

*Посвящается светлой памяти
Абдулхая Азымовича Жамалетдинова*

Многopараметрический подход в глубинной геoeлектрике

И.И. Рокитянский
Институт геофизики им. С.И.Субботина НАН Украины, rokityansky@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Описываются основные положения геoeлектрики, подчеркивается важность учета неоднозначности её обратной задачи. Рассматриваются три основных метода глубинной геoeлектрики, использующие естественные поля ионосферно-магнитосферного происхождения: магнитовариационное зондирование (МВЗ), магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) и магнитовариационное профилирование (МВП). Описываются функции отклика каждого метода. Каждая функция отклика несет свою специфическую информацию о некоторых параметрах изучаемого объекта и характеризуется степенью достоверности извлекаемой из неё информации об объекте. Например, наиболее достоверную информацию об аномалиях электропроводности (если они есть на исследуемой площади) содержат функции отклика МВП. Горизонтальный тензор аномального поля содержит информацию об электропроводности под пунктом наблюдения, а типпер (вектор индукции) – информацию с окружающих участков. В целом информация МВП меньше подвержена искажениям, чем информация МТЗ и ей надо придавать больший вес, но, конечно не отказываться и от данных МТЗ, МВЗ в рамках взаимопроникающего комплекса. Искусственные источники поля в глубинной геoeлектрике используются редко ввиду дороговизны и своих сложностей интерпретации. С 1970 года два мощных источника, созданных для других целей, оказались на Кольском полуострове и были использованы для глубинных зондирований. В центре этих исследований оказался молодой талантливый геолог-геофизик и прекрасный организатор крупных проектов Абдулхай Азымович Жамалетдинов. Проект «Хибины» с МГД генератором и сверхглубокой скважиной в качестве одного из объектов исследования, низкочастотный излучатель «Зевс», сигналы которого записаны в Китае на расстоянии 7000 км и ряд проектов, задуманных и организованных Жамалетдиновым и выполненных под его руководством: Волгоград-Донбасс (1986), эксперименты «ФЕНИКС» (2007, 2009 и позднее), «Ковдор-2015», «Мурман-2018» и другие. При этом были разработаны методики интерпретации с использованием своих функций отклика, позволяющие по-новому «увидеть» объект исследования. Этот опыт необходимо сохранить, обобщить, усовершенствовать и использовать. Если в центр или по краям современных синхронных многоточечных проектов МТЗ-МВП поставить две линии в качестве источника набора фиксированных частот и/или импульсов с различной поляризацией и записывать их во время выделенных сеансов, то можно получить ценную дополнительную информацию.

Ключевые слова: глубинная геoeлектрика, функции отклика, электропроводность Земли.

Основные определения и методология

Геoeлектрика – это раздел геофизики, изучающий распределение электропроводности (диэлектрическую проницаемость не рассматриваем) внутри Земли. Для ее изучения используются электрические и электромагнитные (ЕМ) поля различного происхождения. В глубинной геoeлектрике обычно используются естественные ЕМ-поля токов в ионосфере и магнитосфере Земли.

Обратная задача геoeлектрики - это извлечение информации об интересующем нас объекте - электропроводности внутри Земли $\epsilon(\mathbf{x})$ (вектором \mathbf{x} будем обозначать положение точки в трехмерном пространстве) и только электропроводности (вещественный состав, геологическая природа – все это за рамками

геoeлектрики) из адекватных (то есть электромагнитных) экспериментальных данных.

Реальный объект всегда неисчерпаем по своей сложности и может быть описан только бесконечномерным вектором. Данные наблюдений всегда ограничены количественно и по точности и могут быть представлены только конечномерными векторами. Следовательно, обратная задача всегда многозначна. Это следует из общефилософских представлений, в геофизике наиболее четко сформулировано в работах Backus & Gilbert (1967, 1970), применительно к геoeлектрике – в серии работ Паркера, например, (Parker, 1980).

Сказанное не противоречит теоремам единственности обратных задач, доказанных в рамках отдельных методов, например, одномерного МТЗ (Тихонов, 1965). Эти теоремы

доказаны для идеализированных бесконечномерных входных данных, которых Природа не дает.

