

Санкт-Петербургский Государственный Университет

АЛЕКСАНДРОВ Алексей Михайлович

Выпускная квалификационная работа

**Геохимическая дискриминация базальтов с использованием методов
машинного обучения на примере интрузий восточной окраины Сибирской
платформы**

Уровень образования: бакалавриат

Направление 05.03.01 «Геология»

Основная образовательная программа СВ.5018.2018 «Геология»

Научный руководитель:

доцент кафедры геохимии

Институт наук о Земле СПбГУ

к.г.-м.н. С. В. Малышев

Рецензент:

м.н.с. ИЗК СО РАН

к.г.-м.н. Марфин А. Е.

Санкт-Петербург

2022 г.

Содержание

Введение	3
Цель и задачи	4
Глава 1. Геохимическая дискриминация базальтов	5
1.1. Минеральный и химический состав базальтов	5
1.2. Поведение элементов при кристаллизации породы	7
Глава 2. Методы машинного обучения	10
2.1. Решающие деревья	10
2.2. Обучающая выборка	11
2.3. Случайные леса	13
Глава 3. Геологическая характеристика исследуемого объекта	15
3.1. Петрографическая характеристика	15
3.2. Геохимическая характеристика	16
3.2.1 Породообразующие элементы	16
3.2.2. Редкие и рассеянные элементы	16
Глава 4. Результаты и выводы	20

Введение

Базальтовый магматизм - процесс, происходящий в областях распространения океанической коры, на континентальных окраинах, где он связан с субдукционными процессами, а также в зонах проявления континентального рифтинга. Дискриминацией базальтов называют определение тектонической обстановки их происхождения, основанное на их химическом составе. Она является важной частью процесса реконструкции эволюции земной коры и магм. В данной работе рассматривается вопрос дискриминации океанических базальтов. Различия между базальтами срединно-океанических хребтов (MORB), базальтами океанических островов (OIB) и базальтами островных дуг (IAB) являются самыми показательными с точки зрения условий их образования - они имеют разные источники вещества и кристаллизуются при разных температурах и давлении. MORB образуются в областях спрединга на глубинах менее 100 км., в результате частичного плавления верхней мантии [10]. OIB являются результатом деятельности мантийных плюмов, поднимающихся от границы мантии и ядра, глубины образования этих пород незначительно больше, чем для MORB - около 100 км. [12]. Глубина источника вещества для IAB варьирует в широких пределах - от 600 до 30 км. IAB связаны с зонами субдукции, большой вклад в их состав вносят захватываемые осадочные породы и вода [4]. При этом, определение происхождения того или иного образца – сложная и многосоставная задача, включающая следующие этапы: 1. изучение минерального состава породы; 2. классификация по петрогенным элементам; 3. классификация и оценка вклада сопутствующих процессов (фракционной кристаллизации, частичного плавления, коровой контаминации) в химический состав породы по редким элементам; 4. определение природы источника вещества. Традиционно при проведении тектонической интерпретации происхождения образца могут использоваться дискриминационные диаграммы. При этом, диаграммы имеют несколько значительных недостатков: во-первых, каждая диаграмма имеет свои ограничения, во-вторых, поля на этих диаграммах проведены «на глаз»[14], что влияет на правильность отнесения породы к какой-то конкретной группе, в-третьих, одна диаграмма учитывает ограниченное количество факторов (концентраций элементов или отношений этих концентраций). Это заставляет использовать для определения происхождения образца сразу несколько диаграмм. Для оптимизации процесса дискриминации базальтов предлагается использовать метод машинного обучения. Его преимуществами является математическая строгость модели, использование параллельно неограниченного числа факторов и скорость получения результата.

Цель и задачи

Целью работы разработка алгоритма машинного обучения, способного определить принадлежность того или иного образца к одной из тектонических обстановок и его опробование на базальтах восточной окраины Сибирской платформы. Для достижения цели требуется решить ряд задач:

1. Изучение традиционных методов дискриминации базальтов
2. Разработка алгоритма машинного обучения
3. Создание обучающей базы данных; обучение алгоритма
4. Классификация образцов из даек восточной окраины Сибирской платформы традиционными методами
5. Классификация образцов из даек восточной окраины Сибирской платформы при помощи алгоритма машинного обучения
6. Сопоставление результатов

Глава 1. Геохимическая дискриминация базальтов

1.1. Минеральный и химический состав базальтов

Минеральный состав базальта зависит от состава магм и условий образования породы. Большая часть базальтов сложена микролитами плагиоклаза и пироксена с вулканическим стеклом. Ко второстепенным элементам базальтов относятся оливин, амфиболы, слюды. Кроме того, в качестве акцессорных минералов в базальтах часто встречаются рудные минералы, такие как магнетит, титаномagnetит, ильменит и гематит. Химический состав базальтов характеризуется содержанием SiO_2 42-57% и суммой $K_2O + Na_2O$ (называемой щелочностью) до 10%, Al_2O_3 – 14-20%, TiO_2 - 1-2,5 %, CaO на уровне 9%, суммарным содержанием оксидов железа II и III в 8-15%, MgO до 8%, P_2O_5 около 1%. При этом, содержания основных элементов в остаточном расплаве меняются по мере кристаллизации плагиоклаза, пироксена и оливина, что затрудняет интерпретацию источника вещества на основании содержаний основных элементов [6]. Гораздо меньше этому подвержены крупноионные литофильные элементы, высокозарядные и редкоземельные элементы, что позволяет на основании их содержаний определять источник вещества.

Толеитовые базальты (нормальной щелочности) образуются и в MORB, и при внутриплитном магматизме, и в зонах субдукции. Выделяют две разновидности базальтов срединно-океанических хребтов: примитивные (N-MORB), образующиеся из обедненного мантийного источника (DM – depleted mantle) и обогащенные (E-MORB), в которых обедненные магмы смешиваются с поднимающимися с глубин обогащенными потоками. Все MORB выплавляются в условиях низкого давления и быстрого отвода тепла. Из-за этого толеитовые базальты срединно-океанических хребтов содержат малое количество оливина, который первым покидает расплав. Нормативными минералами являются плагиоклаз и ортопироксен. Базальтам COX характерно низкое содержание K_2O (до 0.5%), всех крупноионных литофильных элементов, Mg, Ca, HFSE, LILE и LREE. HREE, при этом, более совместимы в нормативных для N-MORB минералах, поэтому обнаруживают способность к накоплению в породе. E-MORB можно отличить от N-MORB по содержанию LREE – благодаря добавлению к обедненному расплаву глубинного компонента, порода обогащается этими элементами. Содержание HREE, при этом, остается на равных уровнях в MORB обоих типов, что позволяет отличить их от остальных базальтов.

Толеитовые базальты, образующиеся в обстановках внутриплитного магматизма обнаруживают значительно большие (в 2-3 раза) концентрации LILE и легких REE. Так

же, в них отмечается заметно более высокие содержания железа. Понижаются, при этом, магнезиальность, содержания Fe, Ni и HREE. Толеиты островных дуг отличаются от описанных выше еще более низкими содержаниями элементов группы железа и LILE. Именно низкие значения Fe являются диагностическим признаком толеитовых островодужных базальтов.

