



УДК 550.31, 004.89

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПО ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ РЕКОНСТРУКЦИИ ГРАНИЦЫ МОХО В БАРЕНЦЕВОМОРСКОМ РЕГИОНЕ

И. В. Лыгин¹, Д. А. Арутюнян¹, Л. С. Чепиго¹, К. М. Кузнецов¹, А. Д. Шклярук¹¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

В статье рассматривается методика реконструкции глубинных границ по аномалиям потенциальных полей с опорой на сейсморазведочные данные на основе машинного обучения. Отличительной особенностью методики является верификация полученных прогнозных границ по гравитационному полю. Методика апробирована на примере построения глубинной структурной модели Баренцева моря. В статье приводится пример реконструкции границы Мохорвичича (Мохо).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГРАВИРАЗВЕДКА, МАГНИТОРАЗВЕДКА, СЕЙСМОРАЗВЕДКА, МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ, НЕЙРОННЫЕ СЕТИ, ГРАНИЦА МОХО, ПОДОШВА ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА, БАРЕНЦЕВО МОРЕ

DOI 10.5425/2304-7380_2022_38_3

<https://elibrary.ru/> <https://elibrary.ru/oeazll>

1. ВВЕДЕНИЕ

Для Баренцевоморского региона ранее построен ряд моделей морфологии границы Мохо (подшвы земной коры) [1-5]. В основу большинства моделей положены относительно редкие профильные сейсморазведочные или сейсмологические данные. В то же время информация о гравитационном и магнитном (потенциальных) полях Баренцева моря на региональном уровне более детальная [6, 7]. Поскольку аномалии потенциальных полей содержат эффекты, обусловленные изменением альтитуды структурных горизонтов, в благоприятных физико-геологических условиях задача по выявлению (уточнению) их морфологии часто решается в ходе совместного анализа (комплексирования) данных потенциальных полей и сейсморазведки. Общая структура горизонта получается из интерпретации профильных сейсмических данных, а пространство вне сейсмических профилей заполняется с учетом характеристик аномальных потенциальных полей [8, 9, 10]. Устойчивость решения задачи может повышаться привлечением дополнительных геолого-геофизических данных. Принципиально существует два подхода использования данных потенциальных полей для заполнения пространства вне сейсмических профилей.

Электронная почта авторов для переписки:
Лыгин Иван Владимирович, e-mail: lygin@geophys.geol.msu.ru
Арутюнян Давид Артурович, e-mail: david-20.97@mail.ru
Чепиго Лев Станиславович, e-mail: chepigos@yandex.ru
Кузнецов Кирилл Михайлович, e-mail: kuznetsovkm@my.msu.ru
Шклярук Алексей Дмитриевич, e-mail: alexsh9898@yandex.ru



Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:

ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

Первый – классический, связанный с прямым моделированием и решением обратной задачи гравиразведки [11]. Подход успешно применяется для локализации контрастных по плотности или намагниченности объектов в земной коре [10, 12, 14].

Второй подход активно развивается [14, 15] и основан на методах машинного обучения, при применении которых ставится задача поиска зависимости между входной информацией (потенциальными полями, геофизическими данными, имеющейся иной априорной геолого-геофизической информацией) и искомой поверхностью. Необходимым и обязательным требованием к применению подхода является наличие эталонных участков, на которых представлены как входные, так и выходные данные [16].

Нами разработана и реализована методика, объединившая два подхода, при применении которой прогнозная поверхность, полученная с помощью методов машинного обучения, уточняется по гравитационному (или магнитному) полю. При реализации данной процедуры рассчитывается гравитационный (или магнитный) эффект от прогнозного горизонта. Затем для полученного эффекта решается обратная задача по подбору формы контактной границы. Если в прогнозном горизонте присутствуют морфологические элементы, не создающие значительного гравитационного (или магнитного) эффекта, то при решении обратной задачи они естественным путем не восстанавливаются. В результате в окончательном варианте прогнозной границы отсутствуют эффекты, которые не могут быть подтверждены по гравиметрическим или магнитным данным.

Методика апробирована на примере построения глубинной структурной модели Баренцевоморского региона. В статье продемонстрирован пример реконструкции подошвы земной коры (границы Мохо).

2. МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СТРУКТУРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Построение структурной поверхности (или горизонта) по геолого-геофизическим данным сводится к решению пятиэтапной задачи.

Первый этап – подготовительный, на котором формируется три набора исходных данных: 1) геолого-геофизические материалы на участке исследования; 2) известная морфология структурного горизонта на эталонных участках, желательно, расположенных в пределах участка исследования; 3) отложенная выборка о морфологии структурного горизонта вне эталонных участков для оценки точности выполненного прогноза (верификации).

Исходные геолого-геофизические материалы – это, в первую очередь, аномальные потенциальные поля (аномалии поля силы тяжести в редукции Буге или аномалии магнитного поля) и их трансформанты, модели глубинного залегания прогнозных и иных структурных поверхностей, полученные из других источников. Исходные материалы могут включать доступные модели других полей (например, карты теплового потока), распределения физических свойств, типов земной коры или обстановок осадконакопления, разные виды геологических карт и т.п. Важно, чтобы в набор данных были включены разнообразные трансформации потенциальных полей, которые необходимо вычислить с применением линейных и нелинейных типов фильтрации. Чем больше и чем разнообразнее привлеченные трансформации и дополнительная геолого-геофизическая информация, тем выше вероятность получения более точных решений. Часто на площадь исследования можно найти более ранние модели глубинного залегания прогнозных и иных структурных поверхностей. Их учет при обучении нейронной сети также важен. На основе исходных материалов формируются набор признаков, пригодный для дальнейшего анализа.

Второй этап предназначен для поиска регрессионных связей на эталонных участках между набором признаков геолого-геофизической информации и искомой поверхностью. Регрессионные связи могут быть описаны различными математическими законами, как линейными, так и нелинейными, также они могут быть множественными [17]. В настоящее время задача установления регрессионных связей всё чаще решается с использованием методов машинного обучения, основанных на создании нейронных сетей. В понятие создание нейронной сети мы включаем процедуры по построению или выбору архитектуры и обучения.

Создание нейронной сети – это ответственная процедура, поскольку от характера установленных связей будет зависеть точность решения, в нашем случае точность построения искомой структурной поверхности. При создании нейронной сети необходимо учитывать ряд факторов. Во-

первых, необходимо выбрать наиболее информативные признаки исходной информации. Хотя при обучении нейронной сети алгоритмически заложен выбор наиболее информативных признаков из состава исходной информации, но наличие в составе взаимоисключающих признаков может приводить к «плохим» решениям. Во-вторых, необходимо выбрать алгоритм регрессии. В-третьих, необходимо выбрать её конфигурацию (сеть прямого распространения, сеть радиально-базисных функций, сеть обратного распространения, сверточная сеть и др.) и параметры (число слоев и нейронов). В используемом программном обеспечении¹ не решены вопросы с автоматизацией оптимального выбора указанных параметров, что обуславливает необходимость интерактивного участия эксперта.

В работе после ряда тестовых расчетов выбран и применен алгоритм регрессии «градиентный бустинг». Градиентный бустинг – алгоритм машинного обучения, предназначенный для решения задач классификации и регрессии, который строится на основе ансамбля слабых предсказывающих моделей. В нашем случае, в качестве предсказывающих моделей, на основе которых строился градиентный бустинг, использовались деревья решений. Глубина каждого дерева выбрана равной 5. Каждое дерево может дать хорошие прогнозы только для части данных и таким образом для итеративного улучшения качества добавляется все большее количество деревьев. [18].

Третий этап – распространение установленных регрессионных связей на исследуемую площадь с вычислением морфологии прогнозной границы.