О пользе регуляризации

По цели исследования науку можно подразделить на фундаментальную (геоэлектрика) и прикладную (электроразведка). Цель фундаментальной – накопление новых достоверно установленных знаний. В условиях неоднозначности обратной задачи получение одного решения может оказаться не достаточным, необходимо описание всей совокупности моделей, удовлетворяющих имеющимся наблюдениям, и только такой результат будет новым знанием. Приписывать в условиях неоднозначности свойства одной субъективно выбранной модели природному распределению электропроводности неправомерно и может привести к ложным результатам.

Цель прикладной науки, электроразведки, поиск полезных ископаемых и свои результаты она может выдавать кратко: есть месторождение или нет. Такое исследование называют целевым. Его особенностью является требование определенности, единственности решения, которое является основанием к практическому действию. Рассмотрим пример. Производству к определенному сроку требуется полезное ископаемое. Выделяется определенная сумма денег. Достоверный метод – только вскрытие с помощью скважин. Для повышения вероятности успешного выбора мест бурения часть денег выделяется геофизикам. Они должны провести работы и к заданному сроку показать, где следует ставить скважины. Средств и времени обычно не хватает для обстоятельного исследования, но и при недостатке информации единственное решение должно быть представлено в срок. Подобная ситуация встречается во многих системах управления - по недостаточной текущей информации выдать единственное решение: курс корабля или летающего аппарата, цель ракеты и многое другое. Для математического обоснования решения в подобных ситуациях развита теория решения некорректных задач, в частности теория регуляризации, развитая А.Н.Тихоновым (1943) и его учениками. Регуляризация дает оптимальное единственное решение для практических приложений. В фундаментальных исследованиях регуляризацию лучше не применять, а при применении тщательно следить, не вносит ли она субъективный фактор в результаты.

Комплекс трех методов глубинной геоэлектрики

Магнитовариационное зондирование (МВЗ) появилось в результате работ Лэмба (1883), Шустера (1889), Чепмена (с 1919), Прайса (с 1930), Беньковой (с 1941).

Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) было независимо предложено Тихоновым (1950) и Каньяром (1953).

Магнитовариационное профилирование (МВП) появилось в результате наблюдений аномального поведения геомагнитных вариаций: в Германии Визе (1954, 1965), Шмукер (1959), Порстендорфер (1965), Фанзелау (1968) и др.; в Японии Рикитаки (1951, 1968); на морских побережьях и в Австралии Паркинсон (1959, 1964).

Взаимопроникающий комплекс трех методов был предложен в работе «Исследование глубинной электропроводности» (Рокитянский, 1970) и впоследствии развивался и конкретизировался в статьях и монографиях.

Функции отклика

Исследование неоднородно распределенной электропроводности земных недр является сложной задачей, поэтому ее решают в два этапа: обработка с определением функций отклика и решение обратной задачи - интерпретация. Измеряемыми величинами являются компоненты естественных электрического и магнитного полей, представляемые в виде дискретных временных рядов, содержащих набор вариаций с различными периодами. Чтобы исключить из дальнейшего рассмотрения изменяющиеся параметры источников ЕМ поля, проводится обработка временных рядов с целью получения функций отклика (ФО, на английском языке RF – response function).

В методе МТЗ, основанном на модели вертикально падающей плоской волны, модели Тихонова-Каньяра (Т-К), функцией отклика является импеданс и информационно равноценные ему адмитанс, кажущееся сопротивление и другие. ФО выбирают в таком виде, чтобы было удобно выполнять последующий этап - нахождение $\epsilon(x)$. Это кажущееся сопротивление, фазовый тензор импеданса, помогающий уменьшить помехи от статических искажений, профильные псевдоразрезы, наглядно показывающие можно ли профиль аппроксимировать двумерной структурой.

В методе МВЗ ранее функциями отклика были магнитное отношение и вычисляемое по нему отношение вторичного внутреннего поля к первичному внешнему, от которых, как было предложено в работе (Бердичевский и др., 1969), перешли к спектральному импедансу, то есть к

импедансу, определяемому для конкретной пространственной гармонике. Если выполняется условие частотного зондирования (Рокитянский, 1981, стр. 44-46):

$$\delta = (\mu \sigma \omega / 2)^{-1/2} \ll (r/n(n+1))^{1/2} \quad (1),$$

(где n – порядок сферической гармонике, r – радиус Земли, σ – проводимость слоев Земли, куда проникает поле частоты ω), то есть глубина скин-слоя δ меньше пространственного размера сферической гармонике порядка n , то данные МВЗ можно совмещать на общей частотной кривой с данными более локальных глубинных МТЗ для определения нормального разреза региона, который используется при интерпретации данных МВП.

