
ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ОСНОВАН В 2004 г.
ВЫХОДИТ 4 РАЗА В ГОД

АПРЕЛЬ № 2 2025 ИЮНЬ

УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

академик РАН М.И. Эпов

Ответственный секретарь

канд. физ.-мат. наук А.А. Дучков

Члены редколлегии:

д-р физ.-мат. наук *Ю.П. Ампилов*, д-р физ.-мат. наук *И.О. Баяк*, д-р физ.-мат. наук *М.Л. Владов*,
д-р геол.-мин. наук *А.Ф. Глебов*, чл.-к. РАН, д-р физ.-мат. наук *В.Н. Глинских*, д-р техн. наук
Г.Н. Гогоненков, д-р физ.-мат. наук *М.С. Денисов*, д-р техн. наук *И.Н. Ельцов*, д-р техн. наук
А.Ф. Еманов, д-р техн. наук *А.П. Жуков*, д-р техн. наук *Ю.И. Колесников*, чл.-к. РАН, д-р геол.-мин.
наук *В.А. Конторович*, чл.-к. РАН, д-р геол.-мин. наук *Ю.И. Кулаков*, д-р техн. наук *Э.Е. Лукьянов*,
чл.-к. РАН, д-р физ.-мат. наук *П.С. Мартышко*, д-р физ.-мат. наук *Г.М. Митрофанов*, чл.-к. РАН,
д-р физ.-мат. наук *И.Б. Петров*, д-р геол.-мин. наук *Е.В. Поспеева*, д-р геол.-мин. наук *В.С. Селезнев*,
д-р геол.-мин. наук *В.Д. Суворов*, д-р техн. наук *А.П. Сысоев*, д-р техн. наук *Г.М. Тригубович*,
д-р физ.-мат. наук *В.А. Чеверда*, д-р техн. наук *Г.А. Шехтман*

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Основан в 2004	Периодичность 4 раза в год	№ 2	Апрель–июнь 2025
----------------	-------------------------------	-----	---------------------

СОДЕРЖАНИЕ

Денисов М.С., Зыков А.А. Использование гармоник для расширения спектра коррелограмм и разрезов в вибрационной сейсморазведке	4
Пономарева Е.В. Оценка плотности эффективного палеотеплового потока в пределах Мансийской синеклизы	26
Голубева М.С., Горевачев Н.А., Митрофанов Г.М. Влияние неоднородностей верхней части разреза на амплитуду сейсмического сигнала и точность акустической инверсии	37
Лапковский В.В., Шелудько В.И. Формальные критерии качества автоматической корреляции разрезов скважин	51
Ступина Т.А., Бушенкова Н.А. Оценка мощности земной коры центральной Камчатки по данным временных и постоянных сейсмических станций	60

RUSSIAN JOURNAL OF GEOPHYSICAL TECHNOLOGIES

Founded in 2004	Quarterly	No 2	April–June 2025
-----------------	-----------	------	--------------------

CONTENTS

Denisov M.S., Zykov A.A. Utilization of harmonics for correlogram and stack spectrum broadening in vibroseis	4
Ponomareva E.V. Estimation of the effective paleo heat flow density within the Mansi syncline	26
Golubeva M.S., Goreyavchev N.A., Mitrofanov G.M. Effect of near surface heterogeneities on seismic signal amplitude and the accuracy of acoustic inversion	37
Lapkovsky V.V., Sheludko V.I. Formal quality criteria for automatic correlation of well logs	51
Stupina T.A., Bushenkova N.A. Estimation of the Earth's crustal thickness of central Kamchatka according to temporary and permanent seismic stations	60



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАРМОНИК ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ СПЕКТРА КОРРЕЛОГРАММ И РАЗРЕЗОВ В ВИБРАЦИОННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ

Михаил Сергеевич Денисов^{1,✉}, Андрей Александрович Зыков²

^{1,2}ООО «ГЕОЛАБ», 119071, Москва, ул. Орджоникидзе, 12/4, Россия

¹denisovms@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-1532-8457>

²zyrokin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3458-3577>

Аннотация. Введенный ранее алгоритм оптимизационной рекурсивной фильтрации позволяет разделять сигнал и гармоники на записях невзрывной сейсморазведки. Это открывает возможность построения коррелограмм или разрезов как по основному свип-сигналу, так и по его гармоникам различного порядка. Оказалось, что накапливание результатов в перекрывающихся диапазонах частот не только не имеет смысла, но и может привести к появлению специфических артефактов. Производится построение коррелограмм и разрезов в неперекрывающихся частотных диапазонах с последующей их сшивкой при помощи методики аналитического продолжения спектра.

Ключевые слова: вибросейс, гармоники, авторегрессия, импульс

Для цитирования: Денисов М.С., Зыков А.А. Использование гармоник для расширения спектра коррелограмм и разрезов в вибрационной сейсморазведке // Геофизические технологии. 2025. № 2. С. 4–25. doi:10.18303/2619-1563-2025-2-4.

UTILIZATION OF HARMONICS FOR CORRELOGRAM AND STACK SPECTRUM BROADENING IN VIBROSEIS

Mikhail S. Denisov^{1,✉}, Andrey A. Zykov²

^{1,2}GEOLAB Ltd, Ordzhonikidze Str., 12/4, Moscow, 119071, Russia,

¹denisovms@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-1532-8457>

²zyrokin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3458-3577>

Abstract. The previously introduced algorithm of optimization recursive filtering allows separation of the signal and the harmonics in non-explosive seismic data. This opens up the possibility of separately constructing correlograms or stacks based on the main sweep signal and its harmonics of different orders. It turned out that summation of results in overlapping frequency ranges not only does not make sense, but can also lead to the appearance of specific artifacts. Correlograms and sections are constructed in non-overlapping frequency ranges with their subsequent stitching using the analytical spectrum extrapolation technique.

Keywords: vibroseis, harmonics, autoregression, wavelet

For citation: Denisov M.S., Zykov A.A. Utilization of harmonics for correlogram and stack spectrum broadening in vibroseis // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2025. No. 2. P. 4–25. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2025-2-4.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее исследование продолжает цикл работ, инициированный М.Б. Шнеерсоном. Статьи, входящие в этот цикл, посвящены различным аспектам проблемы гармоник в невзрывной

сейсморазведке. В первую очередь, возможности использования гармоник для расширения спектра сигнала. В работе [Денисов, Зыков, 2023б] на модельных и реальных данных был опробован алгоритм, позволяющий отделить сигнал от гармоник, а также разделить поля гармоник различного порядка. При этом возбуждаемый свип-сигнал может иметь нелинейную частотную модуляцию, а также амплитудную модуляцию. На следующем этапе производится построение коррелограмм и разрезов отдельно по основному сигналу и по гармоникам. В результате такой обработки геофизик получает и совместно интерпретирует набор разрезов, отличающихся шириной спектра импульса и разрешенностью. Открытым остался вопрос об оптимальном суммировании разрезов с целью получения единого волнового поля, характеризуемого максимально расширенным спектром. Казалось бы, для всего расширенного частотного диапазона имеет смысл накапливать разрезы с целью выделения сигнала и ослабления шума. Например, в диапазоне частот возбуждения основного свипа (он же – первая гармоника) можно к полученному по нему разрезу добавить разрез второй гармоники, тем самым синфазно накопить сигнал, ослабив при этом нерегулярную помеху. Однако, как показало недавнее исследование [Денисов, 2024], такое накопление не имеет смысла, а разрезы гармоник различного порядка в перекрывающихся частотных диапазонах совпадают. В том числе, реализация помехи оказывается одинаковой, что лишает смысла накопление. В настоящей работе нам предстоит ответить на вопрос о том, какой способ построения единого разреза оказывается предпочтительным.

Достаточно полный обзор литературы, посвященной проблеме разделения сигнала и гармоник с возможным последующим использованием последних, приведен в статье [Denisov et al., 2021], а в работе [Денисов, 2024] он дополнен свежими публикациями, в которых предлагается не просто устранять гармоники, а извлекать содержащуюся в них полезную информацию.

МОДЕЛЬ

Введенная ранее модель дискретного вибросейсмического сигнала $q(t)$ [Денисов, Егоров, 2019а] записывается в виде

$$q(t) = \sum_{m=1}^M a_m(t) * q_m(t), \quad (1)$$

где $q_m(t)$ – гармоника m -го порядка, $a_m(t)$ – фильтры, M – общее число гармоник, t – индекс дискретного времени. Звездочка обозначает свертку. Фактически выражение (1) описывает разложение сигнала $q(t)$ по системе базисных функций. Функцию $q_1(t)$ называем сигналом основного тона, опорным свипом или первой гармоникой, при этом $a_1(t) \equiv \delta(t)$ – дискретная дельта-функция. Основной свип может характеризоваться нелинейной частотной модуляцией (НЛЧМ), а также совместно амплитудной и нелинейной частотной модуляцией (АНЛЧМ). Методика расчета гармоник m -го порядка по АНЛЧМ свип-сигналу предложена в работе [Денисов, Зыков, 2023а].

Гармоники имеют более широкую, чем у опорного свипа, спектральную характеристику. Если сигнал основного тона возбуждается в пределах частотного диапазона $\omega \in (\omega_1, \omega_2)$, где ω – циклическая частота, то m -я гармоника занимает диапазон частот $(m\omega_1, m\omega_2)$. Пусть, например, опорный свип имеет верхнюю частоту 90 Гц, тогда верхняя частота второй гармоники равна 180 Гц, что теоретически позволяет

расширить спектр сигнала, насытив его высокими частотами до этого значения. Для описания исходной виброграммы $v(t)$ используем традиционную статистическую сверточную модель

$$v(t) = r(t) * p(t) * q(t), \quad (2)$$

где $r(t)$ – последовательность коэффициентов отражения, $p(t)$ – оператор, описывающий влияние на сигнал эффектов при прохождении им верхней части разреза (ВЧР), где поглощающие свойства среды могут приводить к ослаблению высокочастотных компонент импульса. Считаем, что $r(t)$ является реализацией случайного процесса типа белого шума. Этот процесс нестационарный, его дисперсия уменьшается с ростом t , что обусловлено эффектом геометрического расхождения.

Переход к коррелограмме $z_1(t)$ осуществляется при помощи корреляции функций $v(t)$ и $q_1(t)$. Или, что то же самое, – свертки с оператором, заданным в обращенном времени,

$$z_1(t) = v(t) * q_1(-t). \quad (3)$$

В последнем выражении использование в условном обозначении коррелограммы нижнего индекса 1 подчеркивает, что она может быть получена не только в результате корреляции по первой гармонике.

АЛГОРИТМ РАЗДЕЛЕНИЯ ГАРМОНИК

Предложенный в работе [Денисов, Егоров, 2019б] алгоритм, получивший название оптимизационной рекурсивной фильтрации (ОРФ), позволяет отделить ЛЧМ сигнал основного свипа от гармоник, а также отделить друг от друга гармоники различных порядков. Позже этот алгоритм был обобщен на случай АНЛЧМ сигналов [Денисов, Зыков, 2023б]. Реализуется следующая последовательность вычислительных процедур.

1. Переход к коррелограмме от виброграммы путем корреляции последней с сигналом первой гармоники.
2. Прогнозирование гармоник с последующим их адаптивным вычитанием. В результате будет получена коррелограмма, связанная только с основным свипом.
3. Преобразование посчитанной на предыдущем шаге коррелограммы в виброграмму, связанную только с основным свипом (назовем такую процедуру *декорреляцией*, а ее особенности изучим ниже).
4. Вычитание посчитанной виброграммы основного свипа из исходной виброграммы. В результате получим виброграмму, связанную только с гармониками. Повторяя описанные вычисления, можно разделить эту виброграмму на виброграммы, связанные с каждой гармоникой.
5. Корреляция виброграмм гармоник с соответствующими им свипами. По полученным коррелограммам реализуется построение разрезов или к ним применяется миграция до суммирования.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На основании имеющегося в распоряжении набора коррелограмм (или полученных по ним разрезов) гармоник различных порядков требуется построить единую коррелограмму (или разрез), характеризующую расширенным за счет использования энергии гармоник спектром импульса.

СЛОЖНОСТИ КОРРЕКЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО РАСХОЖДЕНИЯ

Исходные полевые виброграммы всегда характеризуются ослаблением амплитуды сигнала за счет эффекта геометрического расхождения. Как правило, его компенсация производится путем умножения сейсмической записи на гладкую возрастающую степенную функцию t^α , где α – параметр, задаваемый пользователем. Понятно, что такая обработка имеет смысл только для импульса минимальной протяженности, когда на всей своей длине он умножается на одно число, т. е. в идеальном случае импульс должен быть дискретной дельта-функцией. Иначе нарушается стационарная сверточная модель (2), а сигнал становится переменным по временной оси. На виброграмме вместо коротких сфокусированных импульсов наблюдаются протяженные сигналы, поэтому компенсировать по ней расхождение некорректно. Обычно эту процедуру применяют к коррелограмме, однако в нашем случае такой подход тоже неприменим. Дело в том, что при традиционной обработке, когда игнорируется наличие гармоник, при коррекции расхождения восстанавливаются амплитуды сфокусированных после корреляции импульсов Клаудера. Наличие в данных гармоник означает, что в результате корреляции с основным свипом на фоне импульсов Клаудера (они же – автокорреляционные функции (АКФ) первой гармоники) также будут получены функции взаимной корреляции (ФВК) старших гармоник с первой. (В данной ситуации имеются в виду АКФ и ФВК, введенные для детерминированных сигналов [Гоноровский, 1977].) Как показано в работе [Денисов, Шнеерсон, 2017], если основной свип является ЛЧМ сигналом, то с некоторыми несущественными допущениями эти ФВК можно считать протяженными ЛЧМ сигналами. Таким образом, на коррелограмме имеются протяженные сигналы, поэтому компенсировать расхождение, умножая на возрастающую функцию, некорректно. Итак, мы не имеем возможности компенсировать расхождение ни по виброграмме, ни по коррелограмме. Такая возможность появится только после разделения сигнала и гармоник, когда будут получены коррелограммы отдельно по каждой гармонике, на которых не будут наблюдаться эффекты интерференции гармоник различных порядков.

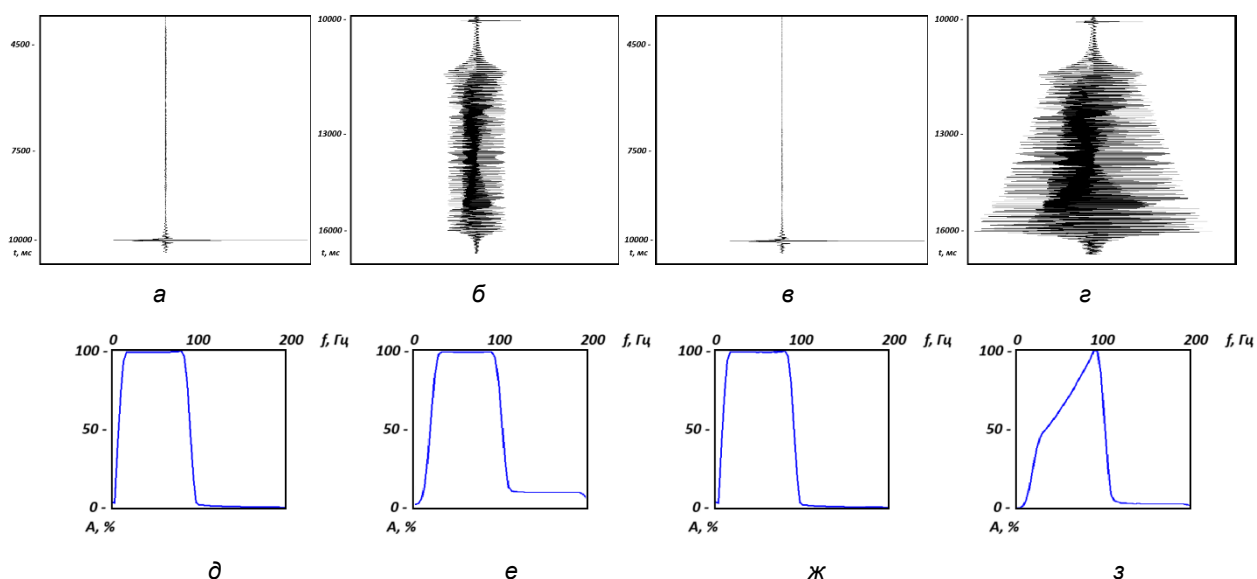


Рис. 1. Взаимное расположения АКФ и ФВК гармоник, а также особенности, связанные с коррекцией геометрического расхождения по коррелограмме; а – коррелограмма по первой гармонике; б – коррелограмма по второй гармонике; в – коррекция расхождения, примененная к коррелограмме по первой гармонике; г – коррекция расхождения, примененная к коррелограмме по второй гармонике; д – амплитудный спектр сигнала, показанного на рис. 1, а; е – амплитудный спектр сигнала, показанного на рис. 1, б; ж – амплитудный спектр сигнала, показанного на рис. 1, в; з – амплитудный спектр сигнала, показанного на рис. 1, г.

Иная ситуация возникает, если применяется корреляция по второй гармонике. На коррелограмме наблюдаем сфокусированный импульс АКФ второй гармоники и на его фоне ЛЧМ сигнал ФВК первой и второй гармоник, который на временной оси следует за АКФ (рис. 1, б). Амплитудный спектр такого сигнала представлен на рис. 1, е. Применение коррекции геометрического расхождения значительно искажает как саму коррелограмму (рис. 1, з), так и ее спектральную характеристику (рис. 1, з). Так как у ЛЧМ сигнала высокочастотная часть расположена в его хвосте, и именно там функция коррекции расхождения достигает своего максимального значения, спектр оказывается перегруженным высокочастотными компонентами. (На рисунке 1, а и б показаны разные временные интервалы, так как импульс АКФ первой и второй гармоник фокусируется на одном и том же времени 10 с, а их артефакты расположены по разные стороны этого импульса.)

Итак, к каким проблемам приводит невозможность корректной компенсации геометрического расхождения? При традиционной методике обработки вибросейсмических данных (если не иметь в виду технологию slip-sweeper), когда корреляция применяется до этапа коррекции расхождения, артефакты, связанные с гармониками, предшествуют сфокусированному сигналу, как это показано на рис. 1, а. Иначе говоря, в интерференционной записи помеха от слабого сигнала (ослабленного за счет геометрического расхождения) накладывается на сильный сигнал и на его фоне почти незаметна. После этого можно корректировать затухание амплитуд за счет расхождения. Проблема возникает, когда требуется выделить гармоники, для чего применяется корреляция по сигналу гармоники старшего порядка (шаг 5). Артефакт от сильного сигнала (в нашем случае, как будет показано ниже, обусловлен неточностью удаления первой гармоники на шаге 4) расположен в его хвостовой части (рис. 1, б), т. е. в интерференционной записи наложится на слабые импульсы, маскируя их.

ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ ЕДИНОЙ КОРРЕЛОГРАММЫ (РАЗРЕЗА)

В работе [Денисов, 2024] утверждается, что в перекрывающихся диапазонах частот коррелограммы разных гармоник, получаемые при помощи ОРФ, совпадают. Например, если получить трассу первой и второй гармоник, они окажутся тождественными в диапазоне частот $(2\omega_1, \omega_2)$. Поэтому, казалось бы, коррелограмму или разрез можно получать сразу по второй гармонике в расширенном диапазоне частот, добавив затем в него низкие частоты $(\omega_1, 2\omega_1)$ от первой гармоники. При практической реализации такой процедуры мы столкнулись с эффектом появления артефактов, который необходимо было объяснить.