Субщелочные серии состоят из известково-щелочной и щелочно-базальтовой разновидностей. Базальты известково-щелочной серии шире всего представлены на островных дугах на активных континентальных окраинах. Породы, при этом, могут быть представлены как собственно базальтами, так и андезитами, андезитобазальтами и риолитами. Нормативными минералами, в порядке убывания их количества в породе, являются пироксены, роговая обманка и плагиоклазы. С петрохимической точки зрения, в породах наблюдается явное обогащение Al_2O_3 , более высокое содержание щелочей и обеднение Fe. Рассеянные элементы в островодужных базальтах показывают обогащение Sr, Ni и большинством литофильных элементов.

Базальты щелочно-базальтовой серии формируются при внутриплитном магматизме и в субдукционных обстановках. Минеральный состав этих пород близок к составу известково-щелочной серии, отличается по наличию включений высокобарических минералов, таких как пироп, санидин, титан-флогопит. Базальты щелочно-базальтовой серии, с петрохимической точки зрения, характеризуются повышенным содержанием щелочей, высокие содержания большинства литофильных элементов, элементов группы Fe. Отмечается обогащение Rb, Ba, Zr и REE.

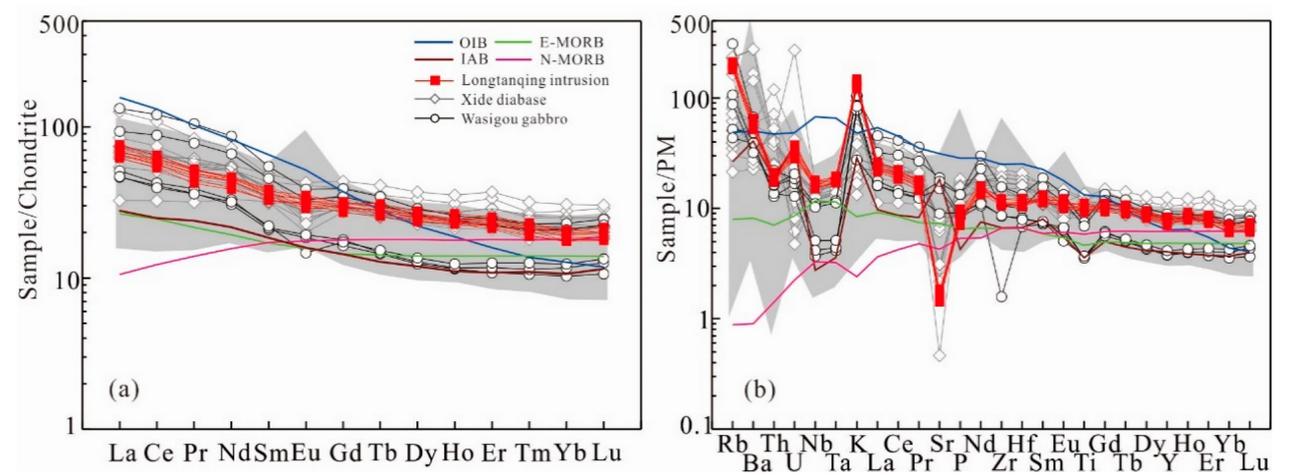


Рис. 1: Спектры распределения редких элементов в разных тектонических обстановках по [3]. Сплошная линия отражает состав OIB, бордовая - IAB, розовая - N-MORB, зеленая - E-MORB

Вулканиды щелочной серии проявляются при островодужном магматизме и в субдукционных обстановках. Базальты щелочных разновидностей обладают высокой щелочностью, не менее 6%, состав рассеянных элементов показывает значительное обогащение некогерентными элементами (Rb, Ba, Sr, Zr, Nb, REE). В минеральном составе преобладают нефелин и калиевой полевой шпат, во вкрапленниках содержится авгит, гиперстен, плагиоклаз, апатит и рудные минералы.

1.2. Поведение элементов при кристаллизации породы

Рассмотрим подробнее поведения элементов при кристаллизации породы: здесь важно обратить внимание на влияние условий образования на содержания некоторых характерных элементов или соединений внутри групп LILE, HFSE и REE. Спектры распределения этих элементов в изучаемых тектонических обстановках приведены на рис. 1.

1. LILE – Large Ion Lithophile Elements. Группа состоит из Cs, Rb, K, Ba, Sr, Pb. Это большие по радиусу атомы с низкими зарядами. В расплавах эти элементы весьма несовместимы, за редкими исключениями. Так же, они весьма подвижны при выветривании из-за флюидомобильности, что делает практически невозможным исследование древних и вторично измененных пород. При фракционировании Ba и Rb несовместимы до появления КППШ и слюд. Sr имеет тенденцию замещать Ca в плагиоклазе, его совместимость падает с ростом давления, что позволяет оценить глубину фракционирования.
2. HFSE – High Field Strength Elements. Группа представлена Sc, Y, V, Th, U, Pb, Zr, Hf, Ti, Nb и Ta. Эти элементы, в основном, достаточно несовместимы, не столь подвержены выветриванию, как LILE и поэтому служат лучшими петрогенетическими индикаторами. Внутри группы есть элементы с крайне близкими поведением: это пара Zr и Hf и пара Nb и Ta. При фракционировании Ta и Hf склонны уходить из расплава. Th, при этом, более несовместим и в расплаве остается. V и Ti примерно одинаково несовместимы на ранних этапах фракционирования, а появление различий в поведении выявляет появление самостоятельной фазы титана.
3. REE – Rare Earth Elements. Группа состоит из La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb и Lu. Редкоземельные элементы являются одними из самых неподвижных элементов, они практически нечувствительны к выветриванию и низкотемпературному метаморфизму и, благодаря этому, могут использоваться для дискриминации

сильно измененных пород. В целом, наибольшая совместимость большинства из этих элементов наблюдается в гранате. Ортопироксен и роговая обманка имеют тот же эффект, но в меньшей степени. Плагиоклаз накапливает легкие REE активнее, чем тяжелые. Большая часть редкоземельных элементов имеют валентность 3, кроме Eu и Ce. Eu может иметь так же валентность 2, что влияет на его поведение в различных условиях. «Европиевой аномалией» называют отклонение содержания Eu от значений концентрации этого элемента в хондритовом резервуаре. Как правило, отрицательная европиевая аномалия характерна для верхней континентальной коры, положительная – для нижней коры и верхней мантии. Более глобально, редкоземельные элементы делятся на тяжелые (ряд Gd - Eu, Y, La) и легкие (ряд Ce - Eu). Так же, говорят о разделении на «иттриевую» и «цериевую» группы по химическим свойствам, но иттриевая группа идентична по своему составу группе тяжелых РЗЭ, а цериевая – группе легких РЗЭ. При характеристике разделения REE в породе используется соотношение La/Yb (концентрации нормированы на хондрит), так как из-за увеличения несовместимости от La к Lu, соотношение La/Yb будет расти тем больше, чем более обогащен мантийный источник относительно примитивной мантии. В базальтоидах REE распределяются по одному из четырех сценариев. Минимальные величины La/Yb (меньше 1) характерны для базальтов срединно-океанических хребтов (NMORB) и толеитов островных дуг, образующихся из обедненной мантии, имеющей низкие концентрации легких РЗЭ других несовместимых элементов. Плоские спектры распределения REE с La/Yb, близкому к 1, характерны для базальтов океанических плато. Более высокие La/Yb характерны для базальтоидов, формирующихся из обогащенных источников. Спектры с $La/Yb > 1$ обнаруживаются у базальтов островных дуг и зон субдукции. Кроме того, величина La/Yb возрастает с уменьшением степени плавления - максимальными значениями La/Yb обладают щелочные базальты, образующиеся при минимальных степенях плавления из обогащенных мантийных источников. [15]

Для классификации пород по их химическому составу могут применяться дискриминационные диаграммы различных типов. Рассмотрим основные типы диаграмм:

1. Мультиэлементные спайдер-диаграммы, строящиеся по редкоземельным элементам. На оси X располагаются сами элементы, по оси Y их концентрации, нормированные на содержания элементов в хондритовом резервуаре. Процедура нормирования применяется для сглаживания спектра, так как при вынесении на диаграмму самих

концентраций спектр приобретает ступенчатую форму.