На четвертом этапе выполняется уточнение морфологии прогнозной поверхности по ее гравитационному (или магнитному) эффекту.

Так как исходные геолого-геофизические материалы содержат эффекты от большого количества элементов геологического разреза, то регрессионные связи могут передавать эффекты, не связанные с реальной формой структурной поверхности. В результате последняя может содержать ложные и искаженные локальные формы. С целью их минимизации выполняется расчет гравитационного (или магнитного) эффекта от прогнозного горизонта. Для полученного эффекта решается обратная задача по подбору формы контактной границы. При подборе формы контактной границы необходимо учитывать характер распределения избыточной плотности (или намагниченности), вводить ограничения на возможные изменения глубины искомой границы. Ограничения по глубине искомой границы устанавливаются, исходя из полученного решения на третьем этапе и/или из априорных, эталонных данных. Избыточная плотность (или намагниченность) на искомой границе может быть постоянной или переменной величиной. Ограничения на значения избыточной плотности (или намагниченности) регулируются, исходя из необходимости соответствия форм границы на эталонах и в прогнозной модели. То есть в прогнозной границе не должны появиться локальные формы, размеры которых не представлены в эталонах. В результате, в окончательном варианте прогнозной границы отсутствуют эффекты, которые не могут быть подтверждены по гравиметрическим или магнитным данным. Дополнительным результатом решения обратной задачи являются значения избыточной плотности (намагниченности), которое может быть использовано при составлении глубинной модели. Фактически процедуры четвертого этапа можно отнести к нелинейной низкочастотной фильтрации. Процедуры четвертого этапа реализованы с помощью ПО «GravMgInv3D» [19].

Алгоритмически методами машинного обучения сводится к минимуму расхождение прогнозных и эталонных данных. В процессе применения процедур четвертого этапа, если не предусматривать специальных ограничений, корректировка морфологии восстанавливаемого горизонта происходит по всей площади, в том числе на эталонных участках. К преодолению данного противоречия можно подойти с двух сторон. С одной стороны, возможно наложить запрет на изменения прогнозной границы в пределах эталонных участков. В этом случае не произойдет полной верификации прогнозной границы потенциальным полем. Более того, возможны ситуации, при которых обратная задача не решается в виду наложенных ограничений и появляется возможность для уточнения значений самого эталона, который исходно может содержать ошибки. С другой стороны, без применения ограничений на решение обратной задачи эталонные участки перестают быть эталонами и могут быть использованы для оценки точности построения наряду с отложенной выборкой.

Пятый этап предназначен для оценки точности полученного решения (верификации). На этапе оценивается невязка результирующей поверхности с данными из отложенной выборки. Если среднее расхождение или среднеквадратическое расхождение высокие, то происходит возврат на этап

¹ Все вычисления на втором и третьем этапах реализованы в среде программирования Anaconda Python.

построения нейронной сети с целью переопределения ее оптимальных параметров и уточнения набора признаков исходных данных.

Сопоставление результатов происходит с различными по детальности изучения материалами. Степень доверия к «независимым» данным разная, так как наивысший коэффициент присваивается результатам полевых работ (сейсморазведки), наименьший коэффициент доверия региональным моделям, построенным по результатам спутниковых миссий.

3. МОДЕЛИ МОРФОЛОГИИ ГРАНИЦЫ МОХО

Информация о морфологии подошвы земной коры в Баренцевоморском регионе представлена в ряде региональных и локальных моделей. В российской акватории Баренцева моря модели построены с использованием результатов небольшого количества профилей глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), сейсмической томографии. В некоторых из них межпрофильное пространство заполнено с привлечением информации о гравитационном поле и иной геолого-геофизической информации (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1. Параметры моделей границы Мохо

№	Модель	Детальность модели	Диапазон изменения глубин, км	Исходные данные	Источник
1	CRUST 1.0	1x1 градус	29-50	Компиляция	[1]
2	EUNAsies	2x2 градуса	29-40	Сейсмическая	[2]
3	GEMMA	1x1 градус	20-30	Гравиметрическая	[3]
4	«Арктическая модель»	10x10 км	25-50	Компиляция	[4]
5	Barents3D	50x50 км	26-52	Сейсмическая	[5]
6	Модель DAV23	1x1 км	33-40	Сейсмо-гравиметрическая	

В основу глобальной модели CRUST1.0 (рис. 1А) положена типизация земной коры по сейсмометрической и дополнительной геолого-геофизической информации [1]. Модель имеет дискретность 1x1 градус.

Модель EUNAsies – сейсмическая модель, построена с опорой на данные глубинной сейсморазведки [2] (рис. 1Б). В российской части Баренцевоморского региона использованы результаты исследований на профилях ГСЗ 1-АР (1440 км); 2-АР (935 км); 3-АР (2400 км), 4-АР (1370 км) [20, 21, 22].

Модель GEMMA (рис. 1В) получена в процессе реализации специализированного проекта «GOCE Exploitation for Moho Modeling and Applications», в котором на основе гравиметрических данных спутниковой миссии GOCE построена глобальная модель границы Мохо [3]. Глубины границы Мохо по модели GEMMA примерно на 5 – 10 км меньше, чем по остальным моделям (табл. 1). На ниже приведенных разрезах (рис. 2, 4, 5, 6) можно видеть, что модель существенно расходится с альтернативными моделями и данными ГСЗ. В Баренцевоморском регионе в диапазоне глубин 20 – 30 км залегает граница Конрада.

«Арктическая модель» границы Мохо из Международного атласа геологических карт Циркумполярной Арктики [4] (рис. 1Г) в рассматриваемом регионе базируется на компиляции морских и сухопутных сейсмических данных, подготовленных ФГБУ «ВСЕГЕИ» и ФГБУ «ВНИИОкеангеология», материалов авторов [2, 23]. В регионах, где сейсмическая информация отсутствовала, граница получена через установление корреляционной связи на сейсмических профилях о ее глубине и аномалиями поля силы тяжести в редукции Буге [24].

Модель Barents3D – создана на основе компиляции моделей BARENTS50 и BarMod. В основу положены данные глубинной сейсморазведки и сейсмологические наблюдения поверхностных волн дальних землетрясений.

Из сопоставления моделей границы Мохо между собой (табл. 1, рис. 1) и данными глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) на региональных профилях 1-АР и 2-АР [20] (рис. 2) следует ряд выводов.

Значения глубин границы Мохо по модели GEMMA составляют 22-26 км. Согласно данным ГСЗ указанный диапазон глубин соответствует границе Конрада (рис. 2).

