчленена на три подсвиты и ряд стратиграфических горизонтов. Местами разрез федоровской свиты имеет ритмичное флишеподобное строение, описанное А. Р. Энтиным в 1971 г.¹ по рекам Ыллымах и Оюмрак. В иджакской свите по сравнению с федоровской значительно меньше карбонатных пород и больше глиноземистых.

Толща пород тимптонской серии дислоцирована в сложную систему преимущественно изоклинальных складок, плавно обрамляющих с севера, востока и юго-востока Нижнетимптонский купол из подстилающих образований верхнеалданской серии нижнего архея. Региональный метаморфизм пород Тимптонской СФЗ характеризуется условиями умеренных давлений и температур (670–725 °C) [13], причем в восточном направлении метаморфизм усиливается. Таким преобразованием были подвергнуты первично осадочные породы: доломиты, известковые доломиты, глинистые известняки, известковые глины, песчано-глинистые отложения и резко подчиненные им по объему первично вулканогенные образования: базальты, андезиты-базальты. В. И. Виноградов и др. [7] указывают на присутствие среди карбонатных пород эвапоритов.

59 образцов тимптонских двупироксен-амфиболовых, диопсид-амфиболовых и амфиболовых кристаллических сланцев подвергнуты химическому анализу. Все они соответствуют различным базальтам (рис. 6). Их общей особенностью является повышенная суммарная и калиевая щелочность. Поэтому среди тимптонских метабазальтов преобладают субщелочные разности (44 %), хотя много и толеитов (37 %). На диаграмме K–Ti они разместились почти поровну в верхней половине полей островодужных (37 %) и платформенных (30 %) базальтов. Петрологические исследования С. Д. Великославинского (1978 г.)² прямо указывают на формирование магматического очага метабазальтов тимптонской (у него это федоровская) серии при $P = 9–10$ кбар, т. е. на глубине 30–33 км. Отношение K_2O/Na_2O у преобладающих островодужных субщелочных метабазальтов, равное 0,32, подтверждает глубину магмогенерации, характерную для континентальных плит. 17 % метабазальтов Тимптонской СФЗ попали в поле континентальных вулканических поясов. Показатель глубины магмогенерации у них 0,517. Это самый высокий показатель среди всех метабазальтов архея Алданского щита. Он указывает на глубину магматического очага не менее 40 км, что соответствует мощности (толщине) зрелой континентальной земной коры. По-видимому, к началу формирования позднеархейской Тимптонской СФЗ таковым стал раннеархейский Иенгрский массив. Все это вместе

позволяет считать тимптонские метабазальты континентальными платобазальтами.

Таким образом, повышенная калиевоcть тимптонских метабазальтов, значительная глубина их магмогенерации, особенности первичноосадочных пород тимптонской серии позволяют предполагать существование континентального тектонического режима в Тимптонской структурно-формационной зоне в позднем архее.

Для конкретизации континентального режима следует напомнить, что тимптонские осадочные породы формировались на раннеархейском Нимнырском протоконтинентальном массиве и что среди метабазальтов Тимптонской и Нимнырской СФЗ отмечено самое большое в архее Алданского щита количество метабазальтов континентально-рифтового типа — 13 и 31 % соответственно. Если не считать, что логически ожидаемое событие является случайным совпадением, то можно заключить, что на месте Тимптонской СФЗ в позднем архее существовал внутриконтинентальный осадочный бассейн, развившийся из континентальных рифтов (авлакогенов), в котором (в бассейне) «седиментация происходила в нормальном или осолоненном морском бассейне» [7, с. 22].

30 % тимптонских метабазальтов на диаграмме K–Ti легли в поле базальтов стабильных плит. Они так же, как метабазальты Джелтулинской СФЗ, обладают уникально низким отношением K_2O/Na_2O , равным 0,20, что указывает на небольшую глубину (не более 20 км) базальтового магматического очага. Возможно, они также внедрялись в более позднее время, о чем свидетельствуют Sm–Nd датировки: 2,46–2,27 млрд лет. Наверное, можно говорить о проявлении раннепротерозойского малоглубинного базальтового магматизма на площади континентальных Джелтулинской и Тимптонской СФЗ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Завершив на этом краткую геолого-геохимическую характеристику четырех СФЗ позднеархейского тимптоно-джелтулинского комплекса, можно акцентированно повторить результаты исследования геодинамической природы СФЗ этого комплекса. Формирование наблюдаемых ныне супракрустальных толщ в них происходило в следующих геодинамических обстановках:

— Учурская СФЗ: серия небольших (сотни километров) островных дуг, развитых на коре как океанического, так и континентального типов в краевом бассейне;

— Тыркандинская СФЗ: карбонатно-вулканогенная островная дуга;

— Джелтулинская СФЗ: континентальный осадочный бассейн на пассивной окраине Иенгрского массива;

— Тимптонская СФЗ: внутриконтинентальный осадочный бассейн, развившийся из континентальных рифтов (авлакогенов) на Иенгрском массиве.

Выявленные в результате проведенного анализа геодинамические режимы в позднеархейском тимптоно-джелтулинском СВК демонстрируют с высокой

¹Энтин А. Р. Основные закономерности размещения флогопитовых и магнетитовых месторождений в центральной части Алданского щита : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Новосибирск, 1971. 26 с.

²Великославинский С. Д. Петрология и геохимия кристаллических сланцев основного состава центральной части Алданского щита : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Л. : Изд-во ВСЕГЕИ, 1978. 26 с.

вероятностью действие механизма тектоники литосферных плит уже в это древнее время. Вместе с ранее установленными геодинамическими режимами для раннеархейского иенгрского комплекса [1] можно утверждать, что формирование континентальной земной коры осуществлялось действием механизма тектоники литосферных плит на протяжении всей геологической истории Земли и продолжается поныне.

Таким образом, поставленная цель данного исследования достигнута. Наглядным результатом этого является авторская геодинамическая схема архейд Алданского щита (рис. 7).

В заключение следует подчеркнуть важность выделения в архейских образованиях структурно-формационных зон как основы решения возникающих проблем в геологии и металлогении архея.

Проведенное исследование подтвердило обоснованность выделения зон не только из-за разного их вещественного состава (на уровне пород), но и различного содержания в зонах метабазальтов океанической природы. Так, в Учурской зоне таких метабазальтов 42 % от числа анализированных образцов, в Тыркандинской зоне таких пород 24 %, в континентальных Желтулинской и Тимптонской зонах океанических пород ожидаемо нет. Это значит, что структурно-формационные зоны являются отражением геологических структур с разным геодинамическим режимом.

Присутствующий на Алданском щите субганский структурно-вещественный комплекс позднеархейского возраста (3,0–2,6 млрд лет), представленный зеленокаменными поясами, в данной работе не рассматривается. Это отдельная большая тема.