2. Диаграммы в ортогональной системе координат. По осям откладываются содержания элементов или их отношения.
3. Треугольные диаграммы. Сумма содержаний трех выбранных элементов (или их отношений) принимается за 100%. От каждой из вершин откладывается процент содержания одного из элементов

Процесс исследования базальтов можно разбить на следующие этапы:

1. Петрографическая оценка породы. Проводится изучение минерального состава изучаемых образцов и оценка степени вторичных изменений.
2. Определение химического состава породы инструментальными методами.
3. Классификация породы по петрогенным элементам. Построение TAS-диаграммы (Total Alkali-Silica diagram), определение класса по кислотности и щелочности.
4. Определение влияния вклада фракционирования, контаминации и частичного плавления по диаграммам Харкера для петрогенных элементов в ортогональных системах координат.
5. Классификация породы по редким элементам. Построение различных дискриминационных диаграмм.

После проведения описанного комплекса действий можно сделать выводы о происхождении породы, или, в случае с сильноизмененными породами или породами, которые в процессе формирования подвергались длительным процессам фракционирования, контаминации или частичного плавления, признать невозможность тектонической интерпретации.

Глава 2. Методы машинного обучения

2.1. Решающие деревья

Решающие (классификационные) деревья позволяют определить класс объекта по набору характерных признаков. Этот метод тесно связан с дискриминационным анализом.

Проиллюстрировать работу этого метода можно следующим образом: представим, что нам требуется разделить горсть монет достоинства один рубль, два рубля, пять и десять рублей по их диаметру. Для этого у нас есть желоб с некоторым числом ответвлений. Монета движется по желобу и встречает первую развилку: «номинал монеты равен одному рублю» и «остальные монеты». Если номинал монеты равен одному рублю, на этой развилке она гарантированно попадет в нужную категорию. В противном случае она продолжит движение по желобу до второй развилки «номинал монеты – два рубля» и «все остальное». При этом монеты меньшего номинала (и, следовательно, диаметра) уже отфильтрованы. Далее, существуют развилка «номинал – пять рублей». Монета, не прошедшая ни по одной из трех категорий, автоматически оказывается в четвертой. Последовательность принятия решений можно описать следующим образом: «если диаметр монеты соответствует стандартному рублю, то это монета номиналом в 1р, иначе, если диаметр соответствует двум рублям – то номинал 2р, иначе, если диаметр соответствует пяти рублям – номинал 5р, иначе – номинал 10р». Кроме того, можно добавить на последнем шаге деление на «номинал – 10 р» и «все остальные» для отбраковки «нестандартных монет».

Теперь дадим математическое определение. Пусть существует N J -мерных точек ($X_n = x_{1n}, x_{2n}, \dots, x_{Jn}, 1 \leq n \leq N$), для которых третий символ - n – «идентификатор» точки (ее номер или название), а второй – значение одного из параметров, ее описывающих. В рамках этой работы параметрами являются концентрации химических элементов, а идентификаторами – названия проб. Эти точки принадлежат к одному из K классов ($Y_n = c_1, c_2, \dots, c_K$) [14]. Классами являются тектонические обстановки происхождения образцов. Деревом решений здесь будет являться алгоритм, который пошагово принимает решение об отнесении данного образца к тому или иному классу на основании значений какого-либо параметра. Количество «шагов» равно количеству параметров. Основная идея в том, чтобы аппроксимировать пространство параметров кусочно-непрерывной функцией, то есть, разбить пространство X на K непересекающихся областей по выбранным параметрам.

Можно выделить следующие причины использования метода классификационных

деревьев: во-первых, это «повторяемость» - то есть, возможность использования единожды построенного дерева; во-вторых, его наглядность – возможность представления полученного разбиения многомерного пространства на двумерном древовидном графе.

В данной работе применяется классификация пород по кислотности-щелочности. Возможное классификационное дерево для отнесения того или иного образца к одному из классов приведено на рис. 2.

На методе случайных деревьев основан выбранный для решения задачи дискриминации базальтов алгоритм машинного обучения – «метод случайных лесов». Для обучения алгоритма требуется создать обучающую базу данных (обучающую выборку), в которой содержатся «признаки» - содержания элементов, а также «классы» - тектонические обстановки, определенные для каждого образца.

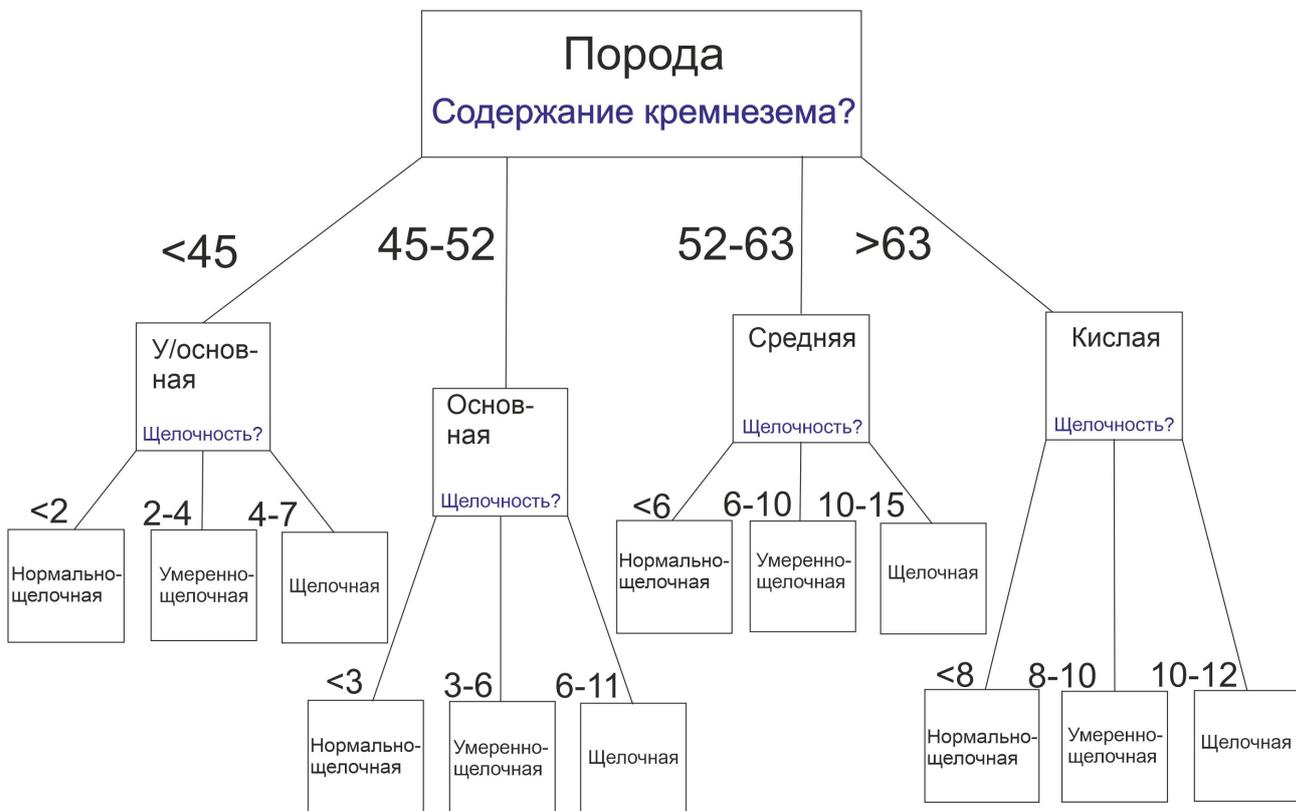


Рис. 2: Решающее дерево, относящее породу к одному из классов по кислотности-щелочности