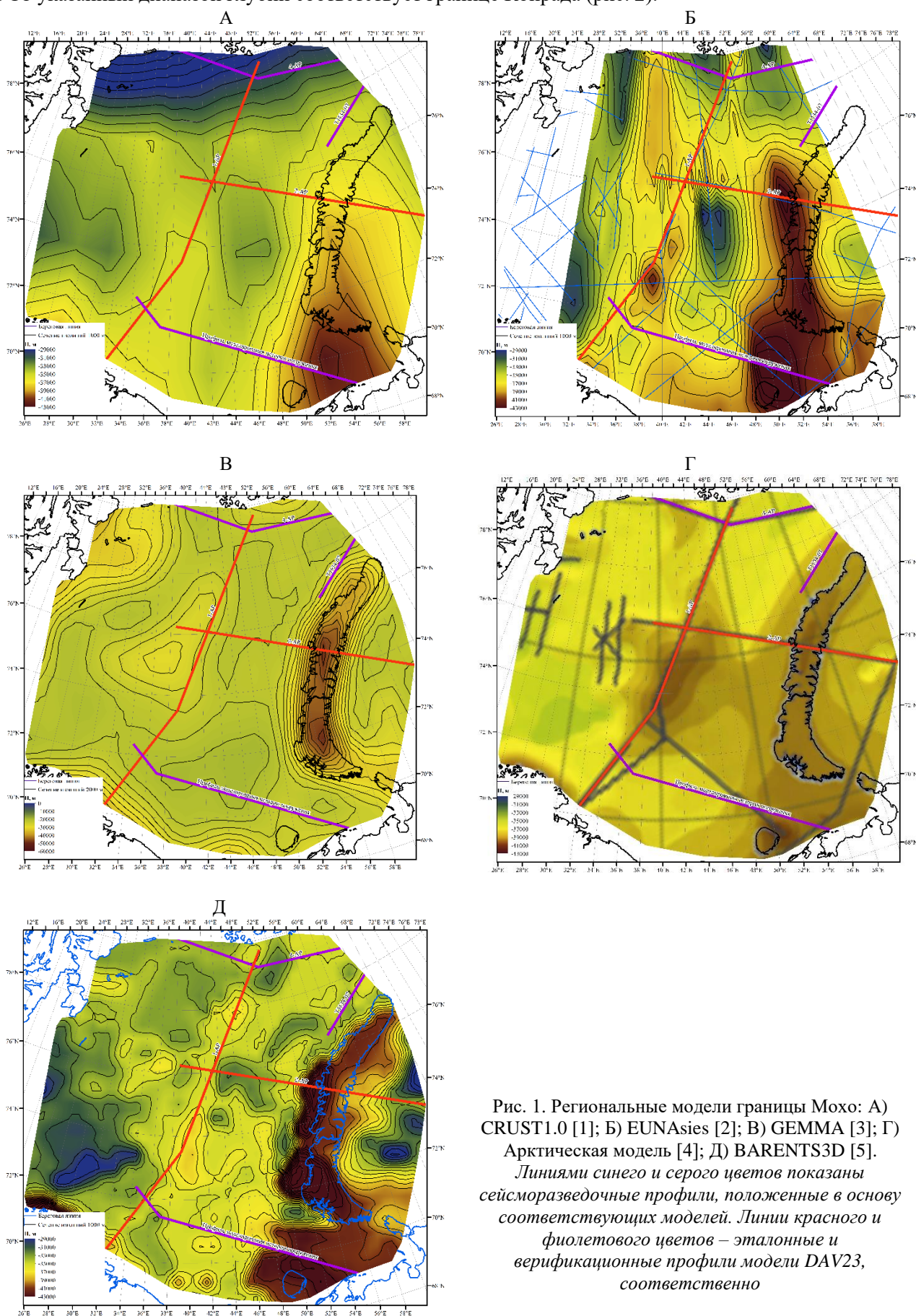


Рис. 1. Региональные модели границы Мохо: А) CRUST1.0 [1]; Б) EUNAsies [2]; В) GEMMA [3]; Г) Арктическая модель [4]; Д) BARENTS3D [5].
 Линиями синего и серого цветов показаны сейсморазведочные профили, положенные в основу соответствующих моделей. Линии красного и фиолетового цветов – эталонные и верификационные профили модели DAV23, соответственно

Модель EUNaseis (рис. 1Б) сильно отличается от всех моделей и, на взгляд авторов, содержит неточности: изолинии вытянуты по долготе, в области северных архипелагов присутствуют «затяжки». Морфология границы Мохо модели EUNaseis не коррелирует с морфологией, установленной на профилях ГСЗ (рис. 2).

Арктическая модель (рис. 1Г) наилучшим образом согласуется с результатами ГСЗ и нами считается наиболее достоверной. Тем не менее и в ней есть расхождения. В центральной части Баренцева моря на профиле 1-АР вблизи пикета 700 км (рис. 2) по результатам интерпретации [20] не наблюдается уменьшения значений глубин до 45 км.

Схожая ситуация и для модели CRUST 1.0 (рис. 1А). В той же области, что и для «Арктической модели» на профиле 1-АР, присутствует поднятие до глубины 38 км вместо прогибания. В восточной части Баренцева моря можно выделить поднятие глубиной в 25 км на 74° широте. Данная структура не выражена ни на одной из моделей и не согласуется с геологией и историей развития региона.

Модель Varents3D (рис. 1Д) наиболее детальная из всех вышеперечисленных. В среднем значения глубин границы Мохо модели находятся в едином диапазоне с другими моделями. Обращает внимание большая мощность земной коры восточной части Баренцева моря относительно западной. В морфологии поверхности присутствуют локальные формы, не проявленные в других моделях и данных ГСЗ (рис. 2).

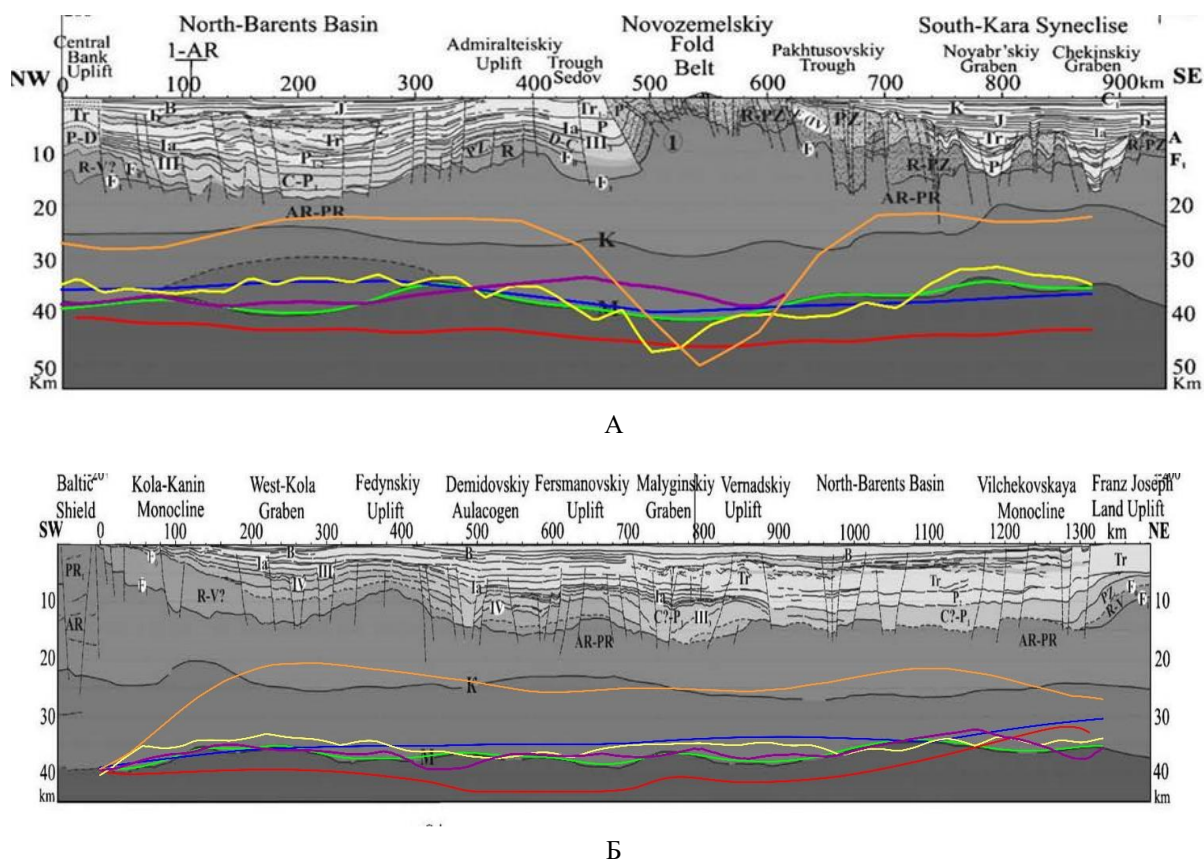


Рис. 2. Геолого-геофизические разрезы земной коры вдоль региональных профилей ГСЗ:

А) 1-АР, Б) 2-АР по [20] с дополнениями.