Выяснилось, что посчитанная на шаге 3 виброграмма неточно вычитается из исходной виброграммы, и в получаемом результате все еще остается достаточно энергии первой гармоники, в то время как ее там быть уже не должно. Этот эффект демонстрируется на рис. 2, где в качестве свипа использован тот же ЛЧМ сигнал, что и на рис. 1. Последовательность коэффициентов отражения является реализацией пуассоновского потока импульсов с гауссовским распределением амплитуд. Волновое поле представлено в виде фрагмента разреза, смоделированного путем копирования одной синтетической трассы коррелограммы. Фрагменты записей, полученных в результате разделения гармоник по методу ОРФ, изображены на рис. 2, а и б, а амплитудные спектры полных трасс на рис. 2, в и г соответственно. Показан именно фрагмент, что связано со сложностью визуализации протяженных осциллирующих функций. На спектральной характеристике трассы второй гармоники выделяются компоненты, связанные с граничными частотами свипа первой гармоники: 10 Гц (рис. 2, д, где изображен амплитудный спектр

фрагмента разреза) и 100 Гц (рис. 2, з). К объяснению этого явления мы вернемся позже. Модель импульсной трассы была посчитана с учетом нестационарности, связанной с затуханием амплитуд, обусловленным геометрическим расхождением. После получения коррелограмм первой и второй гармоник затухание амплитуд было скомпенсировано. Очевидно, что волновое поле второй гармоники содержит интенсивные артефакты. Если бы мы имели дело со стационарной трассой, то этот эффект был бы едва заметен.

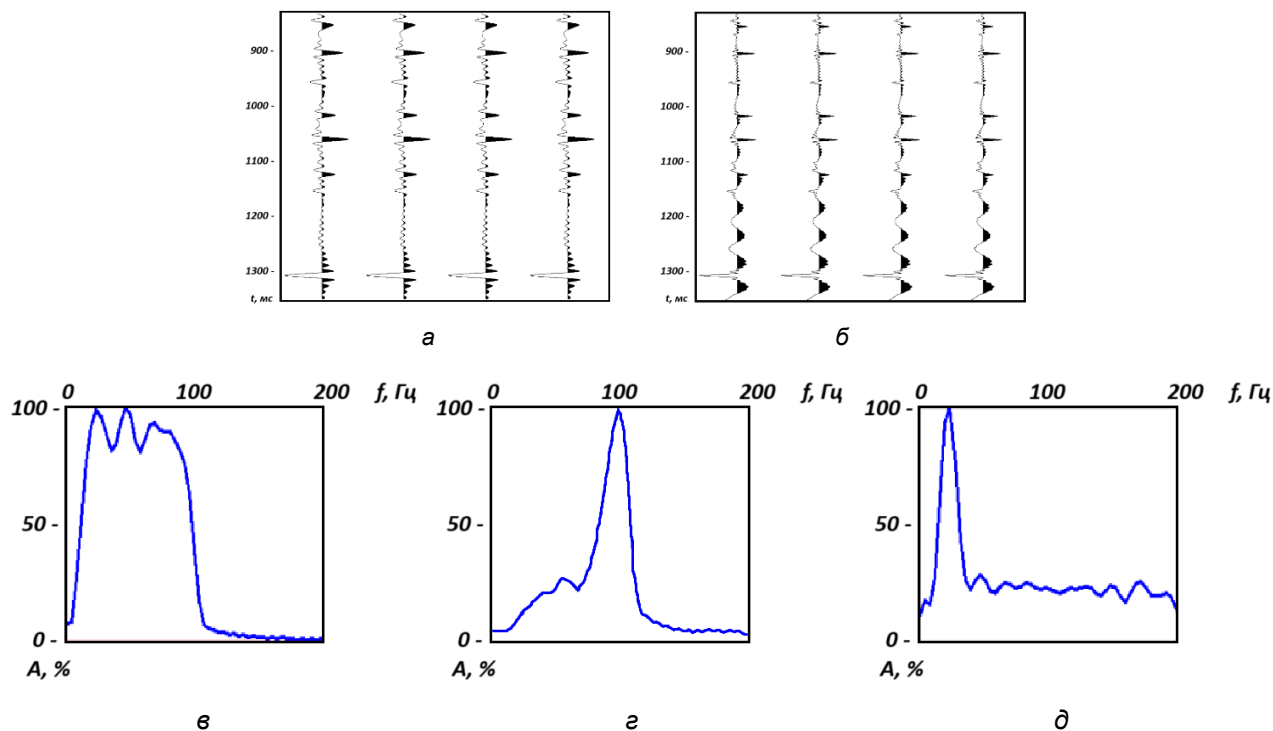


Рис. 2. Артефакты, связанные с неточностью вычитания виброграммы первой гармоники из исходной виброграммы; а – фрагмент модельного разреза первой гармоники; б – фрагмент модельного разреза второй гармоники; в – амплитудный спектр разреза, измеренный по полной длине трассы на рис. 2, а; з – амплитудный спектр разреза, измеренный по полной длине трассы на рис. 2, б; д – амплитудный спектр разреза, измеренный по фрагменту, показанному на рис. 2, б.

В реальных данных всегда присутствует геометрическое расхождение, поэтому импульсная трасса оказывается нестационарной, и обработчику приходится расхождение компенсировать, тем самым усиливая артефакты. Иными словами, после удаления из исходной виброграммы первой гармоники и корреляции полученного результата по второй гармонике появляется протяженный артефакт в виде ФВК остатка первой гармоники со второй гармоникой. Как мы видели на рис. 1, б, эта ФВК расположена в хвосте сигнала, тем самым на коррелограмме она накладывается на слабые отражения. Высокочастотная часть артефакта смещается на большие времена коррелограммы, а низкочастотная часть локализована на малых временах. Коррекция геометрического расхождения усиливает амплитуду записи на больших временах, поэтому в спектре трассы начинают доминировать высокочастотные компоненты (рис. 2, з), и это мы уже наблюдали на рис. 1, з и 3. Спектр оценивался в интервале 8–10 с. Если же в качестве окна спектрального оценивания выбрать верхнюю часть трассы (0–2 с), то в АЧХ этого фрагмента будет доминировать низкая частота, обусловленная артефактом (рис. 2, д). Нам, однако, нужно ответить на вопрос, с чем связано появление артефакта. Сам собой напрашивающийся ответ, что он обусловлен неточностью прогнозирования модели помехи или адаптивного вычитания этой модели (шаг 2)

оказывается неверным. Как показали результаты экспериментов, даже если не прибегать к процедуре адаптивного оценивания и вычитания, а выбрать истинные значения фильтров $a_m(t)$, что исключает эффект недочитания или перевычитания, артефакт все равно появится.

После тщательного исследования мы пришли к заключению, что описанное явление связано с необратимостью корреляции. Иначе говоря, последовательное применение к некоторому импульсу, сосредоточенному в диапазоне частот основного свипа, процедур корреляции и декорреляции по основному свипу не приведет к получению исходного импульса. Здесь уместно расшифровать введенный выше термин. Под декорреляцией для ЛЧМ сигнала мы понимаем свертку с этим сигналом. В самом деле, предполагается, что ЛЧМ сигнал имеет равную единице равномерную в заданном диапазоне частот амплитудно-частотную характеристику (АЧХ). Поэтому свертка с ним устранил фазо-частотную характеристику (ФЧХ), которую импульс приобрел при корреляции с ЛЧМ сигналом, а амплитудный спектр импульса в результате корреляции и декорреляции дважды умножится на единицу, не претерпев изменений.

Однако, как мы это видели на результатах обработки на рис. 2, такая логика не вполне соответствует экспериментальным данным. Мы объясняем это тем, что на самом деле использованные нами ЛЧМ сигналы имеют неравномерную АЧХ. Действительно, вывод АЧХ ЛЧМ сигнала [Вакман, 1965; Гольдин, 1974; Гоноровский, 1977] производится для непрерывных, а не для дискретных сигналов (в указанных источниках предложены различные способы вывода). К тому же, результат является асимптотическим, а именно, он получен в предположении, что глубина фазовой модуляции намного больше единицы. Если обозначить через $Q_1(\omega)$ спектр функции $q_1(t)$, то описанная особенность записывается как $Q_1(\omega)\bar{Q}_1(\omega) \neq 1$ при $\omega \in (\omega_1, \omega_2)$, где горизонтальная черта над буквой обозначает комплексное сопряжение. Причина, почему неравномерность АЧХ имеет наибольшую интенсивность на краях частотного диапазона, поясняется в книге [Баскаков, 2000].

Рассуждения иллюстрируются модельным примером. Результат применения к дискретной дельта-функции процедур корреляции и декорреляции с ЛЧМ свип-сигналом, заданным в диапазоне частот 10–100 Гц и имеющим длительность 10 с, показан на рис. 3, б. Ожидалось, что полученный сигнал будет совпадать с оператором полосовой фильтрации, который изображен на рис. 3, а, однако это не так. Была посчитана разность между сигналом на рис. 3, а и полосовым фильтром, она представлена на рис. 3, в. На рисунке 3, г–е показаны соответствующие амплитудные спектры. Общий уровень энергии разности составляет примерно 2 % энергии исходного импульса. Как следует из рисунка, осложнения, связанные с необратимостью оператора корреляции, сказываются, в первую очередь, на краях его частотной характеристики. Однако и в пределах рабочего диапазона частот наблюдается отличие реального от предполагаемого сигнала. Можно утверждать, что такие отличия, включая артефакты на краях частотного диапазона, невелики, и это действительно так. Они становятся заметными после применения процедуры коррекции расхождения, когда, поднимая амплитуды сигналов на больших временах регистрации, мы вместе с сигналами усилим наложенные на них артефакты, связанные с интенсивными отражениями в верхней части разреза.

В результате сравнения рис. 3, г и д может создаться впечатление, что проблема заключается в краевых осцилляциях АЧХ, которые обычно связывают с эффектом Гиббса [Хемминг, 1980], и это отчасти верно. Известно, что они обусловлены усечением фильтра во временной области. При этом увеличение длины фильтра слабо сказывается на интенсивности осцилляций, которые, медленно затухая,

концентрируются ближе к области разрыва АЧХ. Для ослабления эффекта Гиббса обычно используют весовые окна, их применение приводит к сглаживанию АЧХ. Это, однако, в нашей задаче приводит к необходимости применения деконволюции, так как после разделения сигнала и гармоник на коррелограмме потребуется обратный переход к виброграмме, что приведет к необходимости коррекции записи за влияние ранее примененной фильтрации с оператором, имеющим неравномерную АЧХ.

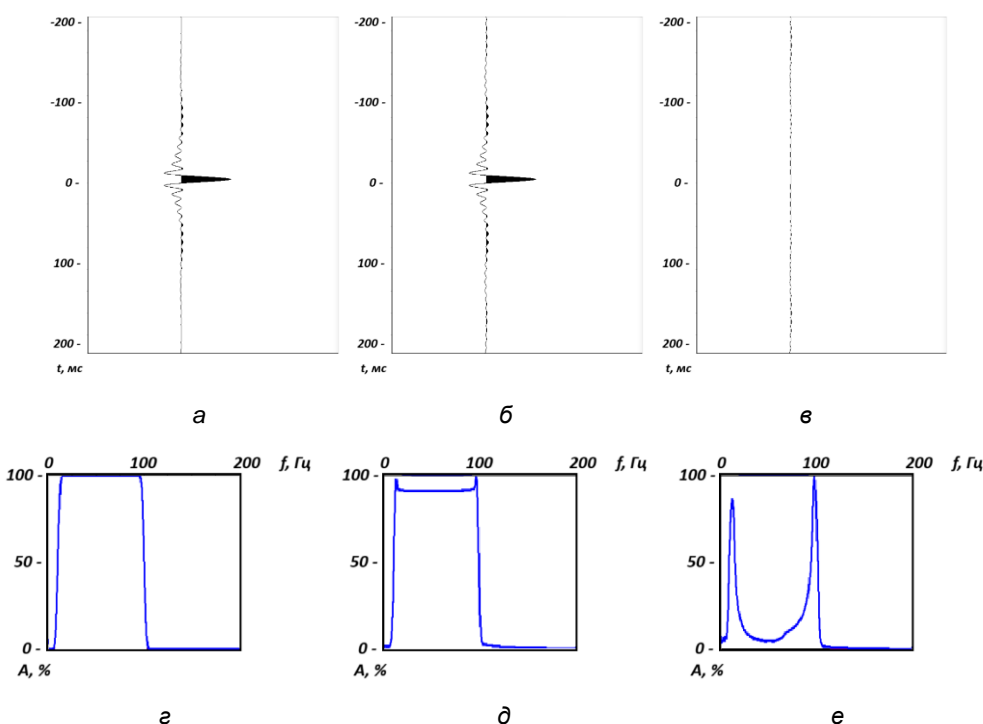


Рис. 3. Результат применения корреляции и декорреляции к дельта-функции; а – идеальный полосовой фильтр; б – полученный сигнал; в – разность между полученным и идеальным сигналами; г – амплитудный спектр полосового фильтра; д – амплитудный спектр полученного сигнала; е – амплитудный спектр разности, нормированный по уровню к спектру сигнала.

С учетом вышесказанного было принято решение реализовать декорреляцию в виде идеальной обратной цифровой фильтрации, что, в том числе, должно позволить устранить неточности, связанные с переходом от непрерывных к дискретным сигналам, а также погрешности асимптотических допущений. Был построен фильтр с частотной характеристикой $1/\bar{Q}_1(\omega)$. Ожидается, что последовательное применение корреляции и декорреляции соответственно с операторами, имеющими частотные характеристики $\bar{Q}_1(\omega)$ и $1/\bar{Q}_1(\omega)$, приведет к более уверенному восстановлению исходного импульса. Однако, как оказалось, хотя погрешность снижается по сравнению с предыдущим подходом (рис. 4 – энергия разности между идеальным полосовым фильтром и результатом корреляции и деконволюции примерно в два раза меньше энергии разности между идеальным полосовым фильтром и результатом корреляции и свертки), эта методика также не обеспечивает требуемого результата. Проблема связана с ограниченностью диапазона частот свипа. Финитного идеального обратного к нему фильтра не существует. Требуется использовать регуляризацию, что искажает решение, в первую очередь, в окрестности граничных частот сигнального диапазона. Если в качестве опорного свипа использован АНЛЧМ сигнал, то возврат от коррелограммы к виброграмме возможен только при помощи деконволюции.

Понятно, что на этом пути мы столкнемся с теми же проблемами. Таким образом, обеспечение обратимости корреляции представляет собой задачу повышенной сложности.

В процессе развития алгоритма ОРФ нам не приходилось преодолевать подобные трудности, так как не было необходимости последовательного применения корреляции и декорреляции. Когда перед нами стоит задача устранения гармонических искажений сигнала, достаточно перейти от виброграммы к коррелограмме, обработка которой позволяет удалить энергию гармоник. Обратный переход к виброграмме не производится.

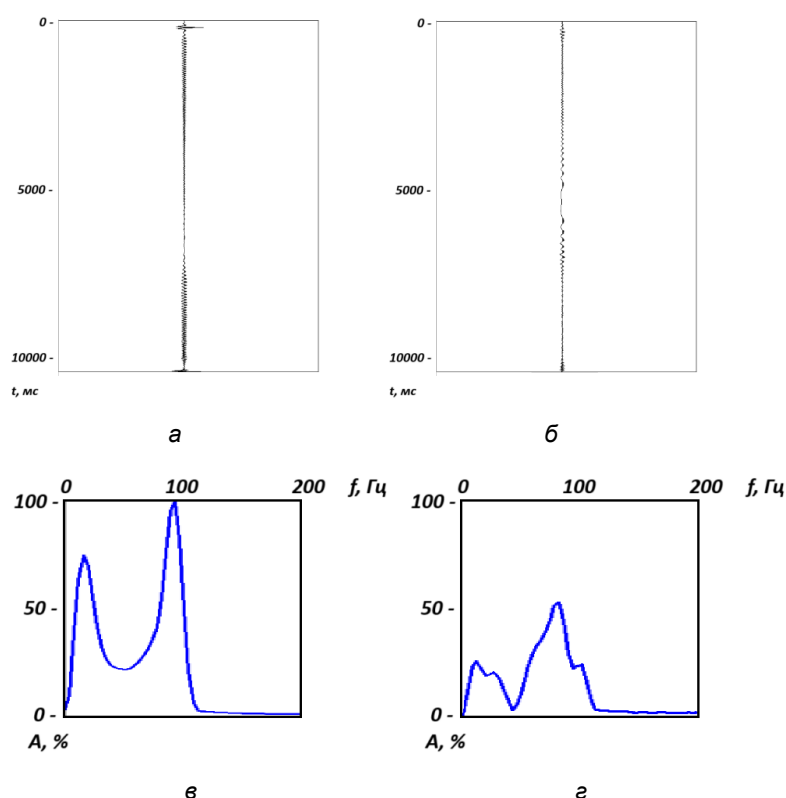


Рис. 4. Разность между идеальным полосовым фильтром и результатом последовательного применения к дискретной дельта-функции процедур корреляции и декорреляции (здесь амплитудные спектры не нормированы на условную единицу, а имеют один и тот же масштаб, что позволяет лучше оценить различие их энергий); а – разность между корреляцией и сверткой со свипом; б – разность между корреляцией и деконволюцией со свипом; в – амплитудный спектр трассы на рис. 4, а; г – амплитудный спектр трассы на рис. 4, б.

ПРОБЛЕМА РАЗДЕЛЕНИЯ СИГНАЛА И ГАРМОНИК НА ВИБРОГРАММЕ

Традиционная реализация алгоритма ОРФ использует оптимизационную процедуру разделения сигнала и гармоник на коррелограммах. Это связано с тем, что при корреляции происходит фокусировка основного свипа, а все артефакты, связанные с гармониками, не интерферируют с ним. Следовательно, появляется возможность использования критерия минимума энергии при адаптивном вычитании. Однако такая реализация требует использования процедур корреляции и декорреляции, которые, как мы видели, искажают интересующее нас поле гармоник. В этой ситуации логично было бы изменить алгоритм так, чтобы избежать применения необратимой процедуры, и разделять сигнал и гармоники непосредственно на виброграмме. Действительно, такая возможность имеется, и она имеет свое теоретическое обоснование.

Нетрудно убедиться в том, что задача адаптивного вычитания одного волнового поля из другого на основании критерия минимума энергии инвариантна относительно линейного преобразования этих полей. Иными словами, если применить к обоим волновым полям свертку с одним и тем же оператором, то оптимальный фильтр адаптации не изменится. В нашем случае, когда настройка оператора производится по коррелограммам, это означает, что то же самое решение может быть получено и по виброграммам. В самом деле, как исходная коррелограмма, так и все коррелограммы спрогнозированных помех, подвергались корреляции с одним и тем же сигналом основного свипа. Тогда алгоритм разделения сигнала и гармоник на виброграмме подразумевает предварительное прогнозирование помех (используются те же самые фильтры, которые применялись к коррелограммам) и их последующее адаптивное вычитание. Методика была нами опробована, однако и такой способ построения волновых полей гармоник старшего порядка приводит к появлению специфических артефактов.