2.2. Обучающая выборка

Данные для обучающей выборки взяты из базы PetDB, в которой содержатся результаты химических анализов образцов горных пород из различных исследований со всего мира. Изначально данные представляют собой электронную таблицу, содержащую сле-

дующую информацию: уникальный идентификатор образца, данные об исследовании, в рамках которого был отобран образец, возраст образца (если определялся), координаты точки отбора, метод определения химического состава, тип образца, тип породы, предполагаемую тектоническую обстановку происхождения образца, а также концентрации элементов. При этом, выбор элементов остается за исследователем.

В данной работе были использованы содержания главных оксидов (SiO_2 , MgO , CaO , TiO_2 , ...) и некоторых из высокочargedных элементов, крупноионных литофилов и почти всех REE (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Yb, Lu, Ba, Sr, Hf, Nb, Rb, Sr, Ta, Ti, Th, V, Y, Zr). Попытки использования для дискриминации пород только несовместимых и устойчивых элементов оказались менее успешными, чем построение классификатора на базе полного набора элементов из-за более низкой точности классификации.

После формирования электронной таблицы требуется определить, является ли образец базальтом, а также узнать реальную тектоническую обстановку его происхождения. Для решения этой задачи был разработан ряд программ на языке Python 3.0, основанных на традиционных методах дискриминации базальтов. В первую очередь определяется при-

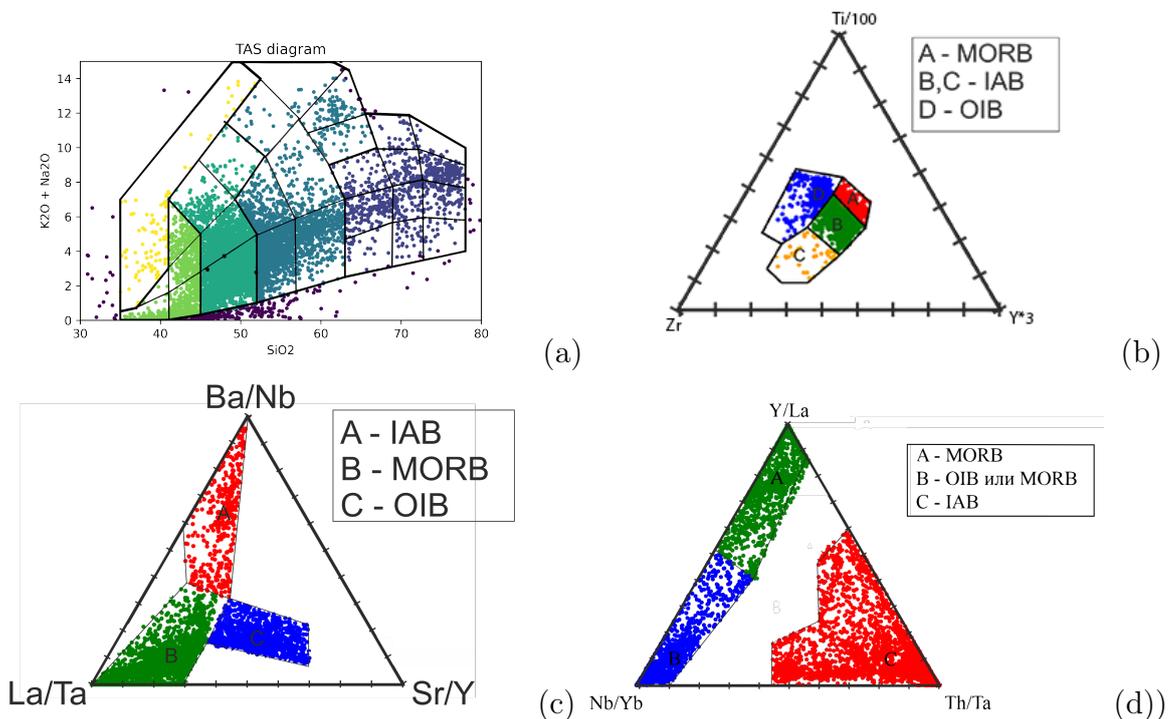


Рис. 3: Визуализация данных, полученных при подготовке обучающей выборки. Цвета использованы для наглядности и соответствуют программному разбиению образцов на соответствующие группы.

надлежность образца к тому или иному классу по кислотности-щелочности. На этом этапе отсеиваются сильно-ультраосновные ($SiO_2 < 41\%$) разности, средние и кислые ($SiO_2 > 57\%$),

а также сильно-щелочные (такие как фойдиты).

Для образцов, подходящих по кислотности, определяется класс щелочности. После этого для каждого образца определяется его принадлежность к одной из трех тектонических обстановок (MORB, OIB или IAB) по пяти наборам элементов, соответствующим пяти диаграммам: $Ti/100 - Zr - Y * 3$, $Th/Yb - Nb/Yb$, $Th - Hf/3 - Ta$ [9], $Ba/Nb - Sr/Y - La/Ta$, $Y/La - Th/Ta - Nb/Yb$ [8]. На рис. 3 приведены некоторые диаграммы по данным, полученным при подготовке обучающей выборки. По TAS-диаграмме (рис. 3, а) было отсеяно около 60% от изначального числа образцов. На остальных диаграммах приведены только те образцы, которые попали в обучающую выборку. Можно заметить, что для каждой обстановки на каждой из диаграмм содержится достаточное для обучения алгоритма количество точек.

После определения обстановок по каждой из пяти диаграмм, формируется столбец «реальных» тектонических обстановок происхождения образцов по большему количеству одинаковых результатов. Если образец не попал в одно из полей более, чем на двух диаграммах, а также если для вынесения образца более чем на две диаграммы отсутствуют данные, он удаляется из выборки. В конце из выборки удаляются образцы, для которых отсутствуют данные по содержаниям некоторых элементов для повышения точности определения класса образцов, а также уравнивается количество образцов, относящихся к разным классам для избежания переобучения по каким-либо обстановкам. Далее выборка делится в соотношении 70/30, 70% образцов используются для обучения алгоритма, остальные резервируются для проверки точности работы алгоритма.

2.3. Случайные леса

Случайный лес (Random Forest) – алгоритм машинного обучения, заключающийся в использовании ансамбля классификационных деревьев. Алгоритм основан на методе случайных подпространств. Впервые этот алгоритм был описан в статье [1]

Алгоритм обучения классификатора:

1. Пусть обучающая выборка состоит из N образцов, размерность пространства признаков равна J , а также задан параметр m – неполное количество обучающих признаков, использующихся в каждом дереве.
2. Формируется случайная повторная подвыборка размером N . При этом, некоторые образцы попадут в нее два или более раза.