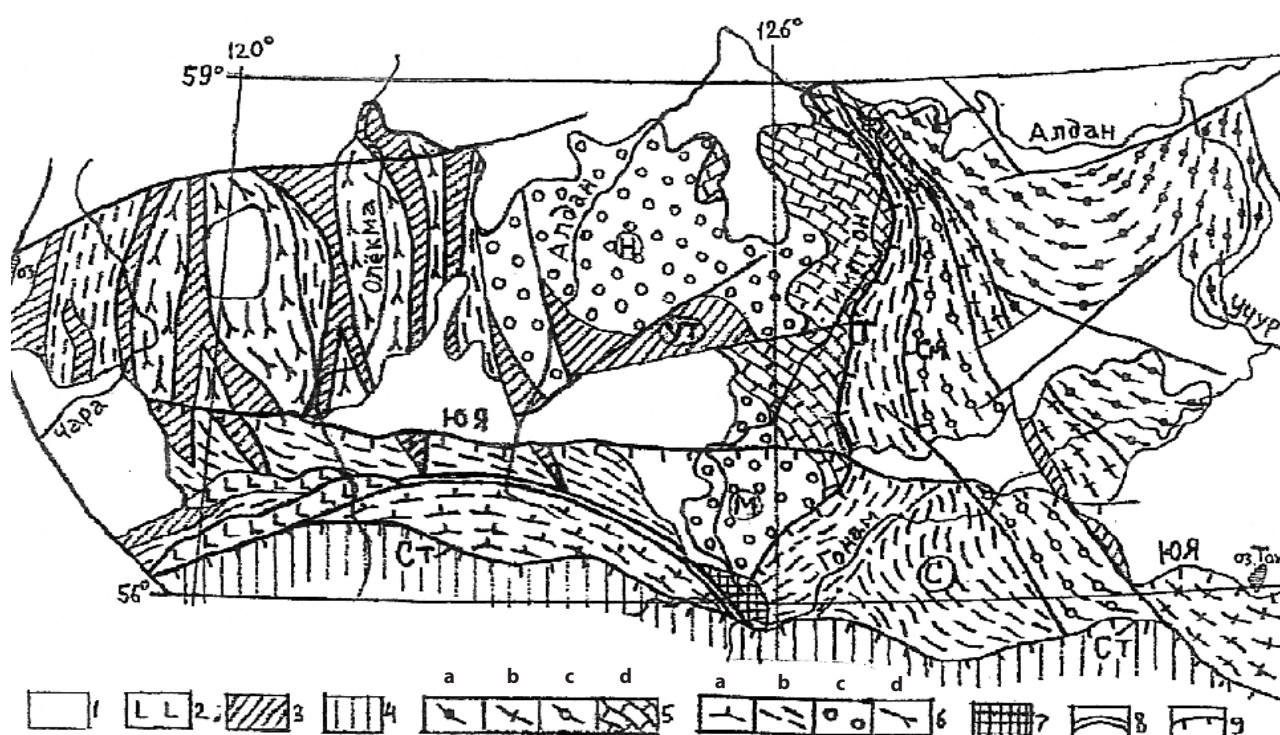


Рис. 7. Авторская геодинамическая схема архейд Алданского щита

1 — постархей: вулканогенно-осадочные образования на континентальной плите (Сибирская платформа); 2, 3 — поздний архей: 2 — массивы анортозитов, 3 — разнообразные островные дуги (субганский комплекс); 4 — нерасчлененный архей Станового хребта: океаническая плита и островные дуги (неразделенные); 5 — поздний архей (тимптоно-желтулинский комплекс): а — серия малых островных дуг на океанической и континентальной плитах (Учурская зона), б — островная дуга (Тыркандинская зона), с — осадочный бассейн на континентальной окраине (Желтулинская зона), д — внутриконтинентальный осадочный бассейн (Тимптонская зона); 6 — ранний архей (иенгрский комплекс): а — океаническая плита со срединно-океаническим хребтом и океаническими островами (Зверевская зона), б — островная дуга, местами (в Сутамском блоке) на океанической плите (Чаро-Сеймская зона), с — континентальный массив (Нимнырская зона), д — окраинно-континентальный вулканоген (Олёкминская зона); 7 — катархей (тангракский комплекс): базальтовое ложе (Тангракский блок); 8 — зона Беньофа (Алдан-Становой структурный шов); 9 — надвиги: Ст — Становой, Юя — Южно-Якутский, Т — Тимптонский, См — Сеймский. Буквы в кружках: Н — Нимнырский, М — Модемконский, С — Сутамский блоки, УТ — Унгра-Тимптонская зона

Fig. 7. The author's geodynamic diagram of the Aldan Shield archeides

1 — Post-Archean: volcanogenic-sedimentary formations on the continental plate (Siberian Platform); 2, 3 — Late Archean: 2 — anorthosite massifs, 3 — various island arcs (Subgan complex); 4 — undifferentiated Archean Stanovoy Ridge: oceanic plate and island arcs (undivided); 5 — Late Archean (Timpton-Dzheltulin complex): а — series of small island arcs on the oceanic and continental plates (Uchur zone), б — island arc (Tyirkanda zone), с — sedimentary basin on the continental margin (Dzheltulin zone), д — intracontinental sedimentary basin (Timpton zone); 6 — Early Archean (Iyengra complex): а — oceanic plate with a mid-ocean ridge and oceanic islands (Zverevskaya zone), б — island arc, in places (in the Sutam block) on the oceanic plate (Charo-Seim zone), с — continental massif (Nimnyr zone), д — continental margin volcano gene (Olyokma zone); 7 — Katarchean (Tangrak complex): basalt bed (Tangrak block); 8 — Benioff zone (Aldan-Stanovoy structural suture); 9 — thrusts: Cr — Stanovoy, YU — South Yakut, T — Timpton, Sm — Seim. Letters in circles: H — Nimnyr, M — Molemkon, C — Sutam blocks, UT — Unga-Timpton zone