Положение профилей приведено на рисунке 1.

Модели границы Мохо показаны линиями разных цветов: CRUST 1.0 – синий, EUNA – фиолетовый, GEMMA – оранжевый, Арктическая модель – красный, BARENTS3D – желтый, DAV23 – зеленый

4. НАБОРЫ ВХОДНЫХ ДАННЫХ, ЭТАЛОНОВ И ВЕРИФИКАЦИОННЫХ ВЫБОРОК

При построении границы Мохо сформированы три набора данных – набор исходной информации, эталонная выборка и верификационная выборка.

Набор исходной информации включил:

- рельеф дна и суши (модель IBCAO, детальность 1') [25] (рис. 3А) и его генеральные особенности;
- аномалии поля силы тяжести в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя 2.67 г/см³ (модель World Gravity Model, детальность 2') [26] (рис. 3Б) и его низкочастотные компоненты;
- аномалии магнитного поля Земли (модель EMAG2v3, детальность 2') [27] (рис. 3В) и его низкочастотные компоненты;
- рельеф границы Мохо (модель GEMMA, детальность 5') [3] (рис. 1В).

В набор исходной информации входит две поверхности – рельеф дна и суши (модель IBCAO) и рельеф границы Мохо (модель GEMMA). Первая нужна для поддержания основных морфологических закономерностей на разных типах коры, связанных с разными абсолютными отметками в рельефе дна и суши (сухопутная часть, континентальный шельф, глубоководная часть). Поскольку модель GEMMA базируется на гравиметрических материалах, авторская модель должна быть наиболее похожа на нее. Модель GEMMA используется для сохранения генеральных форм рельефа границы Мохо в результирующей модели.

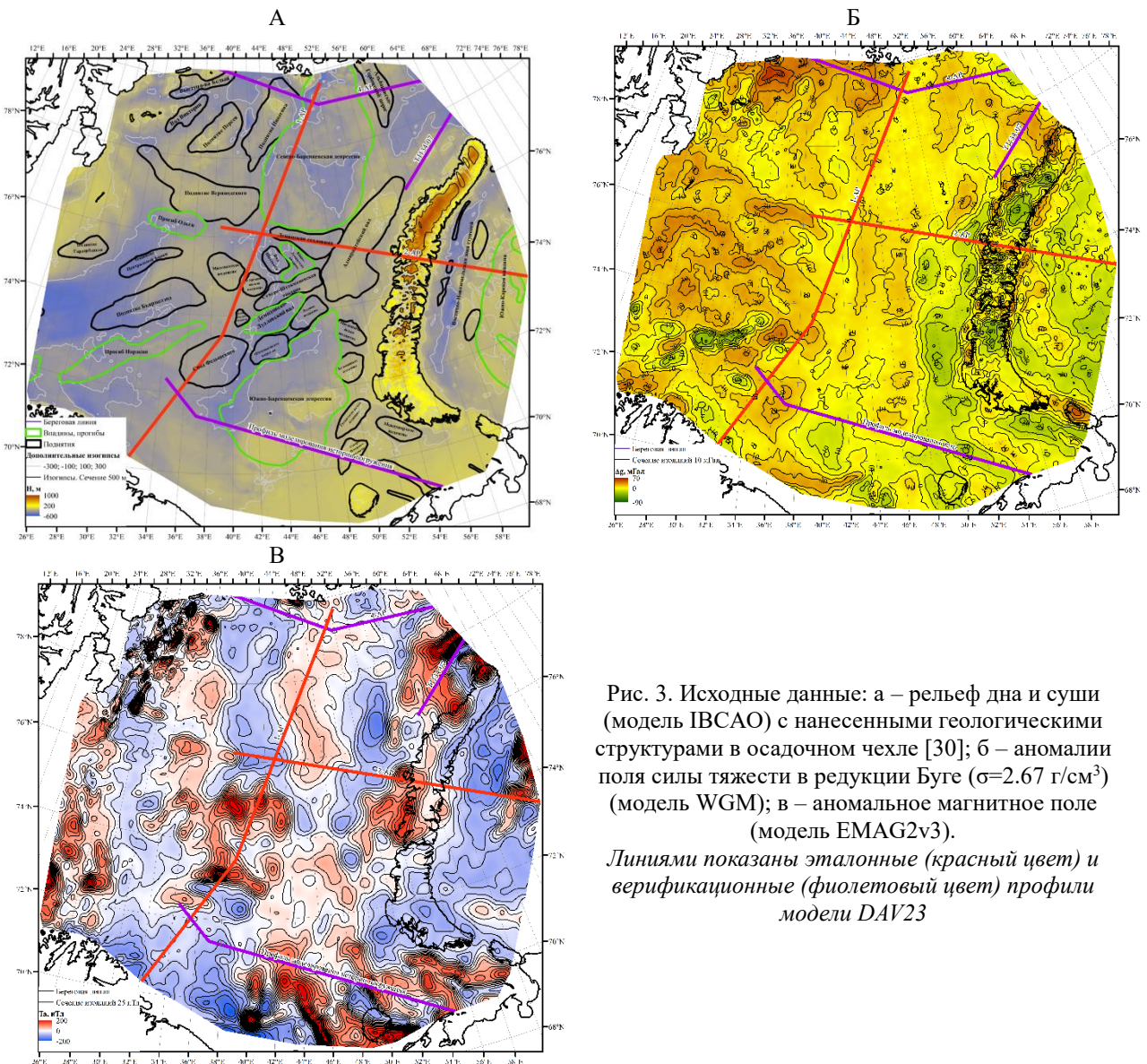


Рис. 3. Исходные данные: а – рельеф дна и суши (модель IBCAO) с нанесенными геологическими структурами в осадочном чехле [30]; б – аномалии поля силы тяжести в редукции Буге ($\sigma=2.67$ г/см³) (модель WGM); в – аномальное магнитное поле (модель EMAG2v3).

Линиями показаны эталонные (красный цвет) и верификационные (фиолетовый цвет) профили модели DAV23

Эталлонная выборка включает определения глубин до границы Мохо на профилях ГСЗ 1-АР (рис. 1) и 2-АР (рис. 2). Профили взаимно ортогональны и пересекают исследуемую площадь в субмеридиональном и субширотном направлениях, проходя примерно через ее центр. Что позволяет предположить, что на них будут содержаться характерные для исследуемого региона изменения в морфологии границы Мохо.

Для оценки полученных результатов в верификационную выборку включены определения глубин до границы Мохо на профилях ГСЗ 4-АР [20], МОВ-ОГТ Т1134-07 [28]. В верификационную выборку также включен профиль из работы [29], на котором представлена модель границы Мохо в юго-восточной части Баренцева моря, полученная на основе моделирования истории погружения бассейна. В соответствии с рассуждениями, приведенными в разделе «Методика построения структурной поверхности с использованием машинного обучения» в верификации участвовали профили 1-АР и 2-АР.

5. МОДЕЛЬ ПРОГНОЗНОЙ МОРФОЛОГИИ ПОДОШВЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ ГРАНИЦЫ МОХО

На рисунке 4 представлена модель границы Мохо, полученная по вышеописанной методике после уточнения по ее гравитационному эффекту (рис. 4). После уточнения модели по ее гравитационному эффекту исчезли локальные формы рельефа, которые отнесены к разряду недостоверных и неподтвержденных по моделированию их гравитационных проявлений.