В методе МВП используются две основные ФО: вектор индукции и горизонтальный магнитный тензор, профильные графики которых связаны преобразованием Гильберта. По этим графикам однозначно определяется местоположение оси или эпицентра аномалии и оценивается ее максимально возможная глубина и ширина. По частотной характеристике можно оценить суммарную продольную проводимость аномального тела. Эти результаты отличаются высокой достоверностью, поэтому им следует придавать большее доверие по сравнению с данными МТЗ, подверженным различным искажениям.

С Абдулхаем Азымовичем (Борей) Жамалетдиновым я познакомился где-то в середине 1960-ых.



БОРЯ – ВЫПУСКНИК УНИВЕРСИТЕТА, 1963 г.

Работы с контролируруемыми источниками

Работами с контролируруемыми источниками самостоятельно я никогда не занимался, а только в содружестве с Абдулхаем Азымовичем Жамалетдиновым и под его руководством. Первая наша работа (Жамалетдинов и др., 1979) была на севере Мурманской области на полуострове Рыбачий там, где находились заземления МГД-генератора, вторая (Рокитянский и др., 1983) – на склоне Украинского щита над Кировоградской аномалией. Обе выполнены методом частотного зондирования в диапазоне 0.28-900 Гц стандартными электроразведочными станциями с питанием и приемом откликов заземленными линиями. Конфигурация установки известна. Казалось бы, не сложно получить функцию отклика $\rho_k(\omega)$ и проинтерпретировать её. Но оказалось, что нужно разграничить зоны геометрического и частотного зондирования в условиях разномасштабных неоднородностей. Эти проблемы были приближенно решены и получены важные результаты: уточнена электропроводность полуостровов Средний и Рыбачий, использованная для расчета излучения МГД-источника, установлено глубинное залегание Кировоградской аномалии. Эти работы показали желательность записей и магнитных компонент.



Проф., Д-р, Академик РАН А.А.Жамалетдинов, 2011г - 70 лет

Методом МВП мы совместно уточнили параметры аномалии Имандра-Варзуга на Кольском полуострове (Рокитянский, Жамалетдинов и др., 1980). Впоследствии Абдулхай Азымович неоднократно использовал и обсуждал результаты МВП. Он организовал издание и выступил редактором сборника «Коровые аномалии электропроводности» (1984), написал с С.Н.Куликом обзор «Крупнейшие аномалии электропроводности мира» (Жамалетдинов и Кулик, 2012), во многих работах обсуждал природу аномалий, творчески отстаивая в одних случаях их электроннопроводящую природу (Жамалетдинов, 1996), в других случаях флюидную (Жамалетдинов, 2011). В своих исследованиях он обычно не ограничивался естественными полями, а дополнял их наблюдениями с искусственными контролируруемыми источниками, с которыми связаны его главные фундаментальные достижения.

Зондирование с МГД-источником «Хибины» мощностью до 80 МВт

В эти работы были вовлечены многие ведущие специалисты страны (Л.Л.Ваньян, М.Н.Бердичевский, М.С.Жданов, Б.С.Светов, Э.Б.Файнберг и др), разрабатывавшие вопросы теории и методики обработки. Абдулхай Азымович участвовал в выборе пунктов наблюдения, установке аппаратуры и проведении наблюдений, как импульсов МГД, так и других «обычных» источников, собирал все эти материалы. Импульсы МГД, принятые во всех пунктах, он выложил в Интернет и каждый мог поучаствовать в их интерпретации. Я не раз пересматривал их, но никакой интерпретации сделать не мог. Для этого нужно знать геоэлектрическое строение трассы распространения сигнала. Сам сигнал бимодальный, для разделения мод не хватает данных, теория интерпретации для каждой моды различная. В коллективной монографии (Велихов, 1989) описывается множество подходов, но надежного способа глубинного зондирования не описано. Для небольших глубин сопоставление импульсов в близко расположенных пунктах (по существу, профилирование) позволило получить новые очень интересные результаты о проводимости в земной коре (Жамалетдинов, 1990).