Была смоделирована виброграмма, содержащая помимо основного свипа колебание второй гармоники. В результате отделения свипа от гармоники получены две виброграммы, которые здесь не показаны ввиду малой информативности таких иллюстраций. На рисунке 5 представлены фрагменты построенных по ним коррелограмм. На коррелограмме второй гармоники (рис. 5, б) наблюдается интенсивный протяженный артефакт, похожий на монохромный сигнал. Его видимая частота соответствует верхней частоте возбуждения основного свипа.

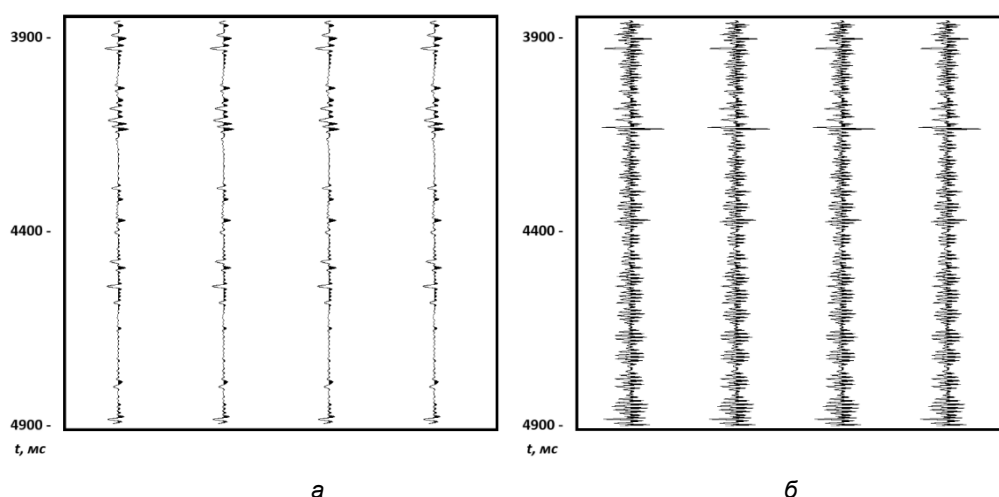


Рис. 5. Фрагменты коррелограмм, полученных после отделения основного свипа от второй гармоники по модельным виброграммам; а – основной сигнал; б – вторая гармоника.

В результате анализа алгоритма и интерпретации волновых полей мы пришли к выводу, что помеха возникает при вычитании полученной виброграммы первой гармоники из исходной виброграммы, когда производится построение виброграммы, связанной только со старшими гармониками. Прогнозирование поля гармоник производится путем корреляции виброграммы с сигналом первой гармоники с последующей сверткой результата с сигналом старшей гармоники. Это означает, что гармоника прогнозируется только в диапазоне частот основного свипа. При вычитании из исходной виброграммы, имеющей расширенный спектр, спрогнозированных компонент, связанных со старшими гармониками, данные вне диапазона частот основного свипа сохраняются в неизменном виде. Если такое волновое поле вычесть из исходной виброграммы, интересующая нас высокочастотная часть поля будет утрачена. Чтобы избежать этого применяется полосовая фильтрация, устраняющая на полученной

виброграмме основного свипа все частоты вне полосы его возбуждения. Полосовой фильтр, имеющий ограниченную крутизну склона частотной характеристики, неспособен полностью устранить энергию, связанную с основным свипом. Кроме того, тот факт, что вибрационный сигнал имеет АЧХ, целиком сосредоточенную в некотором диапазоне частот, как мы видели выше, не соответствует действительности. Поэтому часть его «утекает» и не пропадает после полосовой фильтрации. Этот остаток настолько интенсивен по сравнению со второй гармоникой, что он существенно искажает ее.

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ЕДИНОЙ КОРРЕЛОГРАММЫ (РАЗРЕЗА)

В связи с указанными трудностями нами было принято решение отказаться от описанной выше методики и производить построение трасс в неперекрывающихся частотных диапазонах. Действительно, алгоритм ОРФ использует только линейные преобразования. Это означает, что как сама первая гармоника, так и все связанные с ней артефакты сконцентрированы в пределах частотного диапазона (ω_1, ω_2) . Такое свойство открывает возможность надежно избавиться от артефактов при помощи частотной селекции. Указанный диапазон устраняется из виброграммы второй гармоники, полученной на шаге 4, при помощи полосовой фильтрации. Так как полосовые фильтры не могут обеспечить идеальной частотной селекции (хотя бы в силу ограниченности крутизны склонов их АЧХ), а также ввиду того, что гипотеза об ограниченности частотной характеристики вибрационного сигнала связана с асимптотическими ограничениями, целесообразно выбирать диапазон для удаления первой гармоники из трассы второй гармоники с запасом, устраняя частоты ниже $\omega_2 + \varepsilon$, где ε – параметр, выбираемый в зависимости от качества полосового фильтра. Аналогичные рассуждения применяем для гармоник старших порядков.

Рисунок 6 иллюстрирует необходимость обеспечения зазора (это особенно заметно на больших временах) между частотными диапазонами построения трасс первой (рис. 6, а) и второй (рис. 6, б) гармоник. Их амплитудные спектры представлены на рис. 6, д и е соответственно. К коррелограммам применялся цифровой полосовой фильтр с весовой функцией Хемминга [Хемминг, 1980], длина фильтра 501 отсчет. Если суммировать коррелограммы, не обеспечив ε -зазора частотных характеристик, получим результат, показанный на рис. 6, в. Его спектральная характеристика (рис. 6, ж) содержит выброс на частоте 100 Гц. Этот эффект мы уже наблюдали на рис. 2–4, когда основная энергия артефактов концентрировалась в окрестности частот среза АЧХ ЛЧМ сигнала. Именно поэтому надо выбирать полосу частот пропускания полосового фильтра уже, чем предписывается по теории.

Таким образом, описанная последовательность вычислений приводит к получению двух сейсмических трасс в неперекрывающихся частотных диапазонах. Для их объединения следует заполнить интервал $(\omega_2 - \varepsilon, \omega_2 + \varepsilon)$, в котором энергия сигнала стремится к нулю. Известно множество алгоритмов, позволяющих решить эту задачу, они сводятся к методике аналитического продолжения спектра [Василенко, Тараторин, 1986]. Мы, однако, предпочли методику, которая в полной мере учитывает специфику сейсмической трассы как последовательности импульсов и которая основана на авторегрессионной (АР) модели [Oldenburg et al., 1983; Walker, Ulrych, 1983; Шнеерсон и др., 1990]. Ее суть заключается в следующем. Пусть последовательность коэффициентов отражения $r(t)$ состоит из N импульсов с произвольными неизвестными амплитудами и временами вступления. Можно показать [Марпл, 1990], что ее спектр описывается моделью комплексной авторегрессии-скользящего среднего

(АРСС) порядка N, N : $APCC(N, N)$. Требуется оценить параметры модели, иначе говоря, произвести ее идентификацию. Для упрощения вычислений модель АРСС аппроксимируется моделью АР более высокого порядка. Известно, что экстраполяция спектра вне сигнального диапазона на протяженный частотный интервал – неустойчивая задача. В нашем случае, однако, мы заполняем лишь узкий интервал. К тому же, такое заполнение производится как со стороны низких, так и высоких частот, что делает нашу задачу аналогичной задаче интерполяции, следовательно, наша процедура устойчива.

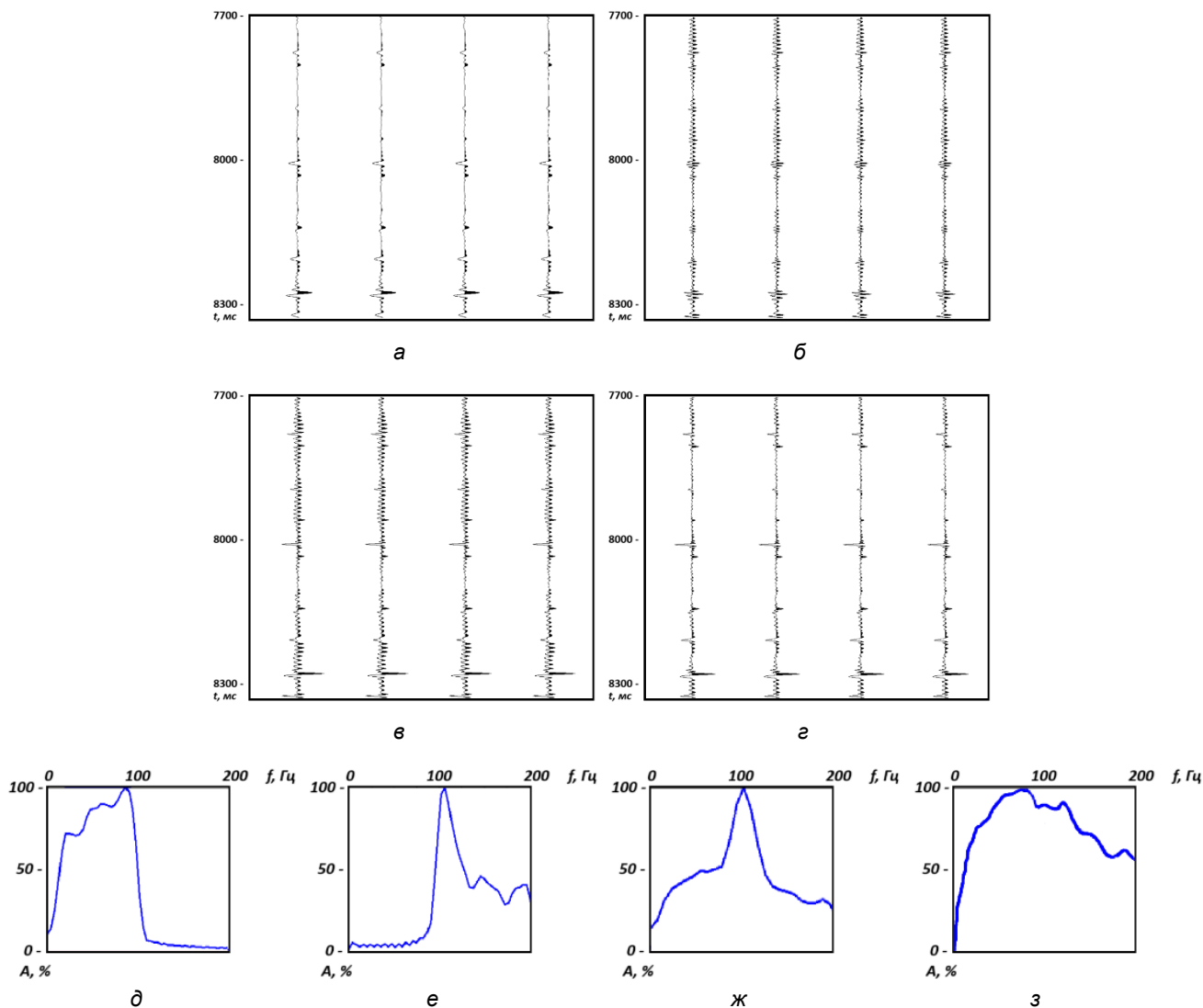


Рис. 6. Суммирование коррелограмм, полученных в неперекрывающихся частотных диапазонах; а – фрагмент коррелограммы первой гармоники в диапазоне частот (ω_1, ω_2) ; б – фрагмент коррелограммы второй гармоники в диапазоне частот $(\omega_2, 2\omega_2)$; в – сумма волновых полей на рис. 6, а и б; г – трасса, полученная при помощи АР спектральной экстраполяции; д – амплитудный спектр фрагмента на рис. 6, а; е – амплитудный спектр фрагмента на рис. 6, б; ж – амплитудный спектр фрагмента на рис. 6, в; з – амплитудный спектр фрагмента на рис. 6, г.

Обозначим через $S(k)$ k -й отсчет комплексной дискретной спектральной характеристики коррелограммы (неважно первой, второй или любой другой гармоники), $\omega \in (-\pi, \pi)$, $\omega = k\Delta\omega$, $\Delta\omega$ – шаг дискретизации спектра. Пусть коррелограмма задана в некотором диапазоне частот $\omega \in (\omega_l, \omega_h)$, и этому диапазону соответствуют отсчеты с номерами $k \in (k_l, k_h)$, где $k_l = \omega_l/\Delta\omega$, $k_h = \omega_h/\Delta\omega$. Тогда формируется настраиваемая модель [Льюнг, 1991] в виде оператора прогнозирования

$$\tilde{S}(k) = \sum_{i=1}^L d(i)S(k-i), \quad (4)$$

где $\tilde{S}(k)$ – прогнозное значение k -го отсчета спектра, $d(i)$ – комплексные коэффициенты предсказания. Так как истинная величина $S(k)$ известна, также известна и ошибка прогнозирования $\xi(k) = S(k) - \tilde{S}(k)$. Для получения оценки оптимальных коэффициентов предсказания формируется функционал $J(d)$ в виде суммарной энергии ошибок прогнозирования для всего частотного диапазона:

$$J(d) = \sum_{k=k_l}^{k_h} \xi(k)\bar{\xi}(k).$$

Продифференцировав функционал по искомым параметрам и приравняв производную к нулю, приходим к системе комплексных линейных уравнений, решив которую получим оптимальный оператор прогнозирования и затем используем его для предсказания отсчетов спектра в диапазоне $k > k_h$, т. е. для его экстраполяции. Так обрабатывается спектральная характеристика коррелограммы первой гармоники, где $k_l = \omega_1/\Delta\omega$, $k_h = (\omega_2 - \varepsilon)/\Delta\omega$, а спектр продолжается на диапазон индексов $k = k_h + 1, \dots, k_\varepsilon$, где $k_\varepsilon = (\omega_2 + \varepsilon)/\Delta\omega$.

Для второй гармоники, в коррелограмме которой после полосовой фильтрации отсутствуют низкие частоты, следует вместо предсказания (4) использовать ретроспекцию:

$$\tilde{S}(k) = \sum_{i=1}^L d(i)S(k+i),$$

предсказывая спектральную характеристику в обратном направлении. Тогда посчитанный оптимальный оператор используется для вычисления отсчетов в том же частотном диапазоне $(\omega_2 - \varepsilon, \omega_2 + \varepsilon)$. Результат заполнения вырезанного спектрального интервала получается в виде весовой (веса определяются треугольной убывающей функцией, сумма весов для каждого отсчета k равна единице) суммы отсчетов, полученных при помощи прогнозирования и ретроспекции.

Так как алгоритм предназначен для продолжения спектра импульсной трассы вне заданного диапазона частот, то, во-первых, требуется предварительно устранить влияние сейсмического импульса в этом диапазоне, что достигается средствами деконволюции. Во-вторых, следует привести спектральную характеристику трассы второй гармоники по уровню средней энергии к трассе первой гармоники. Такая нормировка нужна для того, чтобы при суммировании трасс гармоник была получена единая частотная характеристика импульсной трассы в расширенном диапазоне частот, но имеющая провал в окрестности частоты ω_2 . Так как импульсная трасса является реализацией белого шума, то она имеет равномерный энергетический спектр. Это свойство объясняет используемое нами выравнивание энергетических характеристик именно по уровню средней энергии спектра. Детали методики авторегрессионного продолжения спектра, а также рекомендации по выбору параметров процедуры приводятся в цитированных выше источниках. Разрез, построенный по описанной методике, в дальнейшем для краткости будем называть AP-суммой.

Показанное на рис. 6, z волновое поле является AP-суммой. Очевидно, что трассы первой и второй гармоник успешно объединены в одну трассу, характеризующую расширенным спектром и повышенной разрешенностью, а ее амплитудный спектр (рис. 6, z) не содержит выбросов.

ПРИМЕРЫ

В качестве примеров разделения гармоник и их последующего AP-суммирования рассмотрим два набора данных с разных площадей. Первый набор – коррелограммы, второй – разрезы.

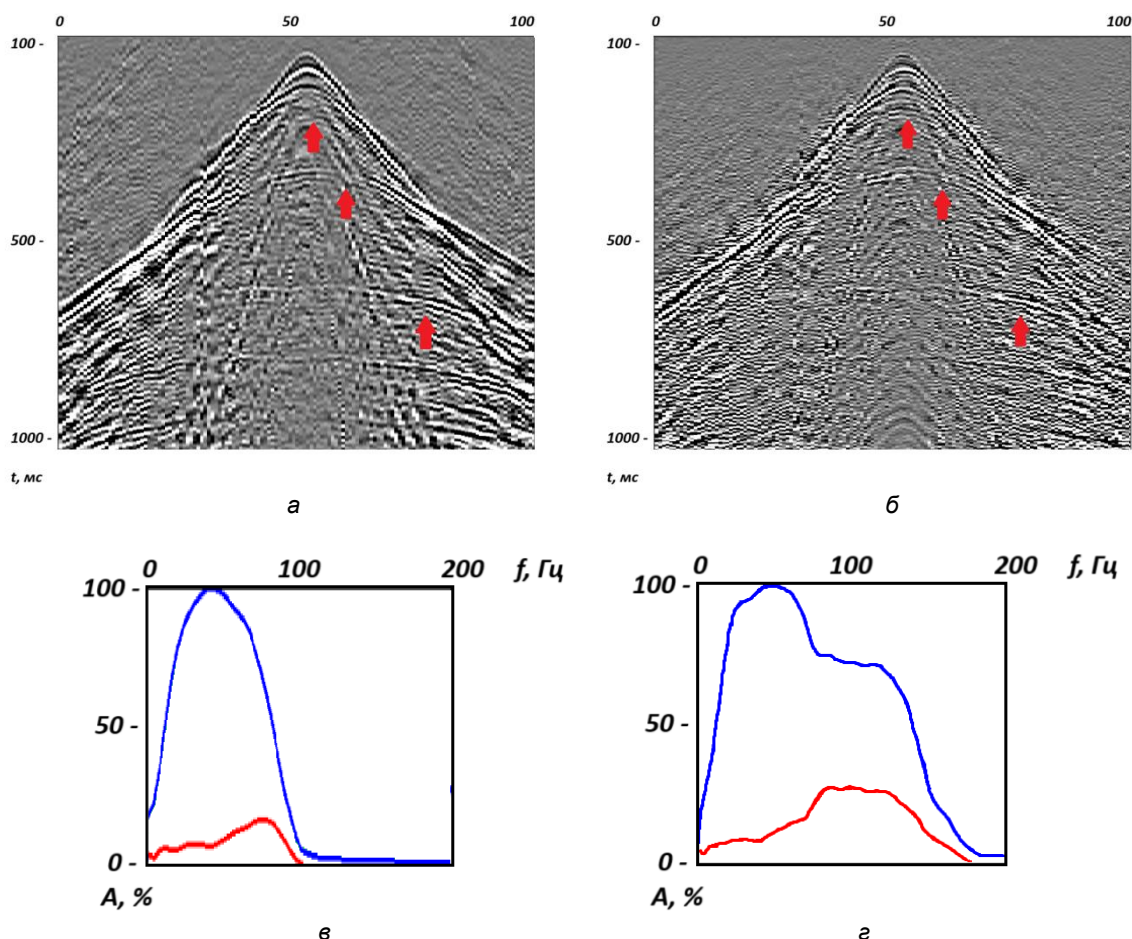


Рис. 7. Повышение разрешенности коррелограммы за счет привлечения второй гармоники. На графиках спектральных характеристик: синяя кривая – оценка спектра сигнала, красная кривая – оценка спектра шума; a – коррелограмма первой гармоники, по горизонтальной оси отложены порядковые номера трасс; b – AP-коррелограмма; v – амплитудный спектр коррелограммы на рис. 7, a ; z – амплитудный спектр коррелограммы на рис. 7, b . Частота Найквиста равна 500 Гц, а спектр изображается до 200 Гц. Области улучшений на сейсмограммах показаны красными стрелками.