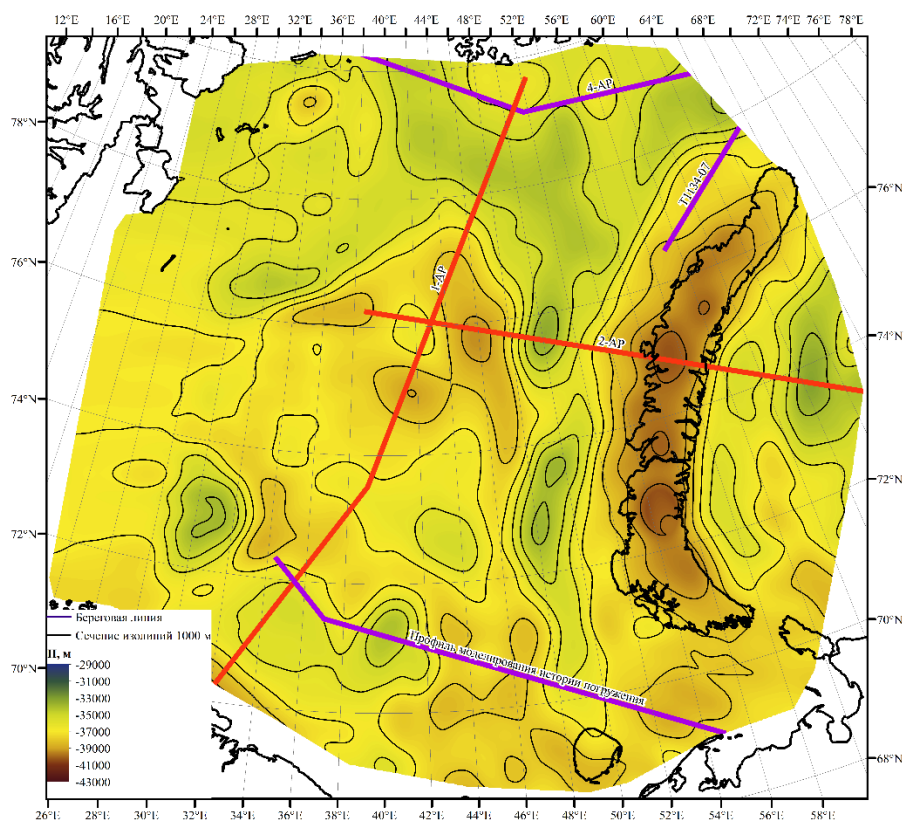


Рис. 4. Модель границы Мохо DAV23, полученная с применением алгоритма машинного обучения и сглаженная путем решения обратной задачи гравиразведки.

Линиями показаны эталонные (красный цвет) и верификационные (фиолетовый цвет) профили

Глубина до границы Мохо в среднем изменяется от 33 до 40 км. Морфологически наиболее выраженными особенностями являются области архипелага Новая Земля и к западу от него.

Под архипелагом Новая Земля наибольшая мощность земной коры, максимальная глубина до границы Мохо составляет 40 км. Западнее архипелага Новая Земля в контуре Восточно-Баренцевского мегапрогиба протягивается область сокращенной мощности коры. Здесь минимальная глубина

составляет 33-34 км. В работе Э.В. Шпилова и С.И. Шкарубо [31] показано, что под мегапрогибом «расположена область аномального строения верхней мантии, которая выражена куполовидными и валлообразными поднятиями поверхности на фоне регионального мантийного свода». Мантийное поднятие разделено на две части. Первая находится под Южно-Баренцевской депрессией осадочного чехла, вторая – под Северо-Баренцевской. Поднятия разделены Адмиралтейским горстом. Область сокращенной мощности земной коры распространяется на север, вплоть до архипелага Земля Франца Иосифа и продолжается на северо-восток в сторону прогиба Святой Анны и северо-запад в сторону прогиба Франц-Виктория.

В области пересечения профилей 1-АР и 2-АР по данным ГСЗ находится локальное погружение поверхности до глубины около 39 км. Форма и простираие локального погружения зафиксированы в модели DAV23. Подобной структуры в альтернативных моделях нет.

В траверзе профиля 1-АР выделяются относительно небольшие по размеру (150-200 км) и перепаду глубин (2-3 км) изометричные впадины и поднятия.

6. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗНЫХ МОДЕЛЕЙ МОРФОЛОГИИ ПОДОШВЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА

Сопоставление прогнозной границы Мохо с независимыми данными и альтернативными моделями

Морфология полученной модели в целом согласуется с данными ГСЗ и всеми альтернативными моделями за исключением отдельных нюансов.

На рисунке 5 представлен геолого-геофизический разрез по профилю ГСЗ 4-АР с нанесенными границами Мохо по разным моделям. В среднем расхождение между границей Мохо по модели DAV23 и данным ГСЗ составляет 2 км. Среди других моделей наибольшее отклонение от данных ГСЗ имеет модель CRUST1.0.

К северу от архипелага Новая Земля площадными сейсморазведочными работами МОВ-ОГТ [25] выделена граница Мохо. Размер площади относительно небольшой – вдоль длинной стороны расстояние составляет примерно 350 км. На таком промежутке граница Мохо изменяется в небольших пределах (от 34 до 37 км) за счет локальных форм (рис. 6). Во всех моделях границы Мохо, в том числе и модели DAV23, локальные формы не выделяются – они описывают лишь воздымание границы Мохо в сторону Карского моря. Среди всех моделей глубина до границы Мохо по модели DAV23 наибольшая. Это может быть обусловлено гравитационным эффектом от увеличенной мощности земной коры под архипелагом Новая Земля.

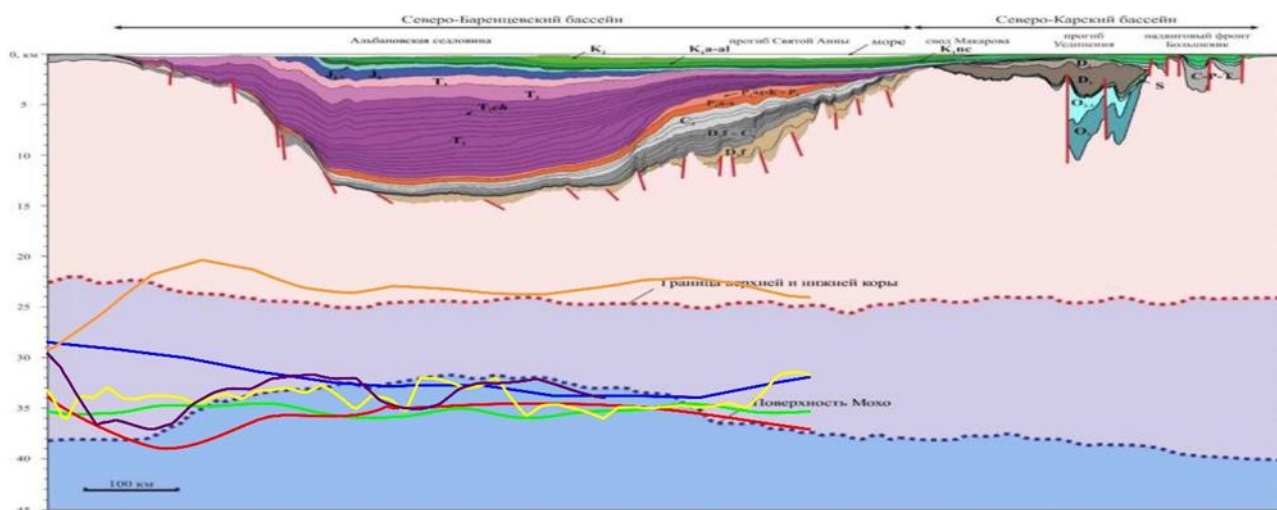


Рис. 5. Геолого-геофизический разреза земной коры вдоль регионального профиля 4-АР [29] с изменениями. Положение профиля приведено на рисунке 1. Условные обозначения к цветам линий границы Мохо по разным моделям приведены на рисунке 2