3. Построим решающее дерево, классифицирующее образцы данной подвыборки, причем на каждом из узлов будет выбираться классификационный признак – один из m случайно выбранных.
4. Дерево строится до полного исчерпания подвыборки.
5. Далее производится новый отбор случайных признаков и построение деревьев уже по новым признакам
6. Классификация исследуемого объекта проводится путем голосования: каждое дерево ансамбля относит объект к одному из классов, а побеждает класс, за который «проголосовало» большинство деревьев.

Построение деревьев, выбор классов и голосующих деревьев происходит автоматически.

После обучения алгоритма проводится проверка точности определения класса. Для этого зарезервированные образцы, для которых определена их принадлежность к одному из классов, обрабатываются алгоритмом машинного обучения, затем результаты классификации сопоставляются с полученными традиционными методами.

Глава 3. Геологическая характеристика исследуемого объекта

Верхоянский складчато-надвиговой комплекс простирается вдоль восточной окраины Сибирской платформы, простираясь от моря Лаптевых до Охотского моря. Внешняя зона Верхоянского пояса на Оленекский, Западно-Верхоянский и Южно-Верхоянский сектора. Южно-Верхоянский сектор состоит из Майя-Киллах, Сетте-Дабан (рис. 4) и Южно-Верхоянской зон. Осадочный разрез на территории представлен породами рифея-карбона. По составу это песчаники, алевролиты, известняки и доломиты. Объектом исследования являются мафические интрузии Сетте-Дабанского события, прорывающие породы мезо- и неопротеорзоя [11]

Осадочные породы Сетте-Дабанского поднятия пронизываются системой интрузивов, образовавшихся во время разных геологических событий. Так, например, возраст интрузии в районе р. Сахара по U-Pb датированию был определен как 1005.4 млн лет, в то время как для дайки на востоке р. Аллахьюн эта величина составила 974.7 млн лет. На западе от Аллахьюна и р. Юдома возраст интрузивов был определен на уровне 950 млн лет Sm-Nd методом, что в пределах погрешности совпадает с событием 974.7 млн лет назад. [13]

Возраст интрузивов антиклинали Чагда и антиклинали Юканда коррелирует с возрастом Сахарских внедрений. Таким образом, можно выделить две группы интрузий: более старая в северо-восточной части Сетте-Дабанского поднятия и более молодую на юго-западе.[7]

3.1. Петрографическая характеристика

Интрузии сложены долеритами с размером кристаллов от 0.2 до 5 мм. Среди породобразующих минералов преобладают (рис. 5) плагиоклаз (анортозит) и клинопироксен (эгирин-авгит). Среди второстепенных минералов встречаются гиперстен, щелочной полевой шпат, биотит и оливин. Долериты также содержат рудные минералы, представленные магнетитом, ильменитом и титаномagnetитом. Структуры пород – долеритовые и офитовые. Породы мало изменены, в некоторых образцах заметно незначительное замещение клинопироксена серпентином и хлоритом. Интрузии Сетте-Дабанского поднятия представлены долеритовыми силлами и дайками. Длина силлов варьирует в пределах от сотен метров до нескольких километров, их толщина от первых метров до сотен метров.

Силлы внедряются параллельно залеганию осадочных пород. По краям интрузивов обнаруживается зона холодного контакта мощностью от нескольких миллиметров до 10 см, однако в зонах, где интрузивы расположены в непосредственной близости друг от друга ее мощность может достигать 20 м.

В самых крупных интрузивах наблюдается изменение размеров кристаллов в породе от мелких до крупных по мере удаления от центра интрузии.

3.2. Геохимическая характеристика

3.2.1. Породообразующие элементы

Породы показывают средние вариации в содержании кремнезема (42.03-60.07), однако граничные концентрации принимают единичные точки, и большая часть точек по кислотности на TAS-диаграмме (рис. 2) попадает в поле основных пород. По сумме $K_2O + Na_2O$ все точки лежат в интервале от 2.13 до 5.0, большая часть значений лежит в области пород нормальной щелочности. Единичные значения попадают в область умеренной щелочности. На диаграмме $MgO - FeO_{tot} - Na_2O + K_2O$ (рис. 7) все точки попадают в поле толеитов. Таким образом, исследуемые породы можно отнести к группе толеитовых базальтов. Магматические породы Сетте-Дабанского поднятия характеризуются умеренным содержанием TiO_2 от 1.17 до 6.17. Вариации содержания MgO в пределах от 1.34 до 9.36 указывают на происходившую во время образования породы фракционную кристаллизацию, что подтверждается трендами на диаграмме Харкера (рис. 8). Крайними значениями содержаний MgO обладают единичные образцы, большая их часть лежит в области 4-7%, что говорит об относительно слабом вкладе фракционирования в состав пород.

3.2.2. Редкие и рассеянные элементы

На мультиэлементных спайдер-диаграммах (рис. 9, (а)) образцы долеритов Сетте-Дабанского поднятия показывают обогащение легкими редкоземельными элементами относительно тяжелых и незначительно обогащение Eu. В целом, спектры распределения REE схожи с таковыми для OIB и IAB, однако отсутствие отрицательной аномалии по Eu и положительной по Gd указывает скорее на происхождение пород в условиях океанических островов.

При построении других дискриминационных диаграмм (рис. 9) для базальтов Сетте-Дабанского поднятия, точки, соответствующие образцам, ведут себя похожим образом. В