На рисунке 7, a показана посчитанная при помощи ОРФ коррелограмма первой гармоники, а на рис. 7, v – ее амплитудный спектр. После разделения гармоник к сейсмограммам были применены коррекция геометрического расхождения и обратная фильтрация. Полученная AP-сумма коррелограмм представлена на рис. 7, b , а ее амплитудный спектр – на рис. 7, z . Если верхняя частота коррелограммы основного свипа примерно равна 90 Гц, то за счет привлечения второй гармоники удалось расширить спектр до 180 Гц. Однако вместе с расширением спектра сигнала наблюдается эффект увеличения уровня помех, особенно на высоких частотах. Оценки спектров сигнала и помехи на рис. 7, v и z получены по алгоритму [Никитин, 1979]. На высоких частотах заметно ухудшение отношения сигнал/шум. Важно

отметить, что здесь спектр сигнала расширен по всей длине сейсмической трассы, и, как следствие, повышается разрешенность всей волновой картины. Это свидетельствует о том, что в исходных виброграммах вторая гармоника характеризуется достаточно высокой интенсивностью.

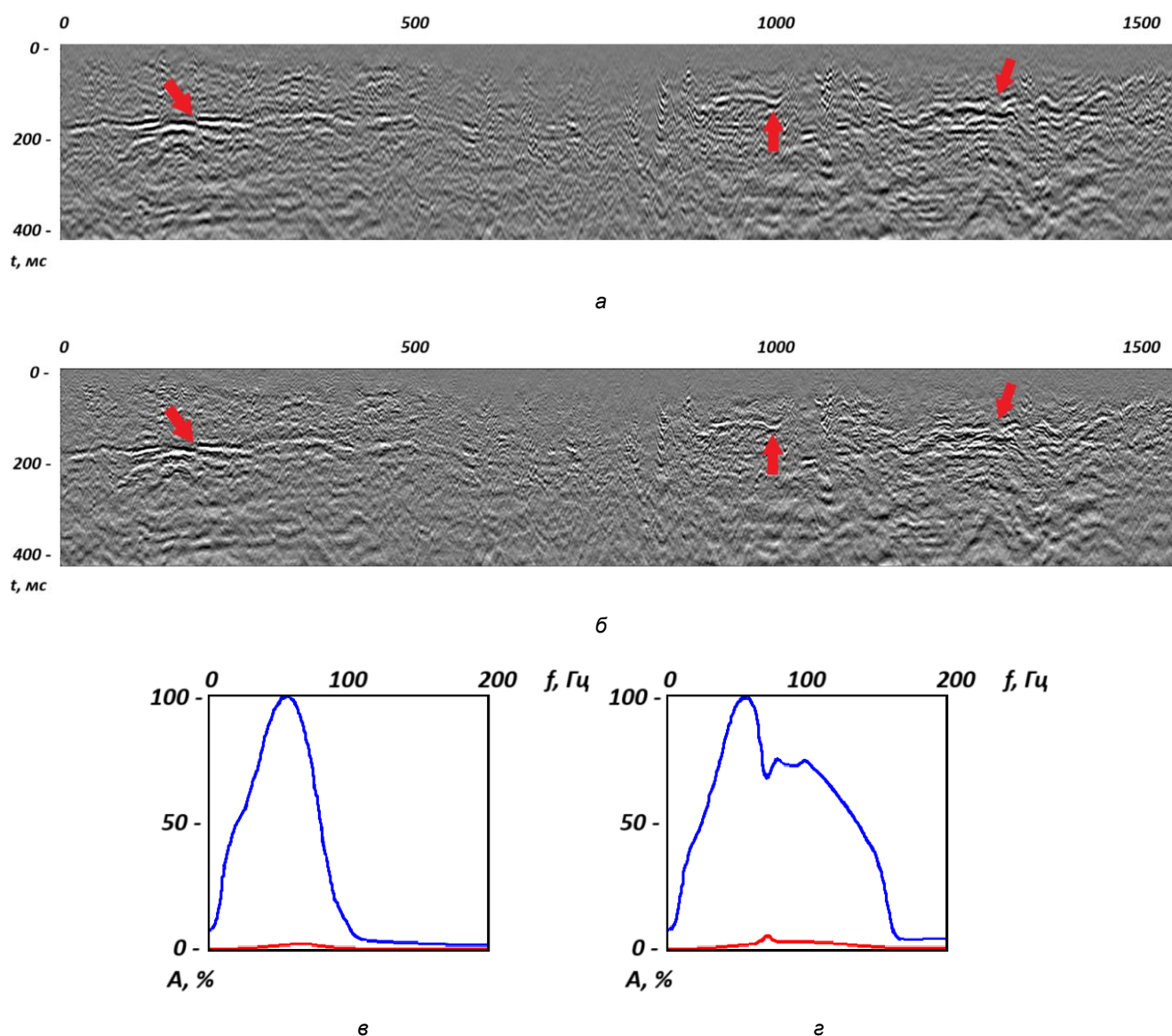


Рис. 8. Временные разрезы ОСТ и их амплитудные спектры. Частота Найквиста равна 250 Гц, а спектр изображается до 200 Гц. а – разрез первой гармоники, по горизонтальной оси отложены условные номера пикетов ОСТ; б – АР-сумма первой и второй гармоник; в – амплитудный спектр разреза на рис. 8, а; з – амплитудный спектр разреза на рис. 8, б. Области улучшений на разрезах показаны красными стрелками. Усл. обозн. см. на рис. 7.

Также укажем на следующую особенность процедур обработки, связанных с корреляцией и декорреляцией. Чтобы избежать краевого эффекта, исходные данные должны быть дополнены нулевыми отсчетами на величину, равную длине свип-сигнала, в область отрицательных времен. Так как свипы имеют большую протяженность, пренебрежение краевыми эффектами всегда значительно искажает волновую картину и влияет на весь интервал записи. При несоблюдении этого условия на коррелограмме будут присутствовать дополнительные артефакты.

Иная ситуация складывается при анализе второго полевого материала, обработанного нами до уровня разреза общей средней точки (ОСТ), где расширение спектра сигнала заметно только в ВЧР, что

является следствием малого уровня гармоник. По-видимому, ВЧР характеризуется повышенными частотно-зависимыми поглощающими свойствами, что существенно ослабляет высокочастотную компоненту волнового поля. На рисунке 8 сравниваются временной разрез первой гармоники и AP-сумма разрезов первой и второй гармоник. Слип задан в полосе частот 5–90 Гц. Первый разрез имеет низкое разрешение, что проявляется в размытости деталей и менее четких границах. AP-сумма обладает более высоким разрешением, благодаря чему все элементы, складки и разломы выглядят четко и более детализированно. Это особенно заметно на тех участках, где на разрезе первой гармоники видно лишь одно отражение, а на AP-сумме выявляется сложная слоистая структура со складками и разломами. Амплитудные спектры разрезов показаны на рис. 8, в и г. Заметно значительное расширение спектра AP-суммы по сравнению с разрезом первой гармоники.

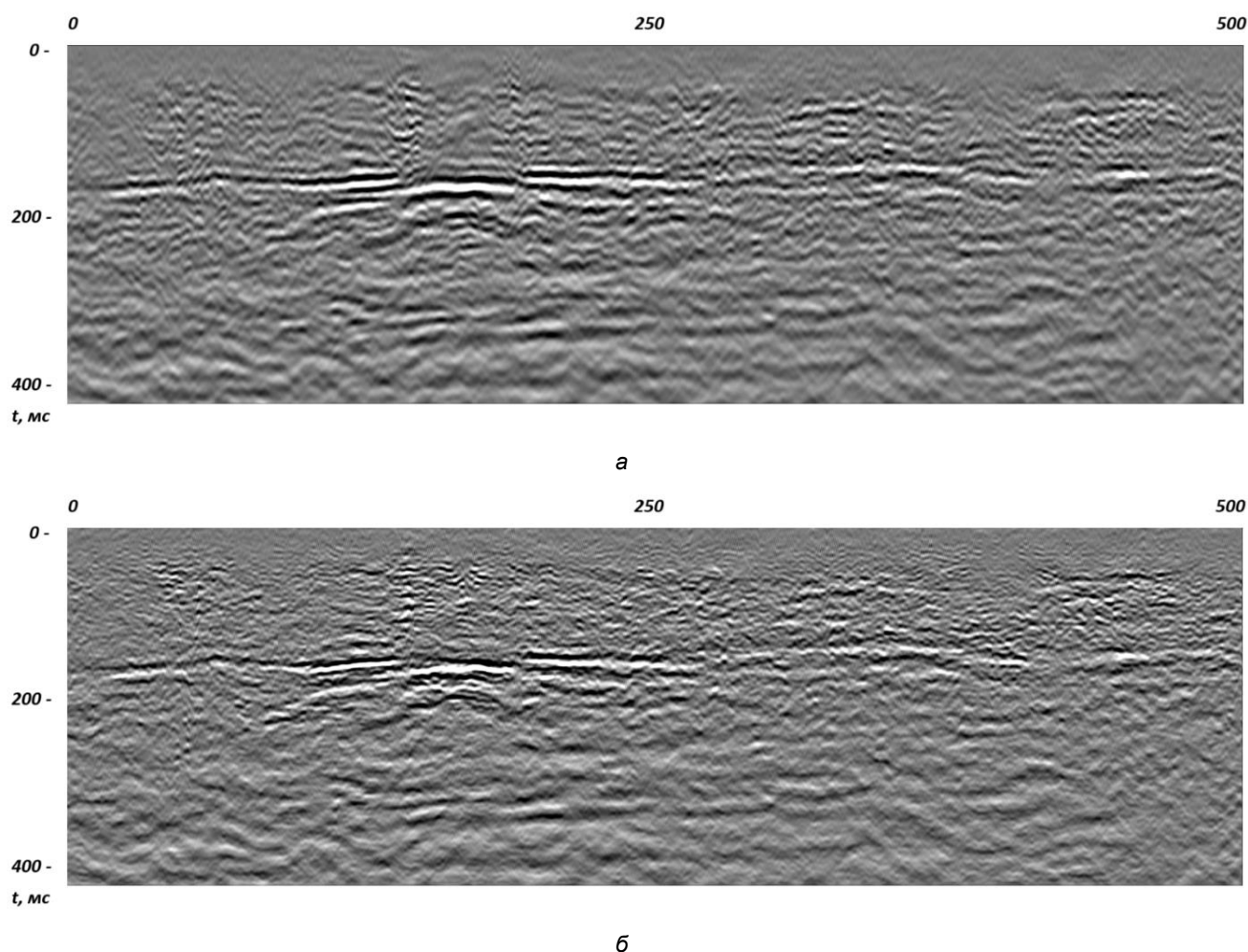


Рис. 9. Фрагмент разреза: а – первая гармоника, по горизонтальной оси отложены условные номера пикетов ОСТ; б – AP сумма первой и второй гармоник.

При увеличении изображения выявляются детали волновой картины. На рисунке 9 показан увеличенный фрагмент временных разрезов первой гармоники и AP-суммы. AP-сумма сохраняет четкость и ясность даже при масштабировании, а разрез по первой гармонике становится размытым и теряет качество.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Если решается задача обработки гармоник виброрейсмического метода, невозможно выровнять амплитуды сейсмической записи при помощи традиционной коррекции геометрического расхождения. Поэтому обработке подвергаются виброграммы и коррелограммы без коррекции амплитуд. Это означает, что любые артефакты, в том числе неточности корреляции–декорреляции, связанные с сильными сигналами в верхней части, накладываются на слабые сигналы в нижней части. При традиционной корреляционной обработке виброграмм (если речь не идет о данных slip-sweep) шумы, связанные с взаимной корреляцией гармоник, предшествуют сфокусированному сигналу, следовательно, слабые артефакты слабых сигналов накладываются на сильные сигналы. Именно по этой причине они оказываются малозаметными, их можно игнорировать и применять к коррелограмме коррекцию геометрического расхождения. В отличие от традиционной методики обработки, задачи, связанные с выделением гармоник, требуют последовательного применения процедур корреляции и декорреляции. Неточности, связанные с необратимостью корреляции, проявляются в виде артефактов, при этом они накладываются на слабые полезные волны в нижней части трассы, предварительно увеличить амплитуду которых при помощи коррекции расхождения невозможно. С аналогичными проблемами приходится сталкиваться и при работе с виброграммами, хотя их обработка не требует последовательного использования корреляции и декорреляции.

2. Мы сосредоточились на изучении первой и второй гармоник, игнорируя гармоники старших порядков. Причина этого заключается в том, что, если построить трассу второй гармоники в частотном диапазоне $(\omega_2 + \varepsilon, 2\omega_2)$, то использование гармоник старших порядков не приведет к получению дополнительной информации для этого диапазона. В то же время, расширить спектр импульса до частоты $2\omega_2$ обычно бывает достаточным. На высоких частотах помеха всегда доминирует над сигналом, поэтому привлечение более высоких частот смысла не имеет. Разумеется, при обработке чрезвычайно полезными оказываются процедуры подавления помех, они позволяют более уверенно усиливать энергию высокочастотных компонент сигнала.

3. Применение алгоритма АР-интерполяции спектра требует предварительного использования деконволюции. Обычно эта процедура входит в граф обработки, поэтому проблем не возникает. Если по каким-либо причинам ее применять не следует, можно запомнить операторы деконволюции, которые были применены, а после построения окончательной объединенной трассы вывести их из нее средствами обратной фильтрации.

4. Может возникнуть вопрос, почему в качестве граничной частоты построения коррелограмм или разрезов первой и второй гармоник использована именно ω_2 , а не иная частота, для которой погрешность корреляции–декорреляции минимальна. В самом деле, как мы видели на рис. 4, в, ω_2 неблагоприятна ввиду большой погрешности корреляции–декорреляции на этой частоте. Казалось бы, в роли граничной частоты может выступить любая ω в пределах диапазона $(2\omega_1, \omega_2)$ и отстоящая на значительное удаление от ω_2 . Затем разрезы или коррелограммы по первой и второй гармоникам объединяются с учетом перекрытия по частотам.

На самом деле такой подход не позволит избавиться от артефакта. Методика вычисления виброграммы второй гармоники предполагает вычитание из исходной виброграммы сигнала, связанного

с первой гармоникой (шаг 4). Последний, в свою очередь, уже искажен эффектами, связанными с неточностью корреляции–декорреляции в окрестности частоты ω_2 . Поэтому после вычитания искаженного сигнала из исходной виброграммы вторая гармоника будет содержать эти артефакты, а результат станет похожим на тот, что показан на рис. 6, в. Именно по этой причине ω_2 выбрана в качестве граничной частоты для получения коррелограмм первой и второй гармоник, а в ее окрестности спектры сейсмических трасс не вычисляются по описанной 5-шаговой методике, а восстанавливаются в результате AP-интерполяции.

5. Потенциальная неустойчивость алгоритма связана с элементами обратной фильтрации, которые в нем используются. В первую очередь это относится к выравниванию по среднему уровню энергии высокочастотной и низкочастотной компонент трассы. Выше верхней частоты возбуждения основного свипа находится только, вообще говоря, энергия гармоник и помех. Если по тем или иным причинам данные характеризуются низким уровнем гармоник, то на этих частотах будет доминировать шум. Выравнивание амплитудного спектра в таких условиях приведет к уменьшению отношения сигнал/шум, как это происходит при применении алгоритма деконволюции сжатия сигнала, который решает эту же задачу расширения спектра в заданной полосе частот [Денисов, 2025]. Поэтому после расширения спектра можно измерить отношение сигнал/шум на каждой частоте, после чего применить оптимальный фильтр выделения сигнала на фоне шума [Козлов и др., 1973]. Также полезным оказывается применение многоканальных процедур шумоподавления, например, f -х деконволюции [Боганик, Гурвич, 2006].

6. Нетрудно понять, что описанный алгоритм теряет энергию гармоник в перекрывающихся частотных диапазонах. К примеру, для $\omega \in (2\omega_1, \omega_2)$ можно было бы использовать не только свип основного тона, но и подсуммировать к нему коррелограмму или разрез второй гармоники. Мы, однако, так не поступаем. И дело не только в артефактах, изучению которых мы посвятили значительную часть этой работы, а в специфике самого алгоритма ОРФ. При выводе алгоритма не учитывалось влияние аддитивной помехи. Как следствие, в перекрывающихся частотных диапазонах получаемые с его помощью результаты совпадают для гармоник различных порядков. С позиции критерия, использованного при разработке алгоритма, можно сказать, что если нет помехи, то и нет смысла накапливать результаты обработки. В работе [Денисов, 2024] показано, что если в явном виде ввести в критерий оптимальности информацию о помехах, то алгоритм выглядит иначе и начинает стремиться максимизировать отношение сигнал/шум. Тогда наряду с первой гармоникой для построения итоговой коррелограммы в диапазоне $(2\omega_1, \omega_2)$, а также во всех других перекрывающихся диапазонах, он использует целиком энергию сигнала, включая гармоники всех порядков.

7. Проблема, которую нам необходимо было преодолеть в процессе разработки алгоритма, связана с осцилляцией Гиббса (рис. 3 и др.). Для ослабления такого эффекта обычно успешно используют гладкие функции усечения временной характеристики оператора. Это приводит к тому, что края АЧХ сглаживаются, а уровень осцилляций уменьшается. Специфика решаемой здесь задачи заключается в том, что после применения к сигналу такой фильтрации на следующих этапах обработки потребуется восстановить исходный сигнал: перейдя от виброграммы к коррелограмме и отделив в ней сигнал от гармоник, нужно будет восстановить виброграмму основного свипа. Затем выделенная таким способом виброграмма вычитается из исходной полевой виброграммы. Следовательно, использование фильтра со

сглаженной АЧХ потребует применения деконволюции для его компенсации. Даже в пределах сигнального диапазона частот сглаженная АЧХ имеет области сильного затухания, где она стремится к нулю. Поэтому оператор обратной фильтрации на этих частотах должен иметь неограниченно возрастающую АЧХ, что приводит к неустойчивости. Понятно, что любая погрешность обратной фильтрации крайне негативно скажется на результате восстановления виброграммы из коррелограммы, так как энергия гармоник значительно ниже энергии основного свипа. После вычитания, на посчитанной виброграмме гармоник сохраняются остатки первой гармоники, что может значительно исказить ее.

8. Проблемы, преодолению которых посвящено настоящее исследование, связаны исключительно со стремлением использовать информацию, содержащуюся в гармониках. Затруднений не возникает, если гармоники рассматриваются как помеха, и алгоритм ОРФ применяется только для их удаления, так как в таком случае нет необходимости последовательного применения процедур корреляции и декорреляции.