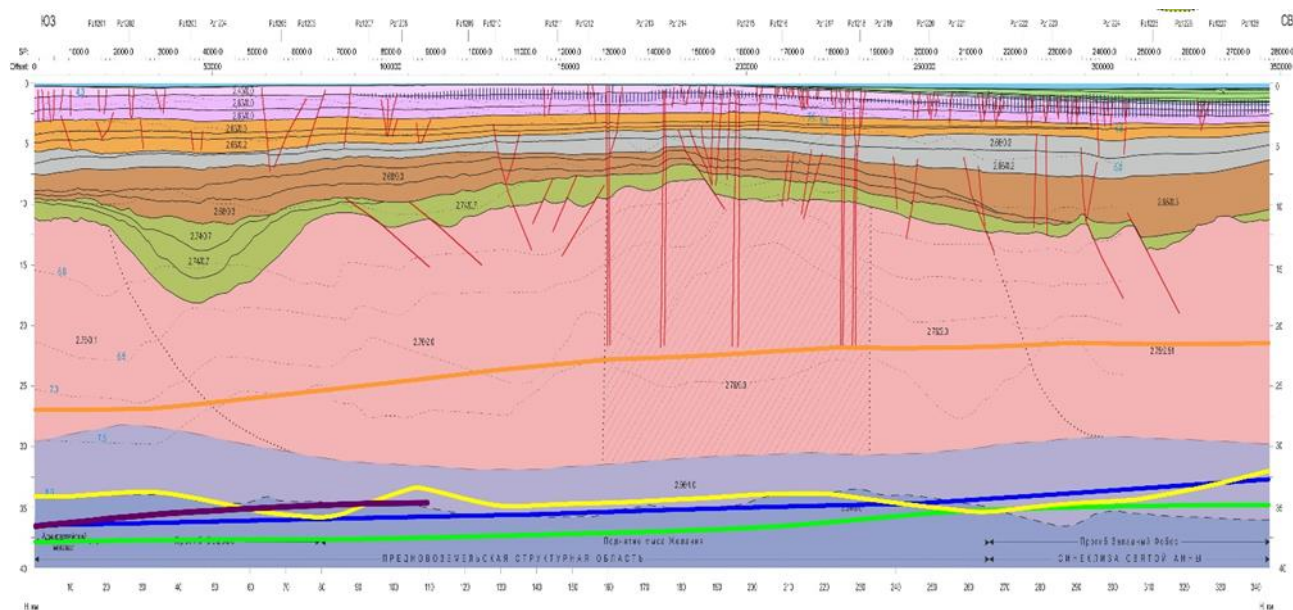


Рис. 6. Геолого-геофизический разрез земной коры вдоль профиля Т1134-07 [28] с изменениями. Положение профиля приведено на рисунке 1. Условные обозначения к цветам линий границы Мохо по разным моделям приведены на рисунке 2

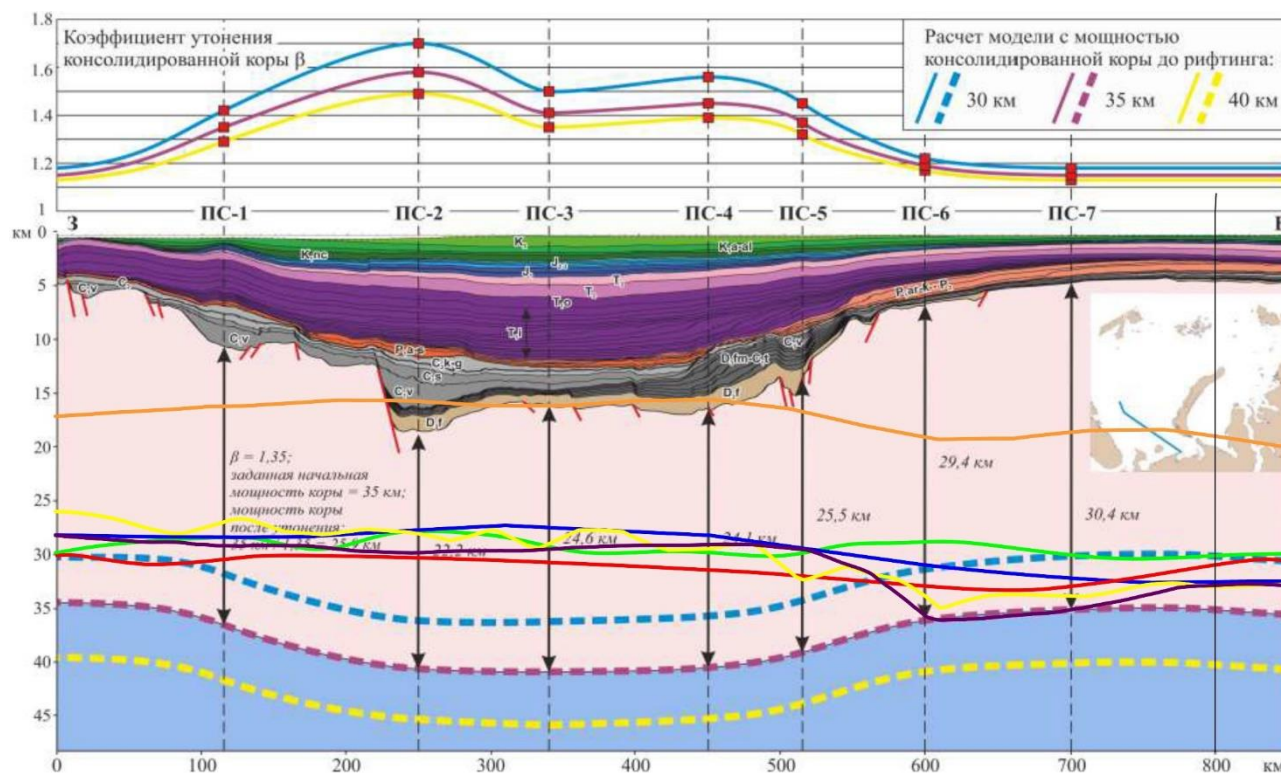


Рис. 7. Мощности консолидированной коры, полученные по результатам моделирования истории погружения [29] с изменениями. Положение профиля приведено на рисунке 1. Условные обозначения к цветам линий границы Мохо по разным моделям приведены на рисунке 1

На рисунке 7 представлен геолого-геофизический разрез в южной части Баренцева моря с нанесенными значениями глубин поверхности Мохо по разным моделям. Профиль проходит через Восточно-Баренцевский мегапрогиб (депрессию). Можно заметить, что морфология границ схожа, однако отличается от представленной в работе [29]. Прогнозная граница расходится с моделью

CRUST1.0 в среднем на 2-3 км, но структурно почти не отличается. Значения глубин по модели EUNA до ПК 600 км, коррелируют с другими моделями, однако юго-восточнее происходит резкое увеличение мощности земной коры, которое, возможно, обусловлено переходом из области Южно-Баренцевского депрессии в область Тимано-Печорской плиты. В модели DAV23 этот переход более плавный. В признаках набора исходной информации, использованных при построении нейронной сети нет резкого перехода на границе плит. Соответственно нет и резкого изменения в прогнозной границе Мохо. Вопрос морфологии границы Мохо на стыке плит остается открытым.

Как было указано выше, эталонные профили также могут быть рассмотрены для оценки точности построений, поэтому приведем сопоставление моделей границы Мохо по профилям ГСЗ 1-АР и 2-АР. В целом прогнозная граница более сглаженная, чем граница по данным ГСЗ, но существенных отличий нет. Остальные модели границы Мохо находятся в диапазоне глубин, заданных результатами ГСЗ, но имеют собственные локальные формы, которые между моделями чаще всего не коррелируют.