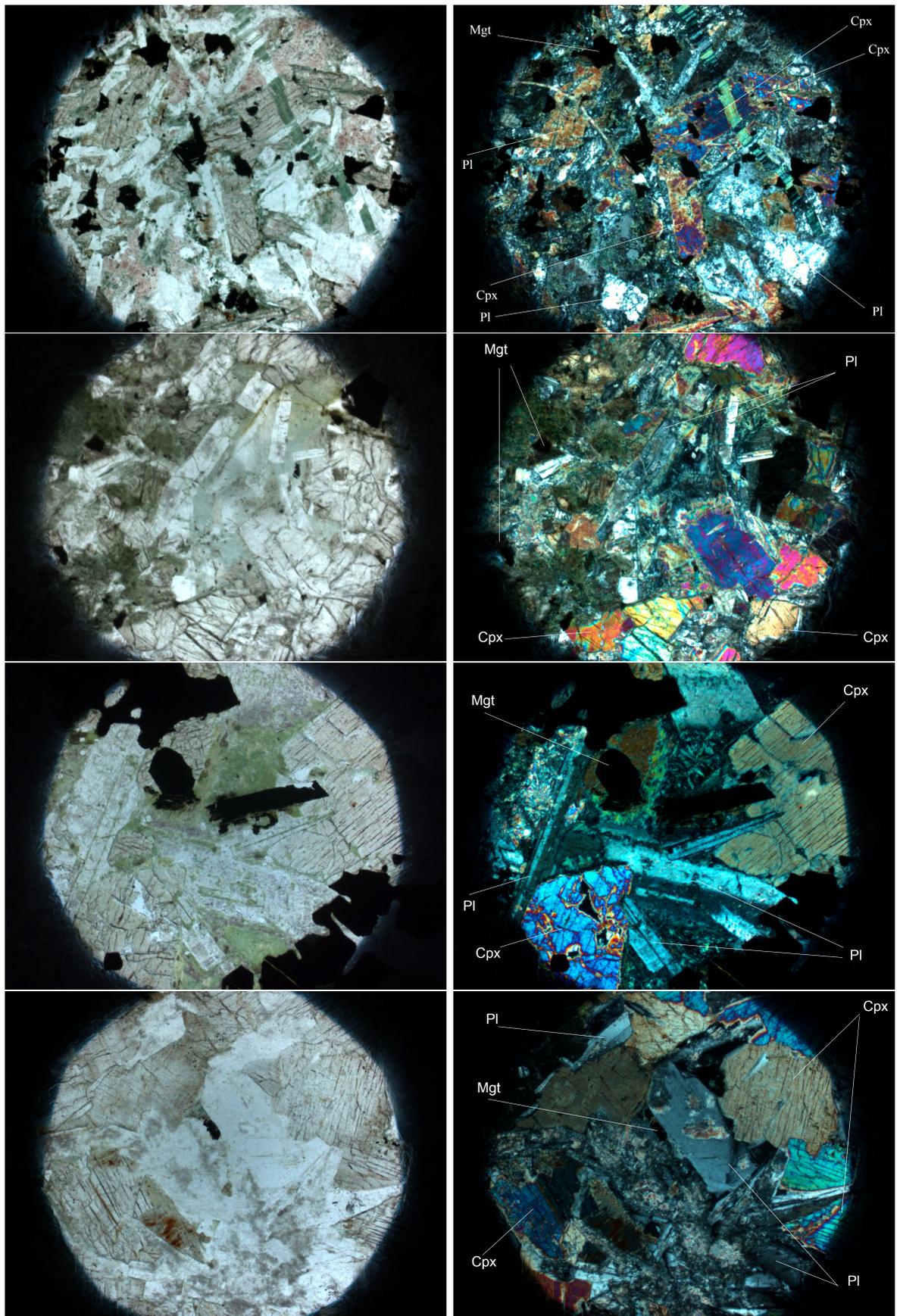


Рис. 5: Фотографии шлифов долеритов Сетте-Дабанского поднятия, слева - в проходящем свете, справа - в скрещенных николях

двух случаях из трех (рис.9 b,c), большая часть образцов попадает в поле ОИВ. При этом, наибольшая однородность результата обнаруживается на диаграмме Th-Hf/3-Ta (рис. 9, b) с 21 из 38 образцов, попавших в область базальтов океанических островов.

На диаграмме Ba/Nb-Sr/Y-La/Ta (рис. 9, c) также прослеживается тенденция к концентрации фигуративных точек в области ОИВ, но 7 точек попали в область MORB, 3 точки – в область IAB, 16 точек не попали в поля, соответствующие той или иной обстановке, однако, 13 из них расположены облаком вокруг область ОИВ. На диаграмме Y/La-Th/Ta-Nb/Yb (рис. 9, d) образуется отличная картина. Здесь большая часть точек легла в область IAB, лишь 7 образцов из 38 попали в область ОИВ. Примерно половина образцов легла в область, не соответствующую ни одной из тектонических обстановок.

Исходя из вышесказанного, базальты Сетте-Дабанского поднятия гипотетически могут быть отнесены либо к базальтам островных дуг, либо к базальтам океанических островов. При этом, спектры распределения не дают ясного результата, две дискриминационные диаграммы указывают на ОИВ и одна – на IAB. Таким образом, можно предположить, что данные породы скорее относятся к базальтам океанических островов.

Далее для решения задачи дискриминации базальтов Сетте-Дабанского поднятия, к образцам будут применены методы машинного обучения.

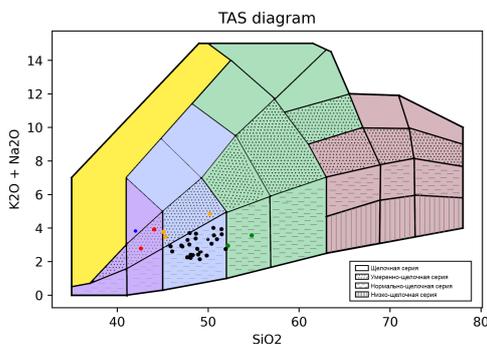


Рис. 6: TAS-диаграмма для образцов интрузий Сетте-Дабанского поднятия. Цвета полей соответствуют следующим типам пород: желтый - фойдиты, фиолетовые - ультраосновные, синий - основные, зеленый - средние, красный - кислые.

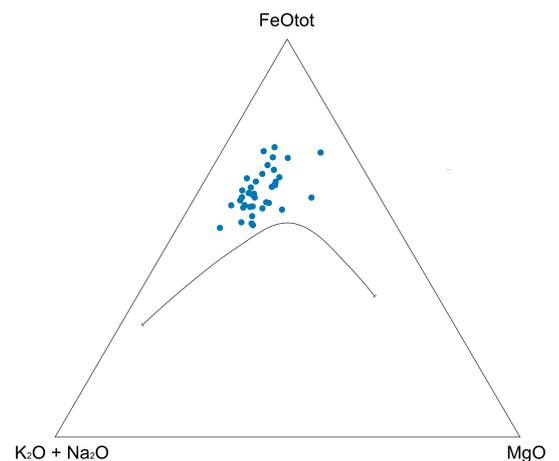


Рис. 7: Диаграмма $MgO - FeO_{tot} - Na_2O + K_2O$ для исследуемых образцов

Глава 4. Результаты и выводы

В рамках данной работы были выполнены следующие задачи:

- Сформирована обучающая выборка объемом в 2091 образец и на ее основе разработан алгоритм машинного обучения. Точность разработанного алгоритма машинного обучения составила 83%.
- Изучены образцы базальтов Сетте-Дабанского поднятия. По результатам химических анализов проведена их дискриминация с тектонической точки зрения.

По результатам дискриминации базальтов Сетте-Дабанского поднятия традиционными методами, породы относятся к типу ОИВ. Однако, результат достаточно неоднороден – на всех диаграммах около половины точек ложились в область базальтов океанических островов. Самый однородный результат показала диаграмма Th-Nf-Ta с 21 из 38 точек в указанной области. Спектры, полученные на мультиэлементной диаграмме, также ближе к спектру ОИВ, однако наблюдается сходство со спектром базальтов островных дуг. Результаты применения алгоритма машинного обучения к базальтам Сетте-Дабанского поднятия приведены в таблице 1. 28 образцов были отнесены к классу базальтов океанических островов, 5 – к классу островных дуг, 5 попали в класс срединно-океанических