Проект Волгоград-Донбасс

Абдулхай Азымович задумал и организовал проект Волгоград-Донбасс - зондирование заземленной на концах питающей линии длиной 473 км с токовыми импульсами ± 700 А длительностью 100 с, питаемой от Волгоградской ГЭС напряжением 800 кВ.

Первый сеанс был проведен в 1979 с двумя приемными станциями ЦЕС, за что инициатор получил выговор за отсутствие на подготовке пусков МГД. Однако успех последующей обработки позволил организовать Всесоюзный проект Волга-86 с участием более 20 отрядов различных организаций, обеспечивших наблюдения с разносом до 700 км. Пятикомпонентные станции ночью регистрировали импульсы ЛЭП, а днем писали МТЗ. На Воронежском массиве была обнаружена неизвестная ранее коровая аномалия электропроводности. Десятки пунктов работали на Приазовском массиве и Донбассе. МВП на длинных периодах зафиксировало интенсивную аномалию электропроводности – Донбасскую, однако на записях импульсов и МТЗ эта аномалия отразилась совсем слабо и без МВП не была бы обнаружена.

СНЧ излучатель «Зевс» мощностью 5 МВт

В конце 60-х годов возникла потребность в дальней связи с атомными подводными лодками, находящимися под водой в любой точке мирового океана. Несущая частота должна быть достаточно низкой, чтобы ЕМ-поле не затухло на глубине подводной лодки (до 100м). В России была выбрана частота 82 Гц и установка мощностью 5МВт с питающей горизонтальной линией длиной 60 км под кодовым названием «Зевс» была сооружена на Мурманском блоке Кольского полуострова. (Аналогичная американская установка работала в районе Великих озер на частоте 76 Гц). Геофизики стали использовать излучение «Зевса» в 1980-ые. Абдулхай Азымович был еще полностью загружен работами по зондированию с МГД, но в 1990 были проведены последние пуски МГД и после них он активно включился в работы с «Зевсом». Начиная с 1991 он ежегодно выезжает в поле, совершенствуя аппаратуру и методику наблюдений, получает новые уникальные результаты: профили до юга Карелии и Финляндии, зондирования на нефтяных структурах Западной Сибири на расстоянии 2100 км, регистрация сигналов «Зевс» в Китае на расстоянии 5000-7000 км.

Тензорное зондирование «Феникс»

В этом варианте используется две длинные взаимно перпендикулярные заземленные линии, в которые подается со специально разработанного генератора мощностью 200 КВт два сигнала, синусоидальные с фиксированными частотами и с заданной поляризацией, линейной или круговой, или импульсные. Такой источник, в отличие от одной линии или диполя, позволяет получить тензоры (импеданса, магнитные), и изучать

параметры анизотропии и неоднородности. Методика и полученные результаты описаны в работе (Жамалетдинов и др., 2009).

Кольская сверхглубокая скважина СГ-3

Статью (Жамалетдинов, 2020) Абдулхай Азымович прислал мне с Новогодним поздравлением 31.12.2020. Приведу из неё 2 смонтированных рисунка с очень кратким описанием.

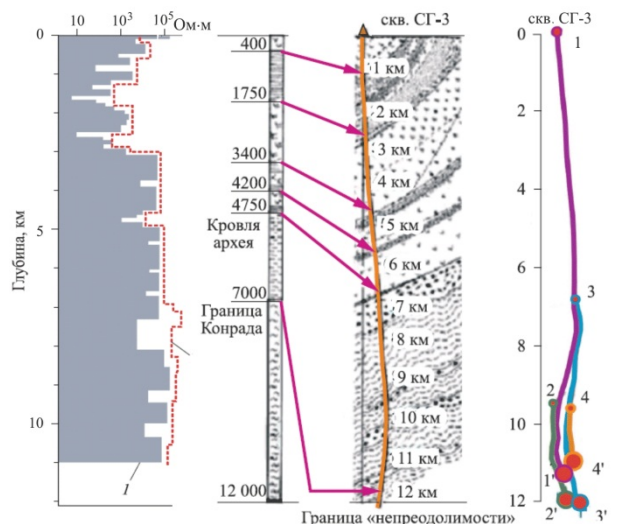


Рисунок 1. Вертикальные разрезы вдоль оси скважины. Слева направо: 1. Продольное (сплошная заливка) и поперечное (пунктир) сопротивления по данным бокового каротажа. 2. Геологические границы, предсказанные геофизиками до бурения. 3. – полученные при бурении. 4. Драматическая история бурения: Сначала пробурили до глубины 11662 м (ствол 1) и нижняя часть оборудования оборвалась. Новое бурение (2) от 9378 до 12065 м. Бурение 3 от 7010 до максимальной глубины **12262** м. Проектная глубина 15 км оказалась недостижимой.