Для количественной оценки моделей границы Мохо рассчитаны среднеквадратические отклонения (СКО) на верификационной выборке (табл. 2) и пространственное расхождение между моделями (табл. 3, 4).

СКО на профилях ГСЗ 1-АР 2-АР (табл. 2) показывает, что модель авторов наибольшим образом коррелирует с результатами сейсморазведки – данный факт вполне оправдан, так как именно эти материалы легли в основу модели DAV23. Однако на профиле ГСЗ 4-АР СКО возрастает и соответствует значениям погрешности других моделей. Модели EUNaseis, CRUST1.0, Barents3D (модели выстроены в порядке увеличения СКО) также коррелируют с глубинами по ГСЗ. Арктическая модель и GEMMA имеют наибольшее отклонение от верификационной выборки, но Арктическая модель имеет хорошую корреляцию с профилем ГСЗ 4-АР. Разница у Арктической модели по профилям ГСЗ 1-АР и 2-АР является константой и может возникать в виду неоднозначности выделения границы Мохо по данным сейсморазведки, так как глубина залегания высокая, а изменение значения скорости между верхней мантией и нижней корой является небольшим (~0.1 км/с). Разница у модели GEMMA является несистематической и, по нашему мнению, возникает из-за формального выбору гравиактивной поверхности.

Таблица 2. Среднеквадратическое отклонение глубин границы Мохо по разным моделям на верификационной выборке

Профиль	CRUST1.0	EUNaseis	GEMMA	Artic model	Barents3D	DAV23
1-АР	1684	1235.9	2991.6	2560.7	1414.2	287.2
2-АР	2482.6	2081.6	6323.2	8092.6	3400	456.2
T1134-07	1113	849	1894		1026	1184
4-АР	3759	2125	2346	1443	2668	2301

Для оценки пространственного полученной модели рассчитана средняя глубина поверхности Мохо по всем моделям (без учета модели GEMMA). В контуре площади исследования она составила 36456 км. Средние отклонения каждой модели от средней глубины приведены в таблице 3. Средние значения глубин моделей кроме модели GEMMA не различаются больше чем на 1,3 км. Минимальное отклонение имеет граница реконструированная модель DAV23, максимальное GEMMA – 11.1 км.

Таблица 3. Отклонение средних уровней от средней глубины границы Мохо по разным моделям

	GEMMA	CRUST1.0	EUNaseis	Barents3D	DAV23
Средний уровень	11.1	0.7	-0.5	0.8	-0.1

Среднеквадратические отклонения от средней глубины приведены в таблице 4. Наименьшее СКО от среднего уровня имеет модель DAV23 (± 1.4 км), далее модель CRUST1.0 (± 2.4 км), а модели EUNaseis и Barents3D имеют схожие значения (± 3 км).

Таблица 4. Среднеквадратическое отклонение среднего уровня от глубин границы Мохо по разным моделям

	GEMMA	CRUST1.0	EUNaseis	Barents3D	DAV23
Средний уровень	5.6	2.4	3.1	3.3	1.4

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика прогноза структурной поверхности с применением машинного обучения. Важным элементом методики является возможность верификации прогнозной границы по её гравитационному эффекту.

В статье представлен пример прогноза границы Мохо в Баренцевоморском регионе с демонстрацией набора исходных данных, эталонной и верификационной выборок. Прогнозная граница Мохо сопоставлена с альтернативными моделями и данными глубинной сейсморазведки.

Прогнозная граница имеет высокую степень корреляции с независимыми построениями. Среднее расхождение между глубинами прогнозной границы и данными ГСЗ менее 2 км.

В прогнозной границе Мохо Баренцева моря отобразились ранее не выявленные формы рельефа, характеризующие особенности геологического строения региона. Под Восточно-Баренцевским мегапрогибом показано наличие выступа, вытянутого с юга на север шириной 150 км и высотой около 4 км. Выступ находится не под осью мегапрогиба, а под его восточным крылом. Он разделен на две части Адмиралтейским поднятием. Несоответствие положения двух осей – мегапрогиба и выступа по границе Мохо может свидетельствовать о направлении смещения Новоземельского блока земной коры с востока на запад. Разделение выступа на северную и южную части произошло в результате смятия и навала Адмиралтейского поднятия. Выступ продолжается в северном направлении, обрамляя архипелаг Земля Франца Иосифа с запада и востока. В связи с этим можно предположить увеличение мощности земной коры под архипелагом Земля Франца Иосифа. В центральной части Баренцева моря присутствуют локальные поднятия и прогибы амплитудой до 2-3 км.

Показано, что значения глубин по модели GEMMA в Баренцевоморском регионе соответствуют границе Конрада и не могут быть применены для анализа структуры земной коры Баренцева моря.

Модель EUNaseis хорошо коррелирует с другими моделями в центральной и южной части акватории, в рамках одной тектонической единицы – Восточно-Баренцевской депрессии. В юго-восточной части акватории при переходе в Тимано-Печорскую провинцию происходит скачок в значениях глубин по модели, который не проявлен в других материалах. Вопрос о поведении границы Мохо вблизи северной границы Тимано-Печорской плиты остается дискуссионным.

Модель CRUST1.0 является наиболее приближенной к результатам сейсморазведочных работ на профилях ГСЗ, однако существуют области, в которых значения глубин расходятся с эталоном более чем на 4 – 5 км.

Модель Barents3D хорошо коррелирует с моделью CRUST1.0, EUNaseis, Арктической моделью и моделью DAV23. Диапазон изменения глубин границы Мохо лежит в схожих с другими моделями пределах. Однако, в моделях присутствуют локальные формы рельефа, которые не выявлены по данным сейсморазведки и не подтверждаются по другим моделям.

Модель DAV23, полученная авторами, хорошо коррелирует как с данными сейсморазведки по профилям ГСЗ (СКО ± 0.4 км), так и с существующими моделями границы Мохо (максимальное СКО ± 1.4 км). Модель DAV23 может быть использована в дальнейших научно-исследовательских работах в Баренцевоморском регионе.