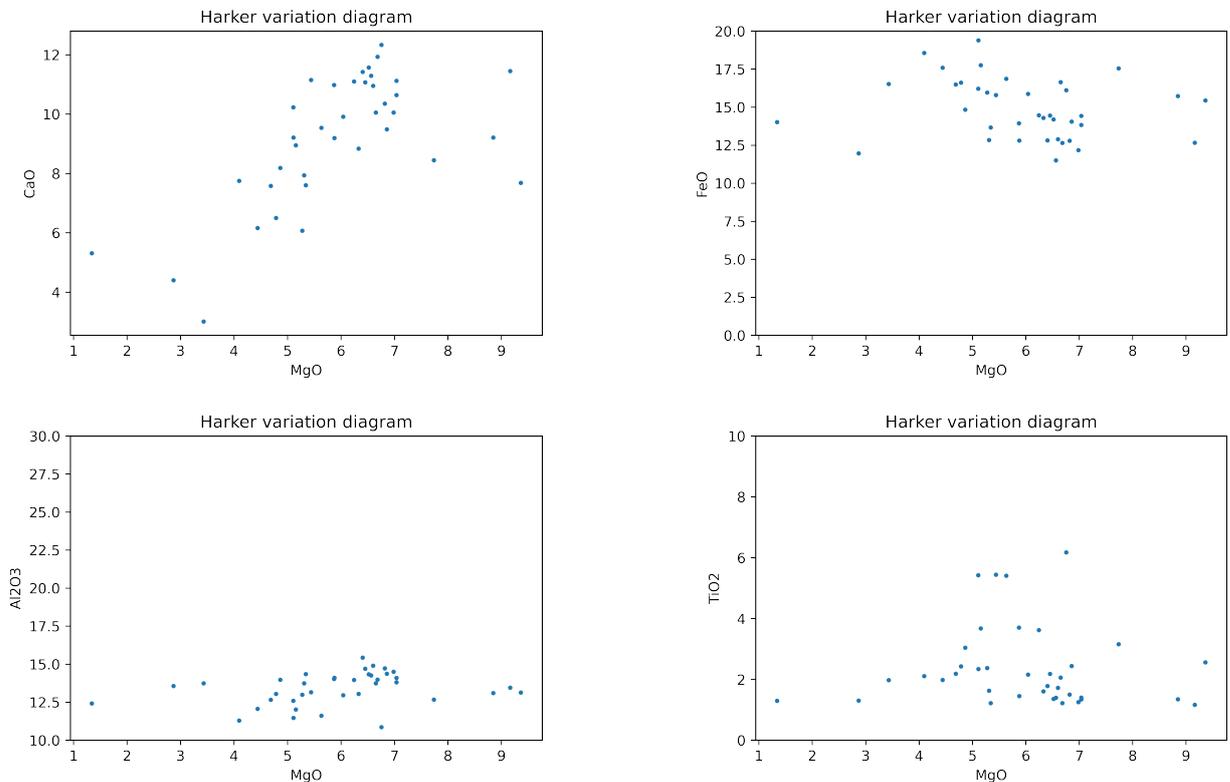


Рис. 8: Диаграммы вариаций Харкера

хребтов. Результат дискриминации долеритов Сетте-Дабанского поднятия методами машинного обучения близок к полученным традиционными методами. При этом, наблюдается большая однородность результатов – при классификации традиционными методами большая часть образцов была классифицирована как базальты океанических островов, однако каждый раз около половины точек на дискриминационных диаграммах оказывались либо в областях, соответствующих другим тектоническим обстановкам, либо вовсе оказывались вне этих полей. Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- Базальты интрузий Сетте-Дабанского поднятия были сформированы из источника, характерного для океанических островов. Это указывает на глубинный источник вещества, связанный с деятельностью мантийных плюмов.
- Методы машинного обучения применимы к задаче дискриминации геохимической дискриминации базальтов. При этом, результат имеет большую однородность, чем полученный традиционными методами.

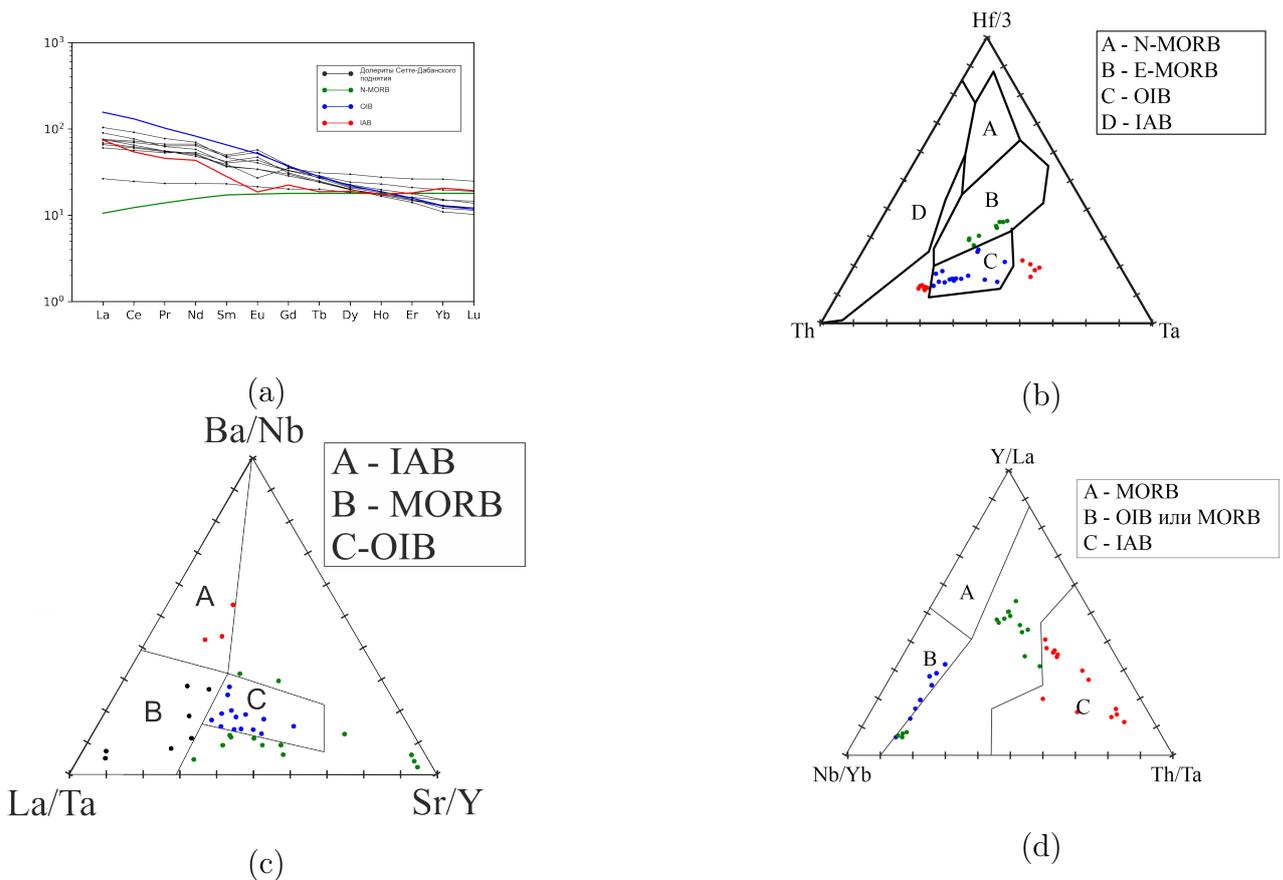


Рис. 9: (а) - Мультиэлементная диаграмма по редкоземельным элементам. Концентрации нормированы на хондритовый резервуар. Содержания REE в хондрите, MORB и OIB взяты из [5], в IAB - [2]; (b), (c), (d) - треугольные дискриминационные диаграммы по [9] и [8]