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фрумкин И. М. Геодинамические режимы в раннем архее Алданского щита // Региональная геология и металлогения. 2021. № 86. С. 45–61. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2021_86_45-61.
2. Лутц Б. Г. Геохимия океанического и континентального магматизма. М. : Недра, 1980. 247 с.
3. Великославинский С. Д., Крылов Д. П. Геодинамическая типизация базальтов по геохимическим данным // Геотектоника. 2014. Т. 48, № 6. С. 77–91. <https://doi.org/10.7868/S0016853X14060071>.
4. Sm-Nd изотопные провинции Алданского щита / А. Б. Котов [и др.] // Доклады Российской академии наук. Науки о земле. 2006. Т. 410. № 1. С. 91–94.
5. Фрумкин И. М. Новые данные по стратиграфии архея Алданского щита // Совещание по разработке стратиграфических схем Якутской АССР : тез. докл. Л., 1961. С. 9–10.
6. Фрумкин И. М. Структурно-литологический метод картирования докембрийских образований и результаты его применения на Алданском щите // Проблемы изучения геологии докембрия. Л. : Наука, 1967. С. 135–149.
7. Древнейшие сульфаты в архейских образованиях Южно-Африканского и Алданского щитов и эволюция кислородной атмосферы Земли / В. И. Виноградов [и др.] // Литология и полезные ископаемые. 1976. № 4. С. 12–27.
8. Фрумкин И. М. Алданский щит // Геология зоны БАМ. Т. 1: Геологическое строение / отв. ред. Л. И. Красный. Л. : Недра, 1988. С. 123–144.
9. Кицул В. И., Березкин В. И. Формации и минеральные фации архейских метаморфических пород Алданского щита // Труды ВСЕГЕИ. Т. 265. Л., 1977. С. 113–119.
10. Фрумкин И. М. Тектонические режимы в архее Алданского щита // Геология и перспективы рудоносности фундамента древних платформ / отв. ред. К. А. Шуркин, В. М. Шемякин. Л. : Наука, 1987. С. 307–313.
11. Бабаян Г. Д., Горнштейн Д. К., Фрумкин И. М. Алданская антеклиза // Геологические результаты геофизических исследований в Якутской АССР / отв. ред. Г. Д. Бабаян [и др.]. Иркутск : Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1972. С. 59–71.
12. Карсаков Л. П. Глубинные гранулиты: на примере Чогарского комплекса Становой складчатой системы Восточной Сибири. М. : Наука, 1978. 152 с.
13. Дук В. Л., Кицул В. И. Изучение докембрия Алданского щита методами структурной и метаморфической петрологии // Структурная и метаморфическая петрология раннего докембрия Алданского щита / отв. ред. Г. А. Гринберг. Якутск : Изд. ЯФ СО АН СССР, 1975. С. 5–18.
14. Дук В. Л., Салье М. Е., Байкова В. С. Структурно-метаморфическая эволюция и флогопитоносность гранулитов Алдана. Л. : Наука, 1975. 227 с.
15. Сердюченко Д. П. Скаполитовые породы из Слюдяно-Алданского архейского комплекса // Вопросы минералогии осадочных образований. Кн. 3, 4. Львов : Изд-во Львовского ун-та, 1956. С. 487–500.