ВЫВОДЫ

Развивая алгоритм ОРФ, позволяющий использовать энергию гармоник, мы обнаружили, что его применение вызывает появление артефактов, наличие которых не следует из теоретических основ метода. В результате исследования их природы было установлено, что помехи обусловлены необратимостью процедуры корреляции. Ситуация усугубляется тем, что на трассе невозможно предварительно выровнять амплитуды сигналов, скомпенсировав эффект геометрического расхождения. В результате шумы корреляции–декорреляции, связанные с сильными сигналами в верхней части, накладываются на слабые сигналы в нижней части. Эта особенность обработки связана только с тем, что алгоритм пытается выделить гармоники из исходной виброграммы. При традиционной корреляционной обработке такие шумы тоже появляются, но они, как правило, малозаметны. (Впрочем, после коррекции геометрического расхождения по коррелограммам хорошо известен эффект разрастания уровня корреляционных шумов от сильных сигналов, когда этот шум интерферирует со слабыми сигналами на больших временах регистрации, и такая помеха не связана с гармониками, а обусловлена исключительно погрешностью самой корреляции.)

Наиболее надежным способом устранения помех оказалась частотная селекция. Артефакты, связанные, например, с первой гармоникой, сосредоточены в диапазоне частот основного свипа. Как следует из теоретических рассуждений, в перекрывающихся диапазонах результаты обработки для гармоник различного порядка совпадают. На практике, однако, когда мы сталкиваемся с артефактами корреляции–декорреляции, это свойство алгоритма нарушается. Поэтому было принято решение использовать энергию сигнала и гармоник только в неперекрывающихся частотных диапазонах. Более того, из-за интенсивных спектральных краевых эффектов оказалось целесообразно производить выделение частотных диапазонов с некоторым запасом. Тем самым спектральные характеристики трасс гармоник не могут сшиваться встык, и между ними образуются зазоры. Для восстановления энергии сигнала в пределах этих интервалов мы используем методику аналитического продолжения спектра, основанную на его АР экстраполяции. Эффективность предложенной методики использования гармоник для расширения спектра сигнала подтверждается результатами обработки модельных и полевых сейсмограмм.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Баскаков С.И.** Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 2000. 462 с.
- Боганик Г.Н., Гурвич И.И.** Сейсморазведка. Тверь: АИС, 2006. 744 с.
- Вакман Д.Е.** Сложные сигналы и принцип неопределенности в радиолокации. М.: Советское радио, 1965. 304 с.
- Василенко Г.И., Тараторин А.М.** Восстановление изображений. М.: Радио и связь, 1986. 302 с.
- Гольдин С.В.** Линейные преобразования сейсмических сигналов. М.: Недра, 1974. 352 с.
- Гоноровский И.С.** Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Советское радио, 1977. 608 с.
- Денисов М.С.** О возможности увеличения отношения сигнал/шум за счет использования гармоник в невзрывной сейсморазведке // Геофизические технологии. 2024. № 4. С. 34–49. doi:10.18303/2619-1563-2024-4-34.
- Денисов М.С.** Какую задачу и как решает алгоритм предсказывающей деконволюции с единичным интервалом прогнозирования // Геофизические технологии. 2025. № 1. С. 23–42. doi:10.18303/2619-1563-2025-1-23.
- Денисов М.С., Шнеерсон М.Б.** Использование гармоник для расширения спектрального состава волн в вибрационной сейсморазведке. Часть 2 // Технологии сейсморазведки. № 3. 2017. С. 36–54. doi:10.18303/1813-4254-2017-3-36-54. EDN:XZJATR.
- Денисов М.С., Егоров А.А.** Построение модели вибросейсмического сигнала, осложненного гармониками // Геофизические технологии. 2019а. № 1. С. 72–83. doi:10.18303/2619-1563-2019-1-72.
- Денисов М.С., Егоров А.А.** Оптимизационная рекурсивная фильтрация как способ подавления гармоник в методе Вибросейс // Геофизические технологии. 2019б. № 2. С. 23–53. doi:10.18303/2619-1563-2019-2-23.
- Денисов М.С., Зыков А.А.** Моделирование гармоник амплитудно и нелинейно частотно-модулированных сигналов // Геофизические технологии. 2023а. № 3. С. 58–68. doi:10.18303/2619-1563-2023-3-58.
- Денисов М.С., Зыков А.А.** Разделение сигнала и гармоник в невзрывной сейсморазведке с амплитудно и нелинейно частотно-модулированными сигналами // Геофизические технологии. 2023б. № 3. С. 69–84. doi:10.18303/2619-1563-2023-3-69.
- Козлов Е.А., Гогоненков Г.Н., Лернер Б.Л., Мушин И.А., Мешбей В.И., Климович Н.И., Янковский И.И.** Цифровая обработка сейсмических данных. М.: Недра, 1973. 309 с.
- Льюнг Л.** Идентификация систем: Теория для пользователя. М.: Наука, 1991. 432 с.
- Марпл–мл. С.Л.** Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
- Никитин А.А.** Статистические методы выделения геофизических аномалий. М.: Недра, 1979. 280 с.
- Хемминг Р.В.** Цифровые фильтры. М.: Советское радио, 1980. 224 с.
- Шнеерсон М.Б., Потапов О.А., Гродзенский В.А., Иноземцев А.Н., Лев И.С., Жуков А.П.** Вибрационная сейсморазведка. М.: Недра, 1990. 240 с.
- Denisov M.S., Egorov A.A., Shneerson M.B.** Optimization-based recursive filtering for separation of signal from harmonics in Vibroseis // Geophysical Prospecting. 2021. Vol. 69 (4). P. 779–798. doi:10.1111/1365-2478.13084.
- Oldenburg D.W., Scheuer T., Levy S.** Recovery of the acoustic impedance from reflection seismograms // Geophysics. 1983. Vol. 48 (10). P. 1318–1337. doi:10.1190/1.1441413.
- Walker C., Ulrych T.J.** Autoregressive recovery of the acoustic impedance // Geophysics. 1983. Vol. 48 (10). P. 1338–1350. doi:10.1190/1.1441414.

REFERENCES

- Baskakov S.I.** Radio circuits and signals (In Russ.). Higher School, Moscow, 2000. 462 p.
- Boganik G.N., Gurvich I.I.** Seismic Exploration (In Russ.). AIS, Tver, 2006. 744 p.
- Denisov M.S.** On the possibility of increasing the signal-to-noise ratio by using the harmonics in non-explosive seismic exploration // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2024. No. 4. P. 34–49. (In Russ.). doi: 10.18303/2619-1563-2024-4-34.
- Denisov M.S.** What problem and how does the spiking deconvolution algorithm solve // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2025. No. 1. P. 23–42. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2025-1-23.
- Denisov M.S., Shneerson M.B.** Utilization of harmonics to broaden the bandwidth in vibroseismic. Part 2. // Seismic technologies. 2017. No. 3. P. 36–54. (In Russ.). doi:10.18303/1813-4254-2017-3-36-54.
- Denisov M.S., Egorov A.A.** Constructing a model of vibroseis signal complicated by harmonics // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2019a. No. 1. P. 72–83. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2019-1-72.
- Denisov M.S., Egorov A.A.** Optimization-based recursive filtering for Vibroseis harmonic noise elimination // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2019b. No. 2. P. 23–53. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2019-2-23.
- Denisov M.S., Zykov A.A.** Modeling of harmonics of amplitude and nonlinear frequency-modulated signals // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2023a. No. 3. P. 58–68. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2023-3-58.
- Denisov M.S., Zykov A.A.** Separation of signal and harmonics in non-explosive seismic prospecting with amplitude and nonlinear frequency-modulated signals // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2023b. No. 3. P. 69–84. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2023-3-69.
- Denisov M.S., Egorov A.A., Shneerson M.B.** Optimization-based recursive filtering for separation of signal from harmonics in Vibroseis // Geophysical Prospecting. 2021. Vol. 69 (4). P. 779–798. doi:10.1111/1365-2478.13084.
- Goldin S.V.** Linear transformations of seismic signals (In Russ.). Nedra, Moscow, 1974. 352 p.
- Gonorovsky I.S.** Radio circuits and signals. Mir, Moscow, 1981. 640 p.
- Hamming R.W.** Digital filters. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1977. 226 p.
- Kozlov E.A., Gogonenkov G.N., Lerner B.L., Mushin I.A., Meshbey V.I., Klimovich N.I., Yankovkij I.I.** Digital processing of seismic data (In Russ.). Nedra, Moscow, 1973. 309 p.
- Ljung L.** System identification: Theory for the user. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1987. 384 p
- Marple S.L., Jr.** Digital spectral analysis with applications. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1987. 495 p.
- Nikitin A.A.** Statistical methods for detecting geophysical anomalies (In Russ.). Nedra, Moscow, 1979. 280 p.
- Oldenburg D.W., Scheuer T., Levy S.** Recovery of the acoustic impedance from reflection seismograms // Geophysics. 1983. Vol. 48 (10). P. 1318–1337. doi:10.1190/1.1441413.
- Shneerson M.B., Potapov O.A., Grodzensky V.A., Inozemtsev A.N., Lev I.S., Zhukov A.P.** Vibration seismic exploration (In Russ.). Nedra, Moscow, 1990. 240 p.
- Vakman D.E.** Complex signals and the uncertainty principle in radiolocation (In Russ.). Soviet Radio, Moscow, 1965. 304 p.
- Vasilenko G.I., Taratorin A.M.** Reconstruction of images (In Russ.). Radio and communication, Moscow, 1986. 302 p.
- Walker C., Ulrych T.J.** Autoregressive recovery of the acoustic impedance // Geophysics. 1983. Vol. 48 (10). P. 1338–1350. doi:10.1190/1.1441414.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ДЕНИСОВ Михаил Сергеевич – доктор физико-математических наук, директор по науке ООО «ГЕОЛАБ». Основные научные интересы: разработка алгоритмов обработки геофизических сигналов.

ЗЫКОВ Андрей Александрович – геофизик ООО «ГЕОЛАБ». Основные научные интересы: обработка данных сейсморазведки, инженерная геофизика.

*Статья поступила в редакцию 27 августа 2025 г.,
одобрена после рецензирования 13 октября 2025 г.,
принята к публикации 15 октября 2025 г.*



ОЦЕНКА ПЛОТНОСТИ ЭФФЕКТИВНОГО ПАЛЕОТЕПЛООВОГО ПОТОКА В ПРЕДЕЛАХ МАНСИЙСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ

Елена Владимировна Пономарева

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,
PonomarevaEV@jpgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0009-0007-9019-9576>*

Аннотация. Выполнено одномерное численное моделирование в 17 скважинах для отложений осадочного чехла Мансийской синеклизы. С учетом калибровки тепловой истории региона оценена плотность эффективного палеотеплового потока на верхней границе доюрского фундамента. Показано, что наиболее высокие значения теплового потока приурочены к центральной и юго-западной части синеклизы, а минимальные – к юго-восточной. Интервал изменения средних значений составляет от 40 до 68 мВт/м².

Ключевые слова: палеотепловой поток, бассейновое моделирование, Западная Сибирь, Мансийская синеклиза

Финансирование: работа выполнена в рамках государственной программы FWZZ-2022-0007 «Цифровая модель Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, седиментогенез и литостратиграфия, закономерности размещения нефтяных и газовых месторождений, детализированная количественная оценка ресурсов углеводородов в традиционных и нетрадиционных скоплениях, как основа прогноза развития нефтегазового комплекса».

Для цитирования: Пономарева Е.В. Оценка плотности эффективного палеотеплового потока в пределах Мансийской синеклизы // Геофизические технологии. 2025. № 2. С. 26–36. doi:10.18303/2619-1563-2025-2-26.

ESTIMATION OF THE EFFECTIVE PALEO HEAT FLOW DENSITY WITHIN THE MANSI SYNECLISE

Elena V. Ponomareva

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
PonomarevaEV@jpgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0009-0007-9019-9576>*

Abstract. In this study the one-dimensional numerical modeling for sedimentary cover deposits of the Mansi syneclyse in 17 wells was performed. Taking into account the calibration of the thermal history of the region, the density of the effective heat flow at the upper boundary of the Pre-Jurassic basement is estimated. It is shown that the highest values of the heat flow are confined to the central and southwestern parts of the syneclyse, while the minimum values are confined to the southeastern part. The range of change in the average values ranges from 40 to 68 mW/m².

Keywords: paleo heat flow, basin modeling, West Siberia, Mansi syneclyse

Funding: the study was carried out with the financial support of Russian Federal Research Project FWZZ-2022-0007 “Digital model of the West Siberian oil and gas province, sedimentogenesis and lithostratigraphy, regularities of oil and gas fields location, detailed quantitative assessment of hydrocarbon resources in conventional and unconventional accumulations, as the basis for forecasting the development of the oil and gas complex”.

For citation: Ponomareva E.A. Estimation of the effective paleo heat flow density within the Mansi syneclyse // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2025. No. 2. P. 26–36. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2025-2-26.

ВВЕДЕНИЕ

Для расчета объемов генерации углеводородов нефтегазопроизводящими толщами требуется решение большого количества задач, в том числе и оценка величины теплового потока. Тепловая энергия, поступающая из верхней мантии в земную кору, и радиогенное тепло в осадочном чехле определяют степень катагенетических преобразований органического вещества (ОВ). Скорость образования углеводородов из ОВ, содержащегося в осадочных породах, а также соотношение газообразных и жидких УВ в продуктах катагенеза, меняется в зависимости от величины плотности теплового потока недр и скорости погружения отложений [Конторович, Меленевский, 1988].

Моделирование процессов нефтидогенеза в осадочных бассейнах, основанное на геолого-геохимических представлениях с применением математического аппарата, описано в работах Н.Б. Вассоевича, А.Э. Конторовича, С.Г. Неручева, Е.А. Рогозиной, А.А. Трофимука, В.А. Успенского, M.L. Bordenave, T. Hantschel, I.A. Kauerauf, B.P. Tissot, D.H. Welte и других отечественных и зарубежных авторов. При выполнении бассейнового моделирования (историко-геологической реконструкции) процессов образования нефти и газа одним из важных этапов является оценка величины теплового потока. Наиболее полная информация о его современном распределении в пределах Западно-Сибирской молодой эпигерцинской платформы приведена в работах А.Д. Дучкова [1985], Н.М. Кругликова [Кругликов и др., 1985], А.Р. Курчикова и Б.П. Ставицкого [Курчиков, Ставицкий, 1987; Курчиков, 2001] и др., по данным этих авторов изменение плотности теплового потока в осадочном чехле происходит в пределах от 20 до 98 мВт/м². Выявление значений плотности основано на интерпретации геотермических данных непрерывного термокаротажа скважин и точечных замеров температур при испытании продуктивных объектов. Согласно исследованиям разных авторов, на величину теплового потока существенное влияние оказывает время консолидации фундамента и вещественный состав пород [Ставицкий и др., 1981].

В данной работе выполнена оценка плотности эффективного палеотеплового потока через основание осадочного чехла для центральных районов юга Западной Сибири. Для проведения исследования были выбраны наиболее глубокие скважины, вскрывшие доюрские породы, и содержащие необходимую геолого-геохимическую информацию (рис. 1).

Объектом исследования является мезозойско-кайнозойский осадочный чехол в разрезах 17-ти глубоких скважин, пробуренных на территории Мансийской синеклизы. Местоположение скважин обеспечивает относительно равномерную сеть наблюдений.

Первое упоминание о Ханты-Мансийской впадине, выделенной на структурно-тектонической карте мезозойских и кайнозойских отложений на территории Западной Сибири по данным геофизических работ и подтвержденной глубоким бурением, встречается в работе 1958 г. под редакцией Д.В. Дробышева и В.П. Казаринова [Геология..., 1958]. В этом же году на этой территории, но в несколько других границах, Н.Н. Ростовцевым с соавторами [Геологическое строение..., 1958] на схеме строения поверхности складчатого фундамента была околонтурена Усть-Иртышская впадина. В последующие годы, с увеличением объемов геолого-геофизических работ и анализом полученных материалов, разными авторскими коллективами разрабатывались критерии классификации платформенных структур на основании которых строились схемы структурно-тектонического районирования. В данной работе Мансийская синеклиза принимается, как отрицательная надпорядковая структура, выделенная на тектонической карте юрского структурного яруса Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции под ред. А.Э. Конторовича [Конторович и др., 2001].

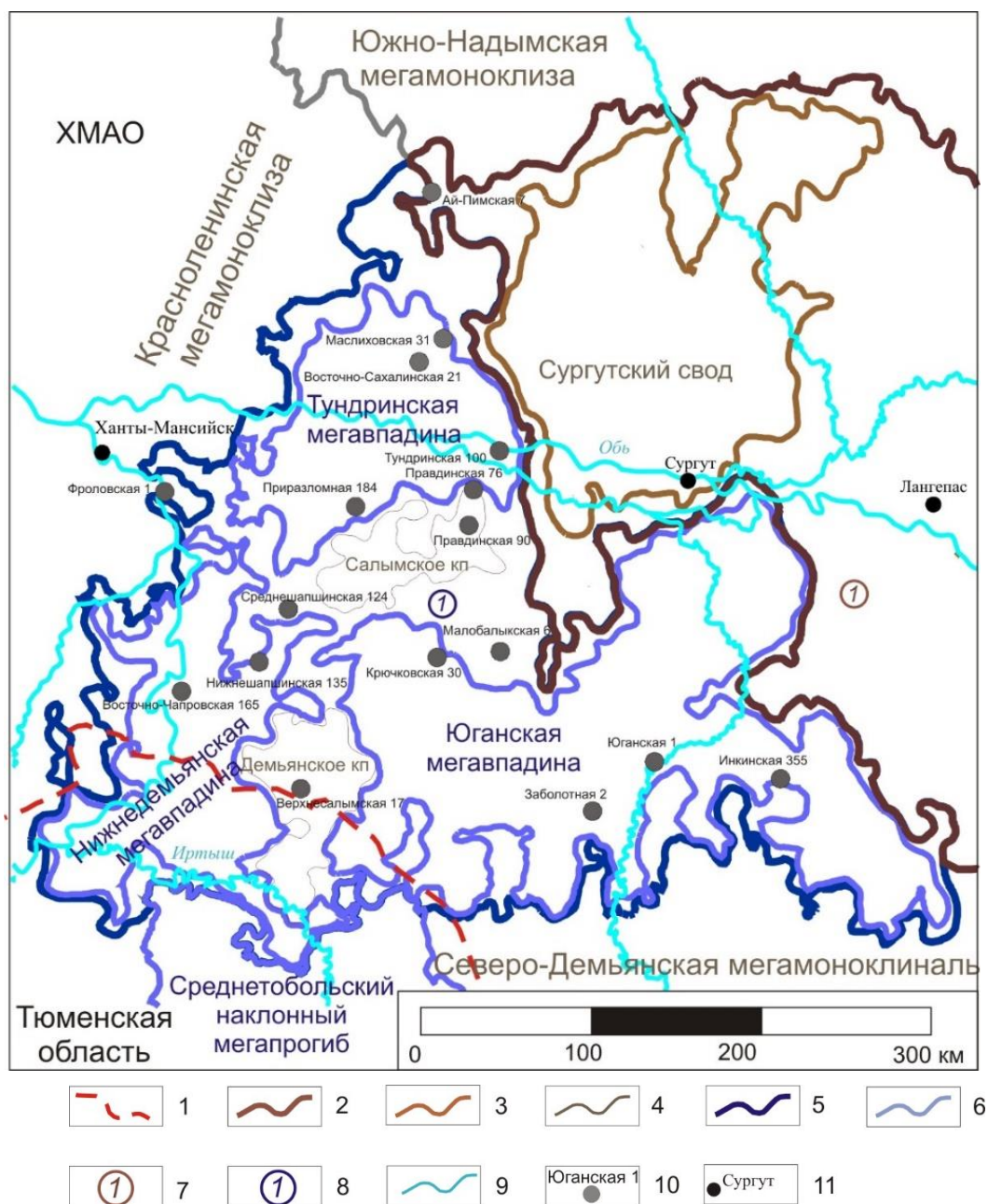


Рис. 1. Обзорная карта территории исследования на основе тектонической карты [Конторович и др., 2001]: 1–6 – границы: 1 – административная; структурных элементов: положительные: 2 – 0 порядка; 3 – I порядка; 4 – II порядка; отрицательные: надпорядковые: 5 – 0 порядка; 6 – I порядка; тектонические элементы: 7 – Хантейская гемиянтеклиза, 8 – Мансийская синеклиза; 9 – гидросеть. 10 – скважина; 11 – населенные пункты.