Выводы

1. В работах А.А.Жамалетдинова были разработаны методики интерпретации комплекса наблюдений с естественными и искусственными источниками, позволяющие по новому «увидеть» объект исследования. Этот опыт необходимо сохранить, обобщить, усовершенствовать и использовать.

2. При проведении современных синхронных многоточечных проектов МТЗ-МВП типа СМОЛЕНСК (Россия) или EMScore (США) целесообразно их дополнять тензорным зондированием типа Феникс с искусственными источниками поля, что несомненно повысит информативность и достоверность результатов всего комплекса работ.

Литература (не полная)

Велихов ЕП, Жамалетдинов АА, Токарев АН, Асминг ВЭ, Шевцов АН, Гуревич АЕ, Ковалевский ВА, Мержеевский ВА, Тетерин ВП, Байсарович МН, Ингеров АИ, Попов ВМ, Ваньян ЛЛ, Рокитянский ИИ, Сапужак ЯС, 1989 Эксперимент «Волга» по глубинному зондированию земной коры с использованием линии электропередачи постоянного тока. ДАН СССР, **307**, № 5, с 1077-1081.

Жамалетдинов АА, Захарова ВИ, Павловский ВИ, Рокитянский АИ, Рокитянский ИИ, Токарев АД, 1979 Опыт частотных зондирований на полуострове Рыбачьем. Геофиз. журн. АН УССР, № 3, с 73-77.

Жамалетдинов АА, 1990 Модель электропроводности литосферы по результатам исследований с контролируемыми источниками поля (Балтийский щит, Русская платформа). Л: Наука, 159 с.

Жамалетдинов АА и др., 2009 Международный эксперимент FENICS по тензорному частотному электромагнитному зондированию литосферы... ДАН, **427**, №3, с 388-393.

Жамалетдинов АА, 2011 О флюидной природе промежуточных проводящих слоев в земной коре по результатам электромагнитных зондирований и каротажа сверхглубоких скважин. Физика Земли, № 1. с 1–11.

Жамалетдинов АА, 2020 Кольская сверхглубокая скважина СГ-3 – 50 лет. Геофизические процессы и биосфера № 4, с 94–116. <https://doi.org/10.21455/GPB2020.4-7>

Рокитянский ИИ, 1970 Исследование глубинной электропроводности. Геофиз. сб. АН УССР, № 38, с 102-106.

Рокитянский ИИ, Жамалетдинов АА, Кулик СН, Павловский ВН, Таначев ГС, 1980 Аномалия короткопериодных геомагнитных вариаций над структурой Имандра-Варзуга (Кольский полуостров). Геофиз. журн. АН УССР, № 1, с 91-96.

Рокитянский ИИ, Шуман ВН, Логвинов ИМ, Лысенко ЕС, Павловский ВИ, Жамалетдинов АА, Токарев АД, Захарова ВИ, 1983 Частотные зондирования над Кировоградской аномалией проводимости. Геофиз. журн. АН УССР, № 2, с 88-90.

Backus GE, Gilbert JF, 1967 Numerical applications of a formalism for geophysical inverse problem. Geophys J Roy Astronom Soc, **13**, p 247—276.