Развитие методики построение структурных поверхностей с применением алгоритмов машинного обучения, описанной в данной статье, может лечь в основу применения этих алгоритмов в моделировании солнечно-земных связей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Laske, G., Masters, G., Ma, Z. and Pasyanos, M.* Update on CRUST1.0 – A 1-degree Global Model of Earth's Crust, *Geophys. Res. Abstracts*, 15, Abstract EGU2013-2658, 2013.
2. *Artemieva I.M., Thybo H.* EUNAsis: a seismic model for Moho and crustal structure in Europe, Greenland, and the North Atlantic region. *Tectonophysics*, 609. 2013. 97-153. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.08.004>.
3. *Negretti, M., M. Reguzzoni, and D. Sampietro* (2012), A web processing service for GOCE data exploitation, in *First International GOCE Solid Earth Workshop*, Enschede, The Netherlands.
4. *Petrov, O., Morozov, A., Shokalsky, S., Kashubin, S., Artemieva, I.M., Sobolev, N., Petrov, E., Ernst, R.E., Sergeev, S., Smelror, M.*, 2016. Crustal structure and tectonic model of the Arctic region. *Earth Sci. Rev.* 154, 29–71. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.11.013>.
5. NORSART(2006): BARENTS3D, <http://www.norsar.no/seismology/barents3d/>
6. *Арутюнян, Д. А., Лыгин, И. В., Соколова, Т. Б., Кузнецов, К. М., Широкова, Т. П. и Шклярчук, А. Д.* Плотностная модель земной коры Баренцева моря. // Труды IX Международной научно-практической конференции Морские исследования и образование (MARESEDU-2020) Том I (III). — Т. 3. — ООО ПолиПРЕСС Тверь, 2020. — С. 505–510.
7. *Arutyunyan, D. A., Lygin, I. V., Sokolova, T. B., Bulychev, A. A., Kuznetsov, K. M., and Krivosheya, K. V.* Parameters of magmatic formations in the Barents Sea according to hydromagnetic. // *Marine Technologies 2019 (Gelendzhik2019)*. Proceedings of a meeting held 22-26 April 2019, Gelendzhik, Russia. — EAGE. — Netherlands: Netherlands, 2019. — P. 104–109.
8. Интерпретация геофизических материалов: учебное пособие / *Лыгин И.В., Соколова Т.Б., Булычев А.А., Коснырева М.В., Старовойтов А.В., Тевелев Ал В., Шалаева Н.В.* – Саратов: Вузовское образование, 2020. 223 с. – ISBN 978-5-4487-0685-1. – Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS [сайт]. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/93991.html>.
9. *Кривошея К.В., Лыгин И.В., Соколова Т.Б., Широкова Т.П.* Возможности современной гравиразведки и магниторазведки // *Деловой журнал Neftegaz.RU*. 2019. № 1 (85). С. 66 – 72.
10. *Лыгин И.В., Правдивец Д.Д., Сурков М.В., Жаров А.Э., Бакуев О.В., Фомин А.Е.* Модель кровли палеогеновых отложений Северной части острова Сахалин по данным гравиразведки и сейсморазведки // *Геофизика*. 2022. № 3. С. 32–44.
11. *Широкова Т.П., Лыгин И.В., Соколова Т.Б.* Особенности сейсмогравитационного моделирования в разных физико-геологических ситуациях // *Вестник Московского Университета. Серия 4: Геология*. 2022. № 1. С. 42 – 53.
12. *Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусов А.А.* Изучение строения кристаллического основания платформенных областей по данным магниторазведки и гравиразведки // *Геофизика*. - 2003. - № 6. - С. 55-58.
13. *Афанасенков А.П., Лыгин И.В., Обухов А.Н., Соколова Т.Б., Кузнецов К.М.* Объемная реконструкция тектонических элементов Енисей-Хатангской рифтовой системы по результатам комплексной геолого-геофизической интерпретации // *Геофизика*. 2017. № 2. С. 60 – 70.
14. *Шклярчук А.Д., Кузнецов К.М.* Выделение структурных особенностей потенциальных полей на основе нейронных сетей // *Материалы Международного молодежного научного форума Ломоносов-2020 (Москва)*. Москва. 2020.
15. *Колмаков А.В.* Методы машинного обучения в задачах комплексной интерпретации данных потенциальных полей и сейсморазведки // *Материалы конференции «ГеоЕвразия-2021. Геологоразведка в современных реалиях»*. Москва. 2021. Том II. С. 76 – 80.
16. *Shklyaruk A.D., Kuznetsov K.M., Lygin I.V., Arutyunyan D.A.* Algorithms for constructing structural surfaces on geophysical data based on regression and neural networks // In “Engineering and Mining Geophysics 2021”. Netherlands. 2021. P. 1 – 6. DOI: 10.3997/2214-4609.202152046
17. *Никитин А.А.* Теоретические основы обработки геофизической информации: учебник для вузов. – М.: Недра, 1986. 342 с.
18. *Andreas C. Müller, Sarah Guido.* Introduction to Machine Learning with Python // O'Reilly Media, Inc. 2016 ISBN: 9781449369415.
19. *Чепиго Л.С.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020615095 GravMagInv3D, выдано 14.05.2020.

20. *Ivanova N.M., T.S. Sakoulina, Yu.V. Roslov*, 2006. Deep seismic investigation across the Barents–Kara region and Novozemelskiy Fold Belt (Arctic Shelf). *Tectonophysics* 420, 123–140.
21. *Ivanova N. M., T. S. Sakulina, I. V. Belyaev, et al.*, 2011. Depth model of the Barents and Kara seas according to geophysical surveys results. In: Spencer, A. M., Embry, A. F., Gautier, D. L., Stoupakova, A. V. and Sørensen, K. (eds): *Arctic Petroleum Geology*. Geol. Soc. London, *Memoirs*, 35; 209–221, doi: 10.1144/M35.12
22. *Roslov, Yu.V., Sakoulina, T.S. and Pavlenkova, N.I.*, 2009. Deep seismic investigations in the Barents and Kara Seas, *Tectonophysics*, 472, 301–308.
23. *Grad, M., Tiira, T.* ESC Moho Working Group, 2009. The Moho depth of the European plate. *Geophys. J. Int.* 176, 279–292.
24. *Kashubin, S.N., Petrov, O.V., Androsov, E.A., Morozov, A.F., Kaminsky, V.D., Poselov, V.A.* 2011: Map of crustal thickness in the Circumpolar Arctic. Region. *Geology and metallogeny*. 46. 5–13.
25. *Jakobsson, M., L. A. Mayer, B. Coakley, et al.* The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0, *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1029/2012GL052219.
26. *Bonvalot, S., Balmino, G., Briais, A., M. Kuhn, Peyrefitte, A., Vales N., Biancale, R., Gabalda G., Reinquin, F., Sarrailh M.*, 2012. World Gravity Map. Commission for the Geological Map of the World. Eds. BGI-CGMW-CNES-IRD, Paris.
27. *Meyer, B., Saltus, R., Chulliat, A.* (2016). EMAG2: Earth magnetic anomaly grid (2-arc minute resolution) version 3. National Centers for Environmental Information, NOAA. Model. <https://doi.org/10.7289/V5H70CVX>.
28. *Шлыкова В.В., Величко Б.М., Крюкова Г.Г., и др.* Уточнить геологическое строение и перспективы нефтегазоносности северной части Предновоземельской структурной области. Государственный контракт № 21/03/70-31 от 18.05.2011 г. ОАО «МАГЭ». Мурманск, 2012ф. - 1387л., 84р., 57/136гр., 6кн., 5п., 8м.н.
29. *Старцева К.Ф.* Этапы формирования Восточно-Баренцевского и Северо-Карского бассейнов на основе сейсмостратиграфического анализа: диссертация ... кандидата Геолого-минералогических наук: 25.00.01 / Старцева Ксения Федоровна; [Место защиты: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова], 2018 — С. 165.
30. *Ступакова, А.В., Сулова, А.А., Большакова, М.А., Сауткин, Р.С., Санникова, И.А.* Бассейновый анализ для поиска крупных и уникальных месторождений в Арктике // *Георесурсы*. 2017. Спецвыпуск. Ч. 1. С. 19-35. DOI: <http://doi.org/10.18599/grs.19.4>
31. *Шутилов Э.В., Шкарубо С.И.* Тектоника Баренцевоморской континентальной окраины // *Монография «Система Баренцева моря»* / под ред. Академика А.П. Лисицына. М.: ГЕОС. 2021. С. 11-25.

TECHNIQUE FOR CONSTRUCTING STRUCTURAL SURFACES FROM GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL DATA ON THE BASIS OF MACHINE LEARNING ON THE EXAMPLE OF RECONSTRUCTION OF THE MOHO BORDER IN THE BARENTS SEA REGION

Lygin I.V., Arutyunyan D.A., Chepigo L.S., Kuznetsov K.M., Shklyaruk A.D.

The article discusses a technique for reconstructing deep boundaries from potential field anomalies based on seismic data based on machine learning. A distinctive feature of the technique is the verification of the obtained predictive boundaries by the gravitational field. The technique was tested on the example of constructing a deep structural model of the Barents Sea. The article provides an example of the reconstruction of the Moho border.

KEYWORDS: GRAVITY EXPLORATION, MAGNETIC EXPLORATION, SEISMIC EXPLORATION, MACHINE LEARNING METHODS, NEURAL NETWORKS, MOHO BOUNDARY, SEDIMENTARY CAP BOTTOM, BARENTS SEA