В строении Мансийской синеклизы выделяются три отрицательные структуры I порядка: Тундринская, Нижнедемянская и Юганская мегавпадины; и положительные структуры II порядка: Салымское и Демьянское куполовидные мезоподнятия, осложненные структурами более мелкого порядка. Образование консидементационной Мансийской структуры связано, по мнению В.Д. Наливкина [Наливкин и др., 1965], с опусканием крупного блока фундамента плиты, являющегося срединным массивом палеозойского возраста. Мансийская синеклиза, контролируется изогипсой –2800 м, занимает территорию площадью порядка 60 тыс. км² и имеет амплитуду 350 м. Начало формирования Мансийской синеклизы, как единой надпорядковой структуры, по мнению В.С. Суркова с соавторами [Сурков и др.,

1983], относится к поздней юре, до этого накопление осадков происходило в континентальных условиях и в крупных депрессионных зонах, разделяющих сводовые выступы и поднятия.

Нефтеносность отложений осадочного чехла Мансийской синеклизы была доказана в 1964 г. открытием Правдинского нефтяного месторождения, за которым последовали и другие открытия. По схеме нефтегазогеологического районирования Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции территория Мансийской синеклизы находится в пределах трех нефтегазоносных областей (НГО): Фроловской (Приобский, Салымский и Уватский нефтегазоносные районы (НГР)), Среднеобской (Сургутский и Вартовский НГР) и Каймысовской (Демьянский и Каймысовский НГР). Этаж нефтеносности занимает от нижнемеловых до среднеюрских отложений (пласты АС₄₋₁₂ – в черкашинской и сангопайской свитах; пласты БС₁₋₈, АС₀₋₇, БС₁₋₂₂ – в ахской свите; пласты ЮС₀ – в баженовской свите; пласты Ю₁ – в васюганской свите; пласты ЮС₂₋₅ – в тюменской свите), а также находится в коре выветривания зоны контакта среднеюрских пород и палеозоя (J₂ + Pz). В настоящее время на территории исследования открыто более 30 нефтяных месторождений.

Основными нефтепроизводящими толщами на территории исследования являются: отложения баженовского горизонта, представленные карбонатно-глинисто-кремнистыми породами баженовской свиты с высокими концентрациями органического углерода (С_{орг}) до 15–20 %, отложения лайдинского и китербютского горизонтов, представленные глинистыми и аргиллито-глинистыми породами радомской и тогурской пачек, содержащие битуминозные прослои с концентрацией С_{орг} 1–3 %, в составе шеркалинской, горелой и котухтинской свит. Меньшая роль в образовании углеводородов принадлежит среднеюрским глинисто-углистым отложениям леонтьевского горизонта в составе тюменской свиты и вышезалегающим некоомским глинистым и алевритистым породам кашайской свиты в составе алымского горизонта [Нефтегазоносные бассейны..., 1994].

Цель работы – на основе реконструкции температурной истории отложений с помощью одномерного моделирования оценить величину эффективного палеотеплового потока в основании осадочного чехла территории Мансийской синеклизы.

Фактическими данными являлись разбивки и литология стратиграфических интервалов отложений мезозойско-кайнозойского осадочного чехла, полученные на основе интерпретации материалов ГИС разрезов глубоких скважин и из опубликованной литературы, и данные об отражательной способности витринита R_o.

Методика исследования. Работа выполнялась с применением моделирования в одномерном модуле программно-методического комплекса Temis Flow, позволяющем строить численные модели, визуализирующие структуру и историю развития осадочного чехла, становление теплового режима бассейна, созревание в нефтегазоматеринских отложениях органического вещества и т. д.

На первом этапе работы на основе сформированного банка литостратиграфических характеристик горизонтов была построена численная *структурно-литологическая модель* осадочного чехла с заданными в каждой точке разреза базовыми литотипами, свойства которых (теплоемкость, теплопроводность, содержание радиоактивных элементов, реологические константы, определяющие зависимость уплотнения пород и изменения их пористости с глубиной) были взяты из библиотек программно-методического комплекса Temis Flow и по результатам петрофизических исследований керна Западной Сибири. В результате построений были реконструированы исходные толщины изучаемых стратиграфических интервалов методом разуплотнения разреза по схеме, предложенной К. Терцаги

[Terzaghi, 1932] и реализуемой в настоящее время в программных комплексах бассейнового моделирования [Hantschel, Kauerauf, 2009].

Следующим этапом было построение *термобарической модели*, описывающей температурную историю отложений, основное влияние на которую оказывают глубинные тепловые процессы и тепло радиоактивных источников в чехле. Для этого в программу были внесены значения отражательной способности витринита – природного максимального палеотермометра (данные А.Н. Фомина, ИНГГ СО РАН), с помощью которого можно оценить кумулятивный эффект воздействия на рассеянное ОВ температуры прогрева отложений на разных глубинах [Фомин, 2011; Конторович и др., 2013]. Распределение температур в осадочном чехле рассчитывалось на основе решения уравнения теплопереноса. Граничными условиями в модели являются значения среднегодовых температур на поверхности осадочного чехла и плотность теплового потока на нижней границе верхней мантии [Hantschel, Kauerauf, 2009].

Для калибровки принимаемой модели распределения тепла в системе задано условие действия постоянного теплового потока на нижней границе верхней мантии, варьируемым параметром являлись значения эффективной плотности палеотеплового потока. В результате серии выполненных вычислительных экспериментов путем подбора значений теплового потока на нижней границе верхней мантии для разрезов изучаемых скважин удалось добиться удовлетворительного соответствия расчетных и фактических значений отражательной способности витринита (R_o) (рис. 2).

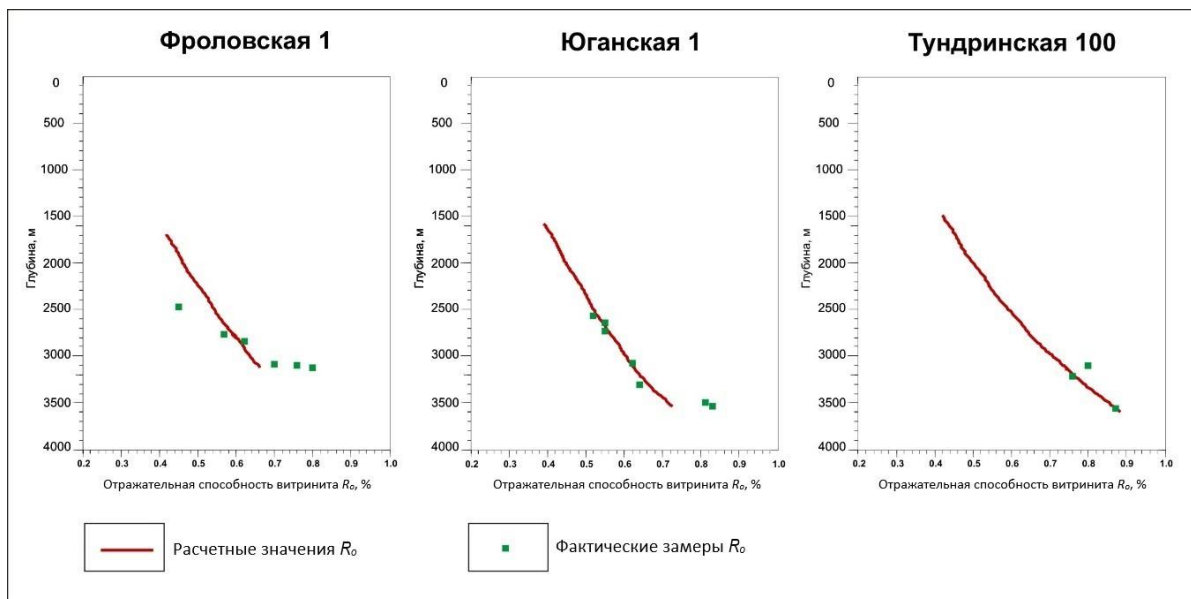


Рис. 2. Пример калибровки теплового потока в скважинах.

Итоговым этапом работы являлся анализ полученных с помощью одномерного моделирования результатов распределения значений плотности палеотеплового потока в основании осадочного чехла в пределах Мансийской синеклизы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Отложения осадочного чехла в Мансийской синеклизе представлены юрскими, меловыми, палеогеновыми и кайнозойскими породами. Толщина чехла изменяется от 3030 до 3600 м. Литологический

состав отложений модели определялся в соответствии с литотипами с известными петрофизическими свойствами. Разрез осадочного чехла представлен следующими литологическими типами: алевролиты – их доля в разрезе от 65 до 75 %, песчаники – от 11 до 20 %, аргиллиты от 6 до 10 %, кремни (опока) – порядка 5 %, известняки – 2–3 %. Наибольшее количество песчаных отложений приурочено к территориям южнее и западнее Сургутского свода. На юго-востоке Юганской мегавпадины в разрезе развиты угли – их доля порядка 3 %.

На графике (рис. 3) для каждой скважины приведена кривая изменения значений теплового потока во времени на границе основания осадочного чехла. На рисунке видно, что относительно постоянные значения интенсивности теплового потока на всей территории Ханты-Мансийской синеклизы первый раз были резко снижены на 5–7 мВ/м² в интервале 118–133 млн лет назад в нижнеаптско-валанжинское время. Следующее значительное снижение значений палеотеплового потока произошло порядка 90 млн лет назад в туронское время, оно наблюдается не на всей территории, а лишь в пределах восточной части Юганской мегавпадины.

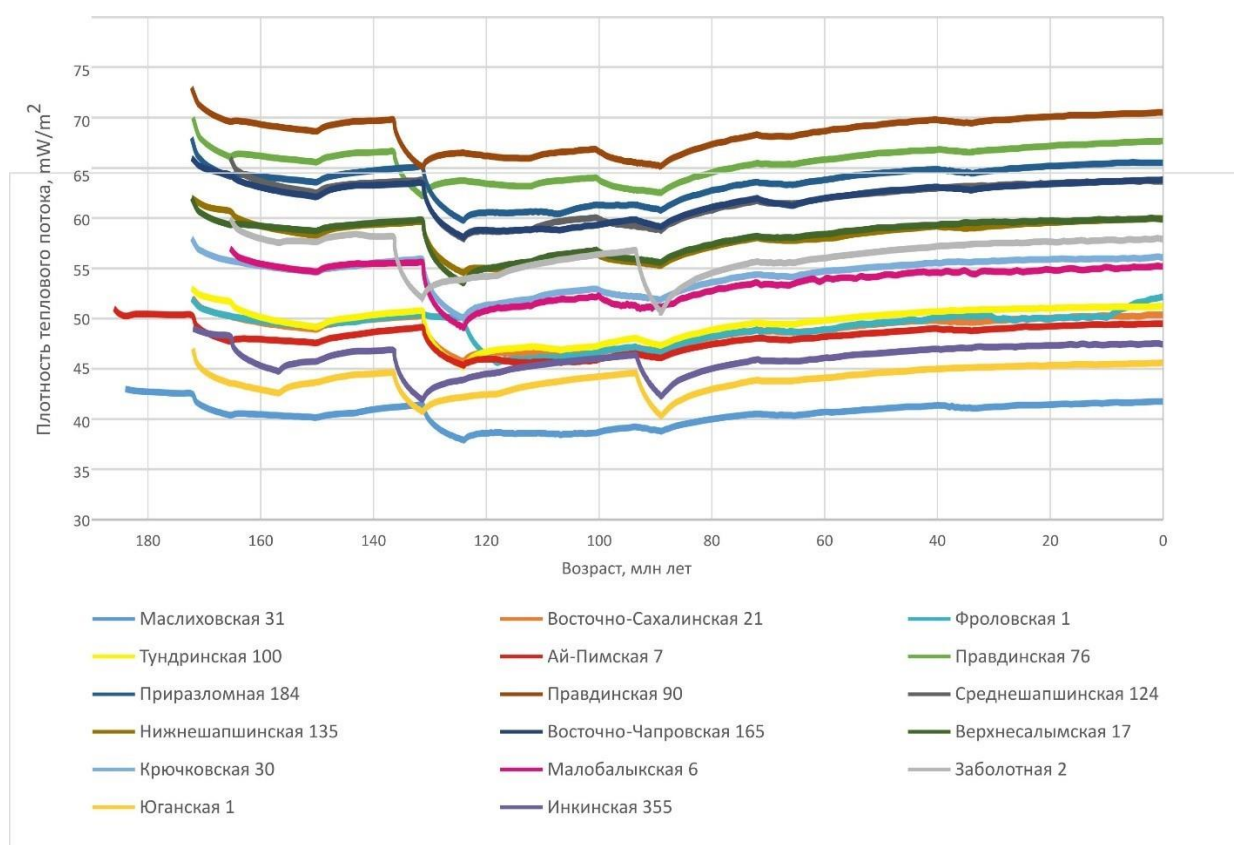


Рис. 3. Изменение плотности эффективного палеотеплового потока во времени на границе основания осадочного чехла.

Согласно выполненным построениям в пределах территории Мансийской синеклизы значения эффективной плотности палеотеплового потока изменяются от 38 до 73 мВ/м² (табл. 1, рис. 4). Среднее значение плотности составляет 54 мВ/м², модальное – 50 мВ/м² (см. рис. 4). Максимальные значения, порядка 62–73 мВ/м², выявлены в районах Правдинской, Приразломной, Среднешапшинской и Восточно-Чапровской площадей, минимальные от 38 до 42 мВ/м² – в пределах Маслиховской, Юганской и Инкинской.

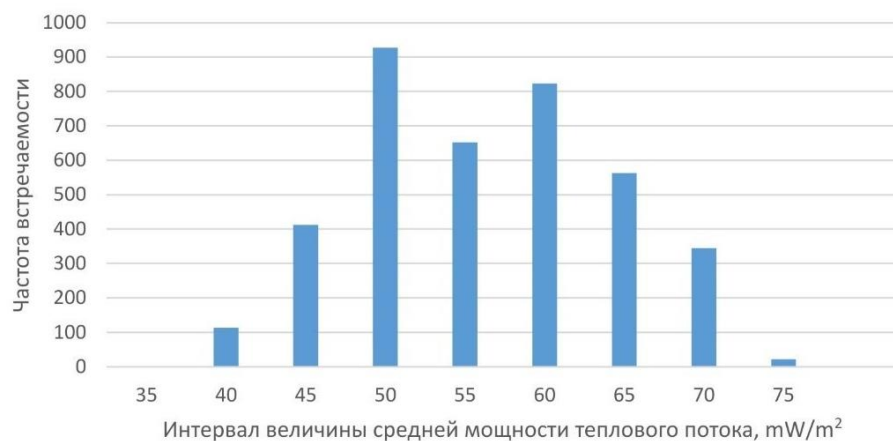


Рис. 4. Гистограмма распределения значений теплового потока через основание чехла. По оси абсцисс для каждого интервала указано его начало.

Таблица 1

Осредненная по времени плотность эффективного палеотеплового потока на границе основания осадочного чехла

Код скважины	Площадь, номер скважины	Средняя плотность эффективного палеотеплового потока в осадочном чехле, мВт/м ²
1	Маслиховская, 1	40
2	Восточно-Сахалинская, 21	48
3	Фроловская, 1	48
4	Ай-Пимская, 7	49
5	Тундринская, 100	47
6	Правдинская, 76	65
7	Приразломная, 184	63
8	Правдинская, 90	68
9	Среднешапшинская, 124	61
10	Нижнешапшинская, 43	57
11	Восточно-Чапровская, 165	61
12	Верхнесалымская, 17	57
13	Крючковская, 30	54
14	Малобалькская, 6	53
15	Заболотная, 2	55
16	Юганская, 1	43
17	Инкинская, 355	45

При изучении средних значений плотности теплового потока в скважинах (рис. 5), в зависимости от порядка величин, на диаграмме были выделены три группы скважин, которым соответствуют три области в пределах территории исследования (рис. 6).

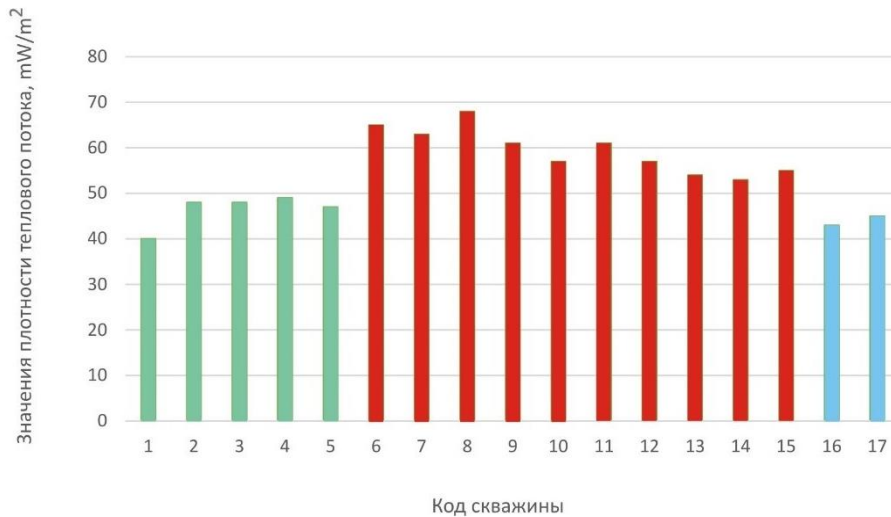


Рис. 5. Изменение средних значений плотности теплового потока в скважинах.