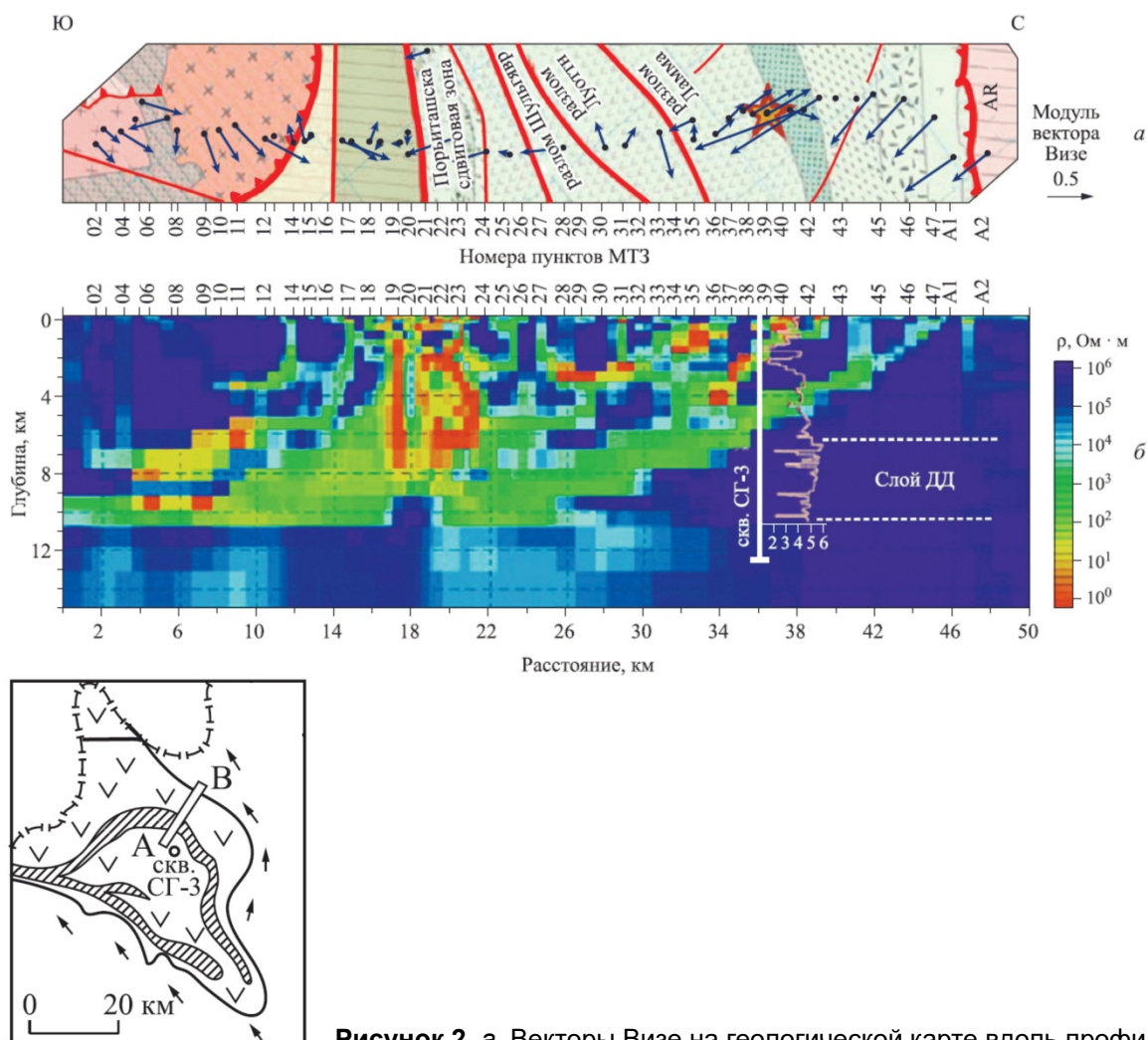


Рисунок 2. а. Векторы Визе на геологической карте вдоль профиля В-А (см. рисунок слева) от АR до скв. СГ-3 (внутри звезды) с продолжением на ЮЮЗ.
 б. Разрез по данным МТЗ (Litvinenko et al., 2014). Слой ДД – дилатантно-диффузионный слой из проводящих прослоек повышенной проводимости порядка 1 См почти повсеместно встречается на Балтийском щите (Жамалетдинов, 2020).
 Рисунок слева. Положение скважины относительно электроннопроводящих сульфидно-графитистых структур (косая штриховка) Печенги.

Граница непроходимости на глубине 12 км (рисунок 1) подразумевает механическую непроходимость при бурении и непроходимость для постоянного тока, установленную при выполнении проекта «Мурман-2018». Жамалетдинов (2020) объясняет это уменьшением пористости, уменьшением содержания флюидов и упрочением пород на этой глубине.