REFERENCES

1. Frumkin I. M. Early Archean geodynamic regimes in the Aldan shield. *Regional Geology and Metallogeny*. 2021; (86): 45–61. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2021_86_45-61. (In Russ.).
2. Lutts B. G. Geochemistry of oceanic and continental magmatism. Moscow: Nedra; 1980. 247 p. (In Russ.).
3. Velikoslavinsky S. D., Krylov D. P. Geochemical discrimination of basalts formed in major geodynamic settings. *Geotectonics*. 2014; 48 (6): 427–439. <https://doi.org/10.1134/S0016852114060077>. (In Russ.).
4. Sm-Nd isotopic provinces of the Aldan Shield / A. B. Kotov [et al.]. *Dokl. Earth Sc.* 2006; 410 (1): 1066–1069.
5. Frumkin I. M. New data on the stratigraphy of the Archean Aldan Shield. *Meeting on the stratigraphic schemes development in the Yakut ASSR: extended abstracts*. Leningrad; 1961. P. 9–10. (In Russ.).
6. Frumkin I. M. Structural and lithological method of mapping Precambrian formations and results of its application on the Aldan Shield. *Problems of studying Precambrian geology*. Leningrad: Nauka; 1967. P. 135–149. (In Russ.).
7. Oldest sulfates in Archean deposits of the South-African and Aldanian shields and evolution of the Earth oxygen atmosphere / V. I. Vinogradov [et al.]. *Lithology and Mineral Resources*. 1976; (4): 12–27.
8. Frumkin I. M. Aldan Shield. *Geology of the BAM zone. Vol. 1. Geological structure*. Leningrad: Nedra; 1988. P. 123–144. (In Russ.).
9. Kitsul V. I., Berezkin V. I. Formations and mineral facies of Archean metamorphic rocks of the Aldan Shield. *VSEGEI Proc. Vol. 265*. Leningrad; 1977. P. 113–119. (In Russ.).
10. Frumkin I. M. Tectonic regimes in the Archean Aldan Shield. *Geology and prospects of ore bearing potential of the ancient platforms basement*. Leningrad: Nauka; 1987. P. 307–313. (In Russ.).
11. Babayan G. D., Gornshteyn D. K., Frumkin I. M. Aldan anteclise. *Geological results of geophysical research in Yakut ASSR* / Eds. G. D. Babayan [et al.]. Irkutsk: East Siberian Book Publ. House; 1972. P. 59–71. (In Russ.).
12. Karsakov L. P. Deep granulites: based on the Chogar complex of the Stanovoy Fold system of Eastern Siberia. Moscow: Nauka; 1978. 152 p. (In Russ.).
13. Duk V. L., Kitsul V. I. Study of the Precambrian Aldan Shield by methods of structural and metamorphic petrology. *Structural and metamorphic petrology of the Early Precambrian Aldan Shield* / Ed. G. A. Grinberg. Yakutsk: Publ. House of Yakutsk Office, Siberian Branch, AS USSR; 1975. P. 5–18. (In Russ.).
14. Duk V. L., Salye M. E., Baykova V. S. Structural-metamorphic evolution and phlogopite potential of the Aldan granulites. Leningrad; 1975. 227 p. (In Russ.).
15. Serdyuchenko D. P. Scapolitic rocks from the Mica-Aldan Archean complex. *Issues of mineralogy of sedimentary formations*. Vol. 3, 4. Lviv: Lviv University Publ. House; 1956. P. 487–500. (In Russ.).

Исаак Минаевич Фрумкин

Кандидат геолого-минералогических наук,
Заслуженный геолог Республики Саха (Якутия),
главный геолог, пенсионер

АО «Якутскгеология», Якутск, Россия

isaakfrumkin@gmail.com

Isaak M. Frumkin

PhD (Geology and Mineralogy),
Honored Geologist of the Republic of Sakha (Yakutia),
Chief Geologist, pensioner

Yakutskgeologiya, Yakutsk, Russia

isaakfrumkin@gmail.com

Авторское выражение благодарности: настоящая работа в значительной мере базируется на химических анализах метаморфических пород. Образцы для анализов в течение ряда лет собирались очень многими геологами, которые в трудных условиях Южной Якутии вели полевые маршрутные работы или геологическую съемку. Автор выражает всем им огромную благодарность и называет имена тех из них, чей вклад в массив использованных анализов наиболее значителен. Это геологи С. Д. Великославинский, В. Л. Дук, Е. П. Максимов, Н. В. Попов, А. Н. Зедгенизов, В. И. Березкин, В. И. Уютов, В. В. Юшманов, Э. Ф. Баранов, В. И. Лядин, И. М. Фрумкин.

Acknowledgments: the current paper is largely based on chemical analyses of metamorphic rocks. Many geologists, who were performing field route work or geological surveys in severe conditions of Southern Yakutia, were collecting the analysis samples for a number of years. The author expresses his deep gratitude to all of them and names those whose contribution to creating the used analyses array is most significant. These are geologists S. D. Velikoslavinskiy, V. L. Duk, E. P. Maksimov, N. V. Popov, A. N. Zedgenizov, V. I. Berezkin, V. I. Uyutov, V. V. Yushmanov, E. F. Baranov, V. I. Lyadin, I. M. Frumkin.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: the author declares no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 17.07.2024
Одобрена после рецензирования 20.09.2024
Принята к публикации 20.03.2025

Submitted 17.07.2024
Approved after reviewing 20.09.2024
Accepted for publication 20.03.2025