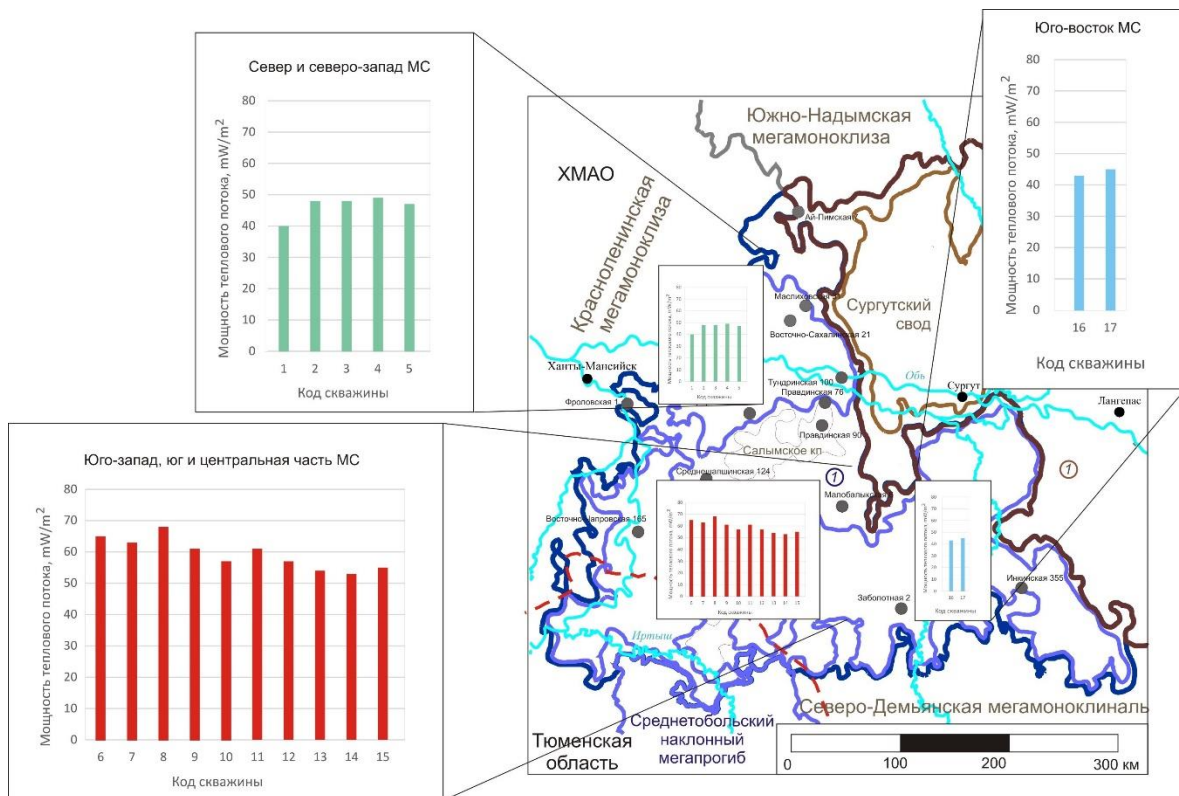


Рис. 6. Карта-схема значений плотности эффективного палеотеплового потока в пределах Мансийской синеклизы. МС – Мансийская синеклиза. Остальные усл. обозн. см. на рис. 1.

Первая область, занимающая большую часть территории Мансийской синеклизы, с наиболее высокими значениями – от 53 до 68 мВ/м², находится в центре, на юге и юго-западе. Она охватывает Нижнедемьянскую мегавпадину, западные и центральные районы Юганской мегавпадины, Салымское и Демьянское куполовидные мегаподнятия. Вторая область со значениями 40–49 мВ/м² оконтурена в пределах Тундринской мегавпадины и прилегающих районах, граничащих с Сургутским сводом и Красноленинской мегамоноклизой. Третья область со значениями 43–45 мВ/м² выделяется на востоке Юганской мегавпадины.

Выявленная в работе картина изменения значений плотности теплового потока с наличием аномалий согласуется с опубликованными ранее результатами исследований А.Р. Курчикова [2001], согласно которым в центральной части юга Западной Сибири выделяются дифференцированные области со значениями от 40 мВт/м² – в районе Сургутского свода, до 85 мВт/м² – в Салымском и Вартовском районах [Курчиков, 2001, с. 1847].

ВЫВОДЫ

В работе было выполнено одномерное численное моделирование для отложений осадочного чехла Мансийской синеклизы. С учетом калибровки тепловой истории региона оценена плотность эффективного палеотеплового потока на границе доюрского фундамента. В результате проведенных исследований было выявлено, что интенсивность палеотеплового потока в осадочном чехле Мансийской синеклизы не была постоянной во времени и различалась, в зависимости от территориальной принадлежности. На большей части синеклизы средние по времени значения теплового потока составляли от 53 до 68 мВ/м², на севере и северо-западе – порядка 50 мВ/м², на юго-востоке отмечается тенденция к снижению значений до 43–45 мВ/м².

Изучение геотермического режима недр, в частности интенсивности эффективного теплового потока, позволяет реконструировать температурную историю отложений региона на разных глубинах с целью оценки воздействия тепла на рассеянное ОВ в породах и проводить оценку (уточнение) перспектив нефтегазоносности на основе комплексного изучения геолого-геофизической информации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Геологическое** строение и перспективы нефтегазоносности Западно-Сибирской низменности / Под ред. Н.Н. Ростовцева. М.: Госгеолтехиздат, 1958. 391 с.
- Геология** и нефтегазоносность Западно-Сибирской низменности / Под ред. Д.В. Дробышева, В.П. Казаринова. Л.: ВНИГРИ, 1958. 274 с.
- Дучков А.Д.** Каталог данных по тепловому потоку Сибири (1966–1984). Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1985. 82 с.
- Конторович А.Э., Меленевский В.Н.** Учение о главной фазе нефтеобразования и его место в осадочно-миграционной теории нефтидогенеза // Известия АН СССР, Сер. геологическая. 1988. № 1. С. 3–13.
- Конторович А.Э., Бурштейн Л.М., Малышев Н.А., Сафронов П.И., Гуськов С.А., Ершов С.В., Казаненков В.А., Ким Н.С., Конторович В.А., Костырева Е.А., Меленевский В.Н., Лившиц В.Р., Поляков А.А., Скворцов М.Б.** Историко-геологическое моделирование процессов нефтидогенеза в мезозойско-кайнозойском осадочном бассейне Карского моря // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 8. С. 1179–1226. EDN:RAPIMR.
- Конторович В.А., Беляев С.Ю., Конторович А.Э., Красавчиков В.О., Конторович А.А., Супруненко О.И.** Тектоническое строение и история развития Западно-Сибирской геосинеклизы в мезозое и кайнозое // Геология и геофизика. 2001. Т. 42, № 11–12. С. 1832–1845. EDN:USJNNL.
- Кругликов Н.М., Нелюбин В.В., Яковлев О.Н.** Гидрогеология Западно-Сибирского нефтегазоносного мегабассейна и особенности формирования залежей углеводородов. Л.: Недра, 1985. 363 с. EDN:HQOXZQ.

- Курчиков А.Р.** Геотермический режим углеводородных скоплений Западной Сибири // Геология и геофизика. 2001. Т. 42, № 11–12. С. 1846–1853. EDN: KVKTJG.
- Курчиков А.Р., Ставицкий Б.П.** Геотермия нефтегазоносных областей Западной Сибири. М.: Недра, 1987. 134 с.
- Наливкин В.Д., Дедеев В.А., Иванцова В.В., Кац З.Я.** Сравнительный анализ нефтегазоносности и тектоники Западно-Сибирской и Турано-Скифской плит. Л.: Недра, 1965. 323 с.
- Нефтегазоносные бассейны и регионы Сибири.** Выпуск 2: Западно-Сибирский бассейн / Под ред. А.Э. Конторовича. Новосибирск: ОИГГиМ СО РАН, 1994. 201 с.
- Ставицкий Б.П., Курчиков А.Р., Белкина Б.В., Булгакова Н.Э., Кудрявый С.В.** Тепловой режим недр Западной Сибири. Изученность и особенности // Закономерности гидрохимии и геотермии недр Западной Сибири: Сб. статей. Тюмень: ЗапСибНИГНИ, 1981. С. 18–37.
- Сурков В.С., Трофимук А.А., Жеро О.Г., Конторович А.Э., Смирнов Л.В.** Перспективы поисков нефти в палеозойских и нижне-среднеюрских отложениях Мансийской синеклизы // Геология и геофизика. 1983. Т. 24, № 1. С. 16–24. EDN:BIWHHL.
- Фомин А.Н.** Катагенез органического вещества и нефтегазоносность мезозойских (юра, триас) и палеозойских отложений Западно-Сибирского мегабассейна. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2011. 331 с.
- Hantschel T., Kauerauf A.I.** Fundamentals of basin and petroleum systems modeling. Springer, Berlin, 2009. 476 p.
- Terzaghi K.** Die berechnung der durchlässigkeit des tones im verlauf der hydrodynamischen spannungserscheinungen // Szber Akademie Wissenschaft Vienna, Math–naturwissenschaft Klasse IIa. 1923. Vol. 132. P. 125–138.

REFERENCES

- Drobyshev D.V., Kazarinov V.P.** (Eds.). Geology and petroleum potential of the West Siberian plain (in Russ.). VNIGRI, Leningrad, 1958. 274 p.
- Duchkov A.D.** (Ed.). Heat flow in Siberia. A catalog (1966–1984) (in Russ.). IGIG SO AN SSSR, Novosibirsk, 1985. 82 p.
- Fomin A.N.** Catagenesis of organic matter and petroleum potential of Mesozoic (Jurassic, Triassic) and Paleozoic deposits of the West Siberian megabasin (In Russ.). INGG SO RAN, Novosibirsk, 2011. 331 p.
- Hantschel T., Kauerauf A.I.** Fundamentals of basin and petroleum systems modeling. Springer, Berlin, 2009. 476 p.
- Kontorovich A.E.** (Ed.). Petroleum basins and regions of Siberia: West Siberia basin (In Russ.). Novosibirsk, 1994. 201 p.
- Kontorovich A.E., Melenevskiy V.N.** Study of the main phase of oil formation and its place in the sedimentary migration theory of naftidogenesis // Izvestiya AN SSSR, Seriya Geologicheskaya. 1988. Vol. 1. P. 3–13. (In Russ.).
- Kontorovich A.E., Burshtein L.M., Malyshev N.A., Safronov P.I., Gus'kov S.A., Ershov S.V., Kazanekov V.A., Kim N.S., Kontorovich V.A., Kostyreva E.A., Melenevskiy V.N., Livshits V.R., Polyakov A.A., Skvortsov M.B.** Historical-geological modeling of hydrocarbon generation in the Mesozoic–Cenozoic sedimentary basin of the Kara Sea (basin modeling) // Russian Geology and Geophysics. 2013. Vol. 54 (8). P. 917–957. doi:10.1016/j.rgg.2013.07.011.

- Kontorovich V.A., Belyaev S.Yu., Kontorovich A.E., Krasavchikov V.O., Kontorovich A.A., Suprunenko O.I.** Tectonic structure and evolution of the West Siberian geosyncline in the Mesozoic and Cenozoic // Russian Geology and Geophysics. 2001. Vol. 42 (12). P. 1740–1753.
- Kruglikov N.M., Nelyubin V.V., Yakovlev O.N.** Groundwaters in the West Siberian petroleum province and implications for petroleum formation (In Russ.). Nedra, Leningrad, 1985. 363 p.
- Kurchikov A.R.** Geothermal regime of hydrocarbon deposits in West Siberia // Russian Geology and Geophysics. 2001. Vol. 42 (12). P. 1754–1761.
- Kurchikov A.R., Stavitsky B.P.** Geothermics of West Siberian petroleum provinces (In Russ.). Nedra, Moscow, 1987. 134 p.
- Nalivkin V.D., Dedeev V.A., Ivantsova V.V., Kats Z.Ya.** Comparative analysis of the oil and gas potential and tectonics of the West Siberian and Turanian–Scythian plates (In Russ.). Nedra, Leningrad, 1965. 323 p.
- Rostovtsev N.N.** (Ed.). Geological structure and petroleum potential of the West Siberian Plain (In Russ.). Gosgeoltechizdat, Moscow, 1958. 402 p.
- Stavitsky B.P., Kurchikov A.P., Belkina B.V., Bulgakova N.E., Kudryavyi S.V.** Thermal regime of the bowels of West Siberia. Study and features // Regularities of hydrochemistry and geothermy of the bowels of West Siberia (In Russ.). ZapSibNIGNI, Tyumen, 1981. P. 18–37.
- Surkov V.S., Trofimuk A.A., Zhero O.G., Kontorovich A.E., Smirnov L.V.** Oil exploration prospects in Paleozoic and Lower–Middle Jurassic deposits of the Mansiysk syncline // Geologiya i Geofizika. 1983. Vol. 24 (1). P. 16–24. (In Russ.).
- Terzaghi K.** Die berechnung der duerchl'assigkeitsziffer des tones im ver-lauf der hydrodynamischen spannungerscheinungen // Szber Akademie Wissenschaft Vienna, Math–naturwissenschaft Klasse Ila. 1923. Vol. 132. P. 125–138.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

ПОНОМАРЕВА Елена Владимировна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории теоретических основ прогноза нефтегазоносности Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: нефтяная геология, геохимия органического вещества, бассейновое моделирование.

*Статья поступила в редакцию 25 сентября 2025 г.,
одобрена после рецензирования 23 октября 2025 г.,
принята к публикации 24 октября 2025 г.*



ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА НА АМПЛИТУДУ СЕЙСМИЧЕСКОГО СИГНАЛА И ТОЧНОСТЬ АКУСТИЧЕСКОЙ ИНВЕРСИИ

Мargarita Сергеевна Голубева^{1,✉}, Nikita Алексеевич Горевячев², Georgiy Михайлович Митрофанов³

^{1,2,3}Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,

^{2,3}Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

¹m.golubeva1@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0009-0007-7122-9418>

²GoreyavchevNA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7741-5381>

³MitrofanovGM@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4203-2740>

Аннотация. Изучается влияние амплитудных искажений сейсмических данных, возникающих из-за неоднородной верхней части разреза (ВЧР), на точность акустической инверсии. Исследование выполнено с использованием синтетических сейсмических данных, полученных на основе конечно-разностного моделирования, и реальных данных. Приводятся результаты инверсии, демонстрирующие повышение ее точности и устойчивости после применения процедур поверхностно-согласованной коррекции амплитуд. Показана необходимость и рассмотрены вопросы оценки достоверности моделей, получаемых с использованием сейсмической инверсии, в условиях влияния неоднородной верхней части разреза.

Ключевые слова: сейсмические данные, акустическая инверсия, амплитудные искажения, верхняя часть разреза, поверхностно-согласованная коррекция амплитуд, сейсмическое моделирование

Финансирование: работа была выполнена при финансовой поддержке министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSUS-2025-0015), а также в рамках проекта FWZZ-2022-0017.

Для цитирования: Голубева М.С., Горевячев Н.А., Митрофанов Г.М. Влияние неоднородностей верхней части разреза на амплитуду сейсмического сигнала и точность акустической инверсии // Геофизические технологии. 2025. № 2. С. 37–50. doi:10.18303/2619-1563-2025-2-37.

EFFECT OF NEAR-SURFACE HETEROGENEITIES ON SEISMIC SIGNAL AMPLITUDE AND THE ACCURACY OF ACOUSTIC INVERSION

Margarita S. Golubeva^{1,✉}, Nikita A. Goreyavchev², Georgy M. Mitrofanov³

^{1,2,3}Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,

^{2,3}Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

¹m.golubeva1@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0009-0007-7122-9418>

²GoreyavchevNA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7741-5381>

³MitrofanovGM@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4203-2740>

Abstract. This study investigates the impact of amplitude anomalies caused by heterogeneities in the near-surface layer on the accuracy of acoustic inversion results. The analysis is based on both synthetic data, generated via finite-difference

modeling, and real seismic data. Inversion results demonstrate improved accuracy and stability after applying surface-consistent amplitude correction procedures. The study also investigates the reliability of models derived from seismic inversion under the influence of near-surface heterogeneity. The findings highlight the importance of evaluating the reliability of inversion-derived models when near-surface effects are present.

Keywords: seismic data, acoustic inversion, amplitude anomalies, near-surface section, surface-consistent amplitude correction, seismic modeling

Funding: the study is supported by grant FSUS-2025-0015 of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation and Project FWZZ-2022-0017.

For citation: Golubeva M.S., Goreyavchev N.A., Mitrofanov G.M. Effect of near-surface heterogeneities on seismic signal amplitude and the accuracy of acoustic inversion // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2025. No. 2. P. 37–50. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2025-2-37.

ВВЕДЕНИЕ

Современные проекты освоения месторождений углеводородов в значительной степени опираются на детальные геологические модели [Белкина и др., 2015]. Построение таких моделей интегрирует данные скважинных и сейсмических исследований. Они используются как для построения структурного каркаса, так и для прогнозирования свойств коллекторов в межскважинном пространстве [Ампилов и др., 2009].

Достоверность геологического моделирования напрямую зависит от качества обработки и интерпретации сейсмических данных. Методы динамической интерпретации, в частности сейсмическая инверсия, устанавливают количественную связь между параметрами сейсмической записи (амплитудой, фазой, частотой, затуханием) и петрофизическими параметрами горных пород [Simm, Bacon, 2014]. Однако корректность результатов инверсии крайне чувствительна к сохранению значений амплитуд на этапе обработки. Ошибки в определении значений амплитуд, в том числе связанные с недоучтенным влиянием неоднородностей верхней части разреза, приводят к систематическим погрешностям в оценке акустического импеданса и, как следствие, к существенным искажениям в итоговой геологической модели [Копенкин и др., 2013; Simm, Bacon, 2014].

В работе исследуется влияние амплитудных искажений, связанных с неоднородностью верхней части разреза (ВЧР), на результаты акустической инверсии. Для этого было выполнено моделирование синтетических сейсмических данных с их последующей обработкой. Проведено сравнительное исследование результатов инверсии исходных и искаженных данных. Кроме того, был выполнен анализ реальных сейсмических материалов с применением поверхностно-согласованной коррекции амплитуд и без нее.

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ

Для корректной оценки влияния амплитудных искажений на результаты интерпретации рассмотрим следующие моменты:

- природу этих искажений и их связь с верхней частью разреза;
- метод факторной декомпозиции, позволяющий компенсировать аномалии в сейсмических данных на этапе обработки;
- принцип работы инверсии и важность сохранения амплитуд данных при их обработке для ее выполнения.

Влияние ВЧР на амплитуду сейсмических сигналов

Рассмотрим подробнее влияние ВЧР как одного из основных факторов, вносящих амплитудные искажения. Амплитуда отраженной волны определяется контрастом упругих свойств на границе раздела сред. [Боганик, Гурвич, 2006]. Для корректного нахождения значений упругих параметров необходимо, чтобы амплитуды отражений не содержали искажений, связанных с распространением волны в среде, покрывающей целевую границу. Верхняя часть разреза или первый от поверхности интервал глубин – зона с выраженной изменчивостью свойств (рельеф, зона малых скоростей, многолетнемерзлые породы и др.). Эти неоднородности изменяют как кинематические, так и динамические параметры волнового поля, что проявляется в вариациях амплитуд при одинаковых условиях отражения [Давлетханов, 2017]. Зоны аномально высоких или низких амплитуд, вызванные неоднородностью приповерхностных условий, проявляются в виде сквозных амплитудных аномалий вдоль всей записи [Cary, Nagarajappa, 2013].