SAMPLE ID	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	RFC
SM-14-04	48.01	3.039	13.97	4.864	8.184	3.007	Ocean Island Basalts
SM-14-08	57.42	1.305	13.56	2.868	4.399	3.914	Mid-Ocean Ridge Basalts
SM-18-05	45.91	3.619	13.96	6.244	11.1	2.334	Ocean Island Basalts
SM-18-06	42.64	6.173	10.86	6.756	12.33	2.38	Ocean Island Basalts
SM-18-08	45.16	3.704	14.03	5.87	10.98	2.663	Ocean Island Basalts
SM-18-10	42.03	5.443	13.16	5.441	11.15	2.895	Ocean Island Basalts
SM-18-11	44.12	5.423	12.59	5.107	10.23	3.109	Ocean Island Basalts
SM-18-20	45.08	2.559	13.13	9.363	7.683	2.346	Ocean Island Basalts
SM-18-23	47.2	1.783	15.43	6.404	11.42	2.269	Ocean Island Basalts
SM-18-24	45.34	3.158	12.67	7.735	8.446	2.124	Ocean Island Basalts
AS-18-17	46.08	2.179	14.7	6.453	11.07	1.76	Ocean Island Basalts
AS-18-21	50.19	1.22	14.35	5.341	7.603	3.308	Island Arc Basalts
AS-18-22	48.66	1.502	14.72	6.819	10.35	2.223	Island Arc Basalts
SM17-08	54.83	1.975	13.74	3.432	3.011	3.44	Ocean Island Basalts
SM17-09	60.07	1.296	12.42	1.34	5.313	3.331	Ocean Island Basalts
SM17-10	50.41	1.607	13.05	6.33	8.836	2.239	Ocean Island Basalts
SM17-11	51.01	2.186	12.66	4.687	7.578	2.369	Ocean Island Basalts
SM17-16	48.14	1.342	14.1	7.038	11.12	1.778	Island Arc Basalts
AS17-01	51.51	2.372	12.99	5.277	6.071	2.35	Ocean Island Basalts
AS17-02	50.63	2.429	13.05	4.785	6.498	2.361	Ocean Island Basalts
AS17-03	49.12	1.355	14.34	6.52	11.57	1.967	Mid-Ocean Ridge Basalts
AS17-04	48.12	1.167	13.46	9.163	11.45	1.545	Island Arc Basalts
AS17-05	47.76	2.06	13.74	6.651	10.05	1.965	Mid-Ocean Ridge Basalts
AS17-06	48.85	2.156	12.96	6.04	9.908	2.24	Ocean Island Basalts
AS17-07	49.9	1.4	13.81	7.037	10.64	1.921	Ocean Island Basalts
AS17-08	48.31	1.348	13.1	8.847	9.212	1.722	Ocean Island Basalts
AS17-10	51.99	2.106	11.29	4.097	7.75	2.408	Mid-Ocean Ridge Basalts
AS17-12	51.52	1.627	13.74	5.31	7.937	2.364	Ocean Island Basalts
AS17-13	52.22	1.983	12.06	4.44	6.159	2.873	Mid-Ocean Ridge Basalts
AS17-14	50.69	1.454	14.11	5.876	9.19	2.653	Ocean Island Basalts
AS17-15	49.98	1.399	14.26	6.564	11.29	2.505	Ocean Island Basalts
AS17-16	49.1	1.218	13.99	6.683	11.93	2.109	Ocean Island Basalts
AS17-16*	48.71	1.252	14.5	6.984	10.05	2.529	Island Arc Basalts
AS17-18	47.93	3.674	12.02	5.156	8.949	2.437	Ocean Island Basalts
AS17-19	49.24	1.721	14.9	6.6	10.95	2.163	Ocean Island Basalts
AS17-21	47.76	2.437	14.37	6.858	9.486	1.945	Ocean Island Basalts
AS17-22	47.08	5.409	11.61	5.634	9.539	2.025	Ocean Island Basalts
AS17-23	48.96	2.342	11.47	5.11	9.209	1.908	Ocean Island Basalts

Таблица 1: Фрагмент таблицы результатов работы алгоритма машинного обучения.

Список литературы

1. *Breiman L.* Random Forests // *Machine Learning* 45. — 2001. — Т. 45. — С. 5–32.
2. Chemical characteristics of island-arc basalts: Implications for mantle sources / M. R. Perfit [и др.] // *Chemical Geology*. — 1980. — Т. 30, вып. 3. — С. 227–256. — ISSN 00092541. — DOI: 10.1016/0009-2541(80)90107-2.
3. Dual geochemical characteristics for the basic intrusions in the Yangtze Block, South China: New evidence for the breakup of Rodinia / S. Shu [и др.] // *Minerals*. — 2018. — Июнь. — Т. 8, вып. 6. — С. 228. — ISSN 2075163X. — DOI: 10.3390/min8060228.
4. Formation and Distribution of Volcanic Rock / C. Zou [и др.]. — 2013. — DOI: 10.1016/b978-0-12-397163-0.00002-6.
5. *From S., Norry A. D.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. — 1989. — С. 313–345. — URL: <http://sp.lyellcollection.org/Downloadedfrom>.
6. Late Cenozoic intraplate volcanism in Changbai volcanic field, on the border of China and North Korea: Insights into deep subduction of the Pacific slab and intraplate volcanism / M. Zhang [и др.] // *Journal of the Geological Society*. — 2014. — ЯНВ. — Т. 172, вып. 5. — С. 648–663. — ISSN 00167649. — DOI: 10.1144/jgs2014-080.
7. Meso-neoproterozoic mafic sills along the south-eastern margin of the siberian craton, se yakutia: Petrogenesis, tectonic and geochemical features / A. D. Savelev [и др.] // *Minerals*. — 2020. — СЕНТ. — Т. 10, вып. 9. — С. 1–20. — ISSN 2075163X. — DOI: 10.3390/min10090805.
8. New discrimination diagrams for basalts based on big data research / Q. Zhang [и др.] // *Big Earth Data*. — 2019. — ЯНВ. — Т. 3, вып. 1. — С. 45–55. — ISSN 25745417. — DOI: 10.1080/20964471.2019.1576262.
9. *Pearce J.* A User's Guide to Basalt Discrimination Diagrams // *Geol. Assoc. Canada Short Course Notes*. — 1996. — Дек. — Т. 12. — С. 79–113.
10. *Perfit M. R.* Mid-ocean ridge geochemistry and petrology. — 01.2019. — DOI: 10.1016/B978-0-12-813081-0.00096-3.
11. Russian Federation b Geological Survey of Canada, 601 Booth Street, Ottawa Ont., Canada K1A 0E8 c All Russian Geological Research Institute (VSEGEI) / A. K. Khudoley [и др.]. — 2001. — С. 129–163. — URL: www.elsevier.com/locate/precamres.

12. *Suetsugu D., Steinberger B., Kogiso T.* Mantle Plumes and Hotspots. — 01.2013. — DOI: 10.1016/b978-0-12-409548-9.02868-2.
13. U-Pb geochronology of Riphean sandstone and gabbro from southeast Siberia and its bearing on the Laurentia-Siberia connection / R. H. Rainbird [и др.]. — 1998. — С. 409—420.
14. *Vermeesch P.* Tectonic discrimination of basalts with classification trees // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* — 2006. — Апр. — Т. 70, вып. 7. — С. 1839—1848. — ISSN 00167037. — DOI: 10.1016/j.gca.2005.12.016.
15. *Склярёв Е. В.* Интерпретация геохимических данных. — МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ Томский государственный университет, 2001. — ISBN 9785946214674.
16. *Цейдлер Н. А., Борисова Т. П., Камалетдинов В. А.* Геологическая карта, лист Р-53, масштаб 1:1000000. — 1999.