Устранение вариаций амплитуд, вызванных неоднородностями ВЧР

Одним из эффективных подходов к коррекции указанных вариаций является *поверхностно-согласованная коррекция амплитуд* (*Surface Consistent Amplitude Correction, SCAC*), основанная на принципах факторной декомпозиции. Применение SCAC обеспечивает выравнивание амплитуд по площади, улучшение разрешения сейсмических разрезов, что приводит к повышению достоверности динамической интерпретации [Гайдук и др., 2021; Кушнарев и др., 2021; Yatini, Rohman, 2023].

В основе лежит эвристическая модель разложения амплитуд сейсмического сигнала на мультипликативные составляющие, впервые предложенная И.И. Гурвичем [Гурвич, 1970], а потом многократно повторенная многими авторами, в частности, [Cary, Nagarajappa, 2013]:

$$A_{ij} = F \times A_i \times A_j \times A_{\frac{i+j}{2}} \times A_{i-j}, \quad (1)$$

где F – средняя амплитуда сигнала, определяемая через энергию рассматриваемого интервала записи, A_i – изменение амплитуды в области источника, A_j – изменение амплитуды в области приема, $A_{\frac{i+j}{2}}$ – изменение амплитуды в области отражения, A_{i-j} – изменение амплитуды в областях прохождения (рис. 1). Индексы i и j определяют номера источников и приемников в системе наблюдений. Они также однозначно задают географическое положение областей возбуждения и приема сейсмических колебаний.

Поскольку целью является проведение поверхностно-согласованной коррекции, ключевыми считаются факторы, которые могут быть отнесены к поверхности наблюдения. Поэтому в работе используется упрощенная двухфакторная модель, которая описывает вариации амплитуд, обусловленные влиянием областей расположения источников (A_i) и приемников (A_j). Амплитуда зарегистрированного сигнала в этой модели выражается как:

$$A_{ij} = F \times A_i \times A_j. \quad (2)$$

Решение уравнения (2) является нелинейной задачей. Для разделения амплитудных составляющих используют линеаризованное представление модели, которое можно получить, взяв логарифм всего выражения:

$$\ln A_{ij} = \ln F + \ln A_i + \ln A_j. \quad (3)$$

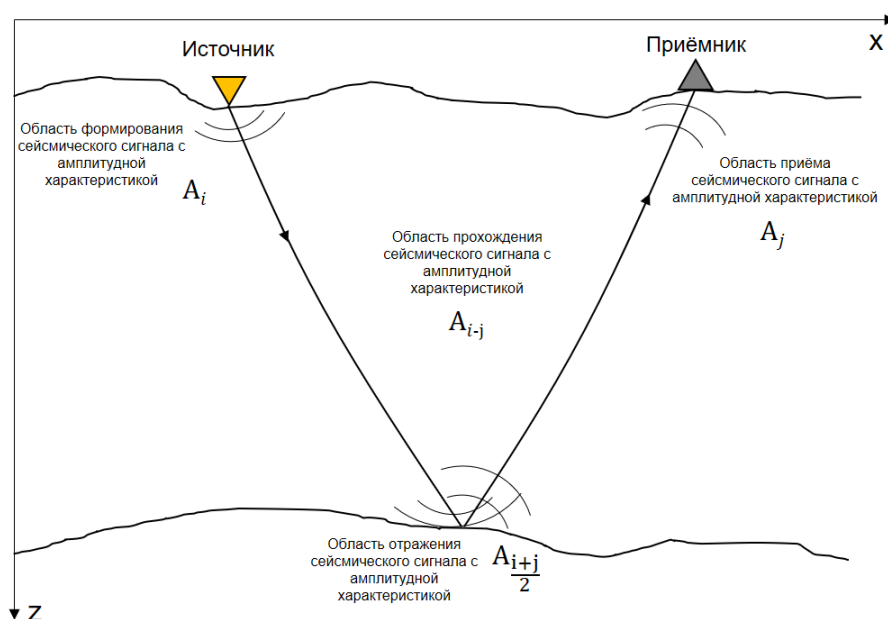


Рис. 1. Изменения амплитуды сигнала.

Линеаризованная модель позволяет использовать современные методы решения систем линейных уравнений [Митрофанов и др., 2023] для получения значений $\ln A_i$, $\ln A_j$ и A_i , A_j соответственно. Полученные значения позволяют выполнять коррекцию значений A_{ij} , устраняя влияние верхней части разреза на амплитуду регистрируемых сейсмических сигналов, приводя их к единой средней амплитуде сигнала.

Сейсмическая инверсия и роль амплитуд в определении акустического импеданса

Результатом динамической обработки являются сейсмические разрезы или кубы, для которых амплитуды отражений скорректированы с учетом кинематических и динамических искажений. С их использованием выполняется *сейсмическая инверсия* – преобразование амплитудных данных в упругие параметры среды, такие как акустический импеданс, сдвиговый импеданс, отношение скоростей V_P/V_S и плотность [Roberts et al., 2005]. В основе метода лежит сверточная модель, согласно которой наблюдаемые сейсмические трассы рассматриваются как результат свертки наблюдаемого импульса с последовательностью коэффициентов отражения [Simm, Bacon, 2014].

Цель *инверсии в акустической постановке* – определение зависимости акустического импеданса от времени по записи отраженных волн при нормальном падении. Акустический импеданс определяется выражением:

$$AI = V_p \times \rho \quad (4)$$

где V_p – скорость продольной сейсмической волны, ρ – плотность среды.

Для обеспечения устойчивости решения используется *низкочастотная модель акустического импеданса*, построенная по данным скважинных измерений [Simm, Bacon, 2014]. Эта модель служит начальным низкочастотным приближением, которое итеративно уточняется в процессе инверсии путем минимизации невязки между синтетическими и наблюдаемыми сейсмическими трассами [Simm, Bacon, 2014].

Точность акустической инверсии напрямую определяется амплитудами сейсмического сигнала, поскольку именно они отражают контрасты упругих свойств между слоями. Искажения амплитуд при регистрации или обработке снижают достоверность оценки акустического импеданса и, как следствие, коллекторских свойств, особенно в неантиклинальных ловушках и зонах со сложным строением разреза [Боганик, Гурвич, 2006; Копенкин и др., 2013]. Такие искажения могут маскировать истинные геологические аномалии, что приводит к ошибкам при восстановлении упругих свойств. Поэтому корректное восстановление амплитуд является необходимым условием для получения надежных инверсионных моделей.

МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

В работе использовалось двумерное конечно-разностное акустическое моделирование [Köhn, 2011]. Параметры наблюдения: длина 2000 м и шаг между приемниками 10 м. Моделирование производилось с использованием импульса Рикера частотой 25 Гц. Система наблюдений была задана следующим образом: 160 физических наблюдений с перекрытием 50 м. Общая длина наблюдений – 10 000 м. На основе упрощенной горизонтально-слоистой модели были рассчитаны синтетические данные и сформированы временные разрезы как для исходных амплитуд, так и для амплитуд с заданными искажениями (рис. 2).

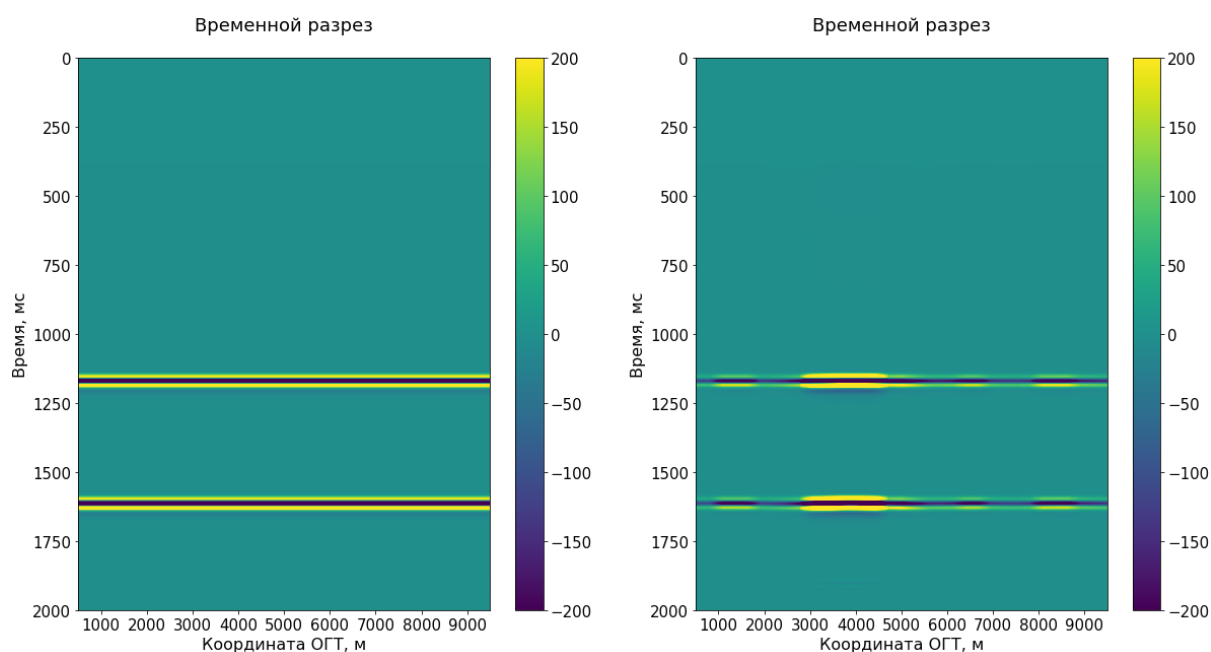


Рис. 2. Слева: временной разрез по исходным данным, справа: временной разрез по искаженным данным, осложненным влиянием неоднородностей ВЧР.

В качестве ключевого фактора влияния на амплитуды рассматриваются условия возбуждения и приема, характерные для регионов Западной Сибири. Понимание этих условий позволяет корректно создать синтетические данные, соответствующие реальному эксперименту.

Для моделирования амплитудных аномалий сигнала был выбран типичный для Западной Сибири сейсмический профиль, характеризующийся контрастными приповерхностными условиями (рис. 3). Амплитудные коэффициенты коррелировали с рельефом и определялись как функция от абсолютных отметок (рис. 4). Искажения задавались по двухфакторной схеме, имитирующей зональное влияние в

областях возбуждения и приема: речные долины соответствовали усилению сигнала, болота и торфяники – его ослаблению, а песчаные толщи и заболоченные леса – промежуточным значениям (рис. 5).

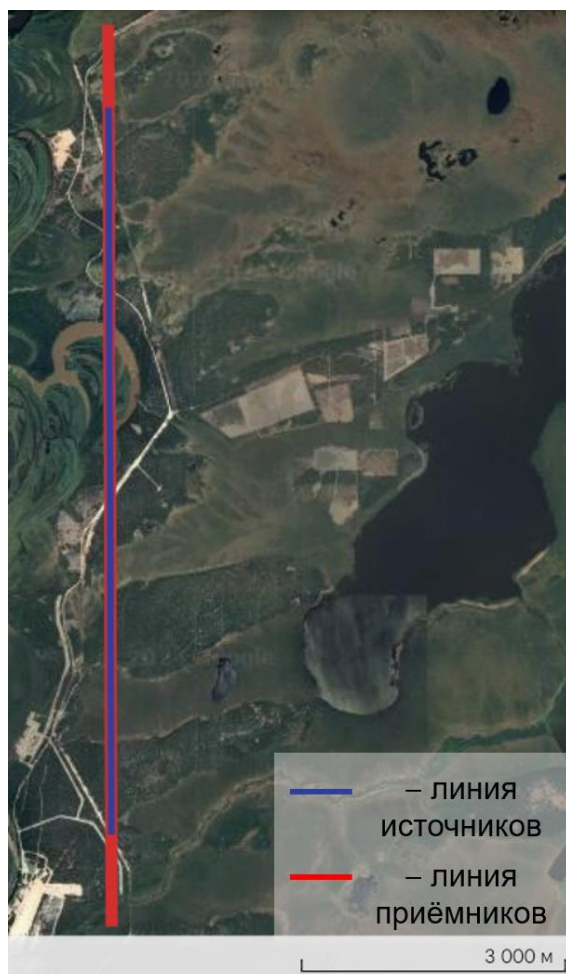


Рис. 3. Поверхностные условия вдоль профиля наблюдений.

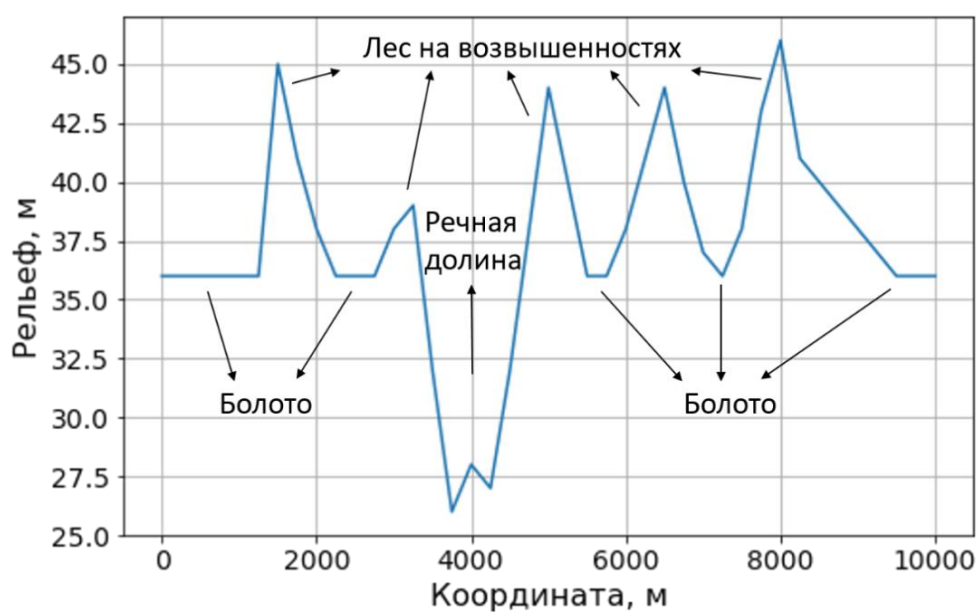


Рис. 4. Абсолютные отметки рельефа вдоль профиля.

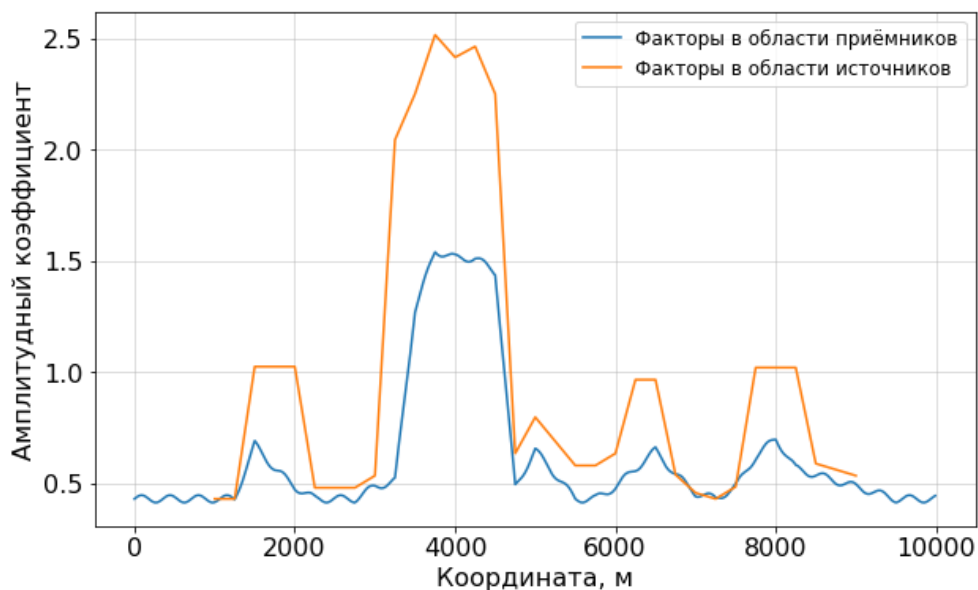


Рис. 5. Вносимые вдоль профиля амплитудные коэффициенты, отвечающие за влияние области источников (оранжевые) и области приемников (синие).

Сравнение временных разрезов показало, что внесенные вариации приводят к сквозным зонам усиления или ослабления сигнала вдоль всего разреза, что соответствует проявлениям реальных эффектов ВЧР.

В результате инверсии были получены разрезы акустического импеданса по исходным данным и данным с внесенными амплитудными искажениями (рис. 6). Сравнительный анализ показал, что искажения вызывают систематические ошибки в восстановлении упругих параметров, достигающие 20 % на отдельных границах. Это приводит к снижению контрастности отражающих горизонтов. Наличие устойчивой зависимости между смоделированными аномалиями и результатами инверсии подтверждается при детальном рассмотрении: в зонах ослабления амплитуд наблюдается ухудшение дифференциации границ, тогда как в областях их усиления фиксируются anomalously высокие значения акустической жесткости. Количественной оценкой данного эффекта служит распределение среднеквадратичных значений импеданса в окне на границе слоев 2 и 3 (рис. 7).

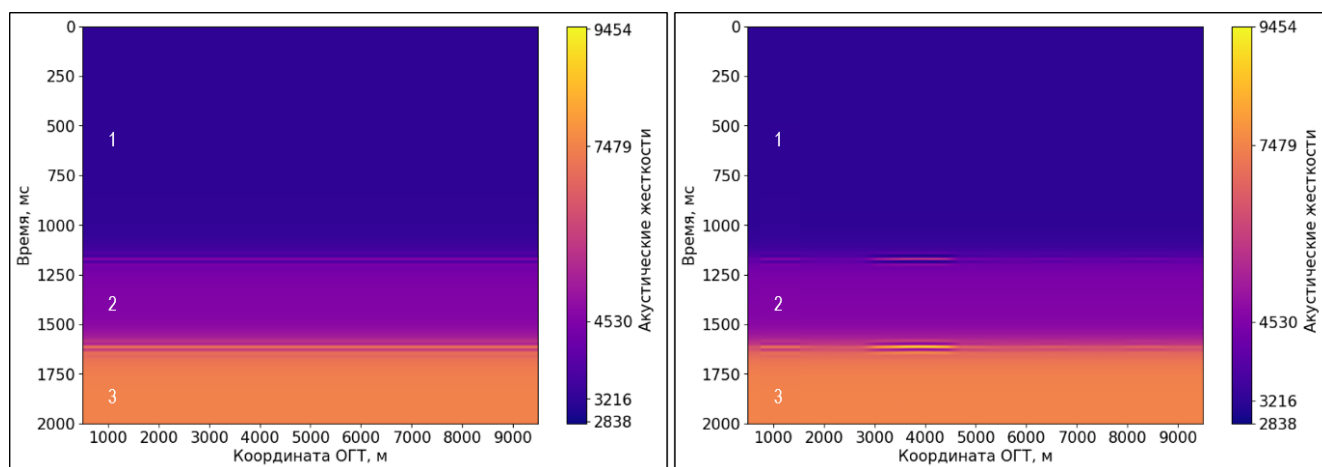


Рис. 6. Результаты акустической инверсии на основе данных до (слева) и после (справа) внесения модельных искажений. Цифрами 1, 2, 3 обозначены слои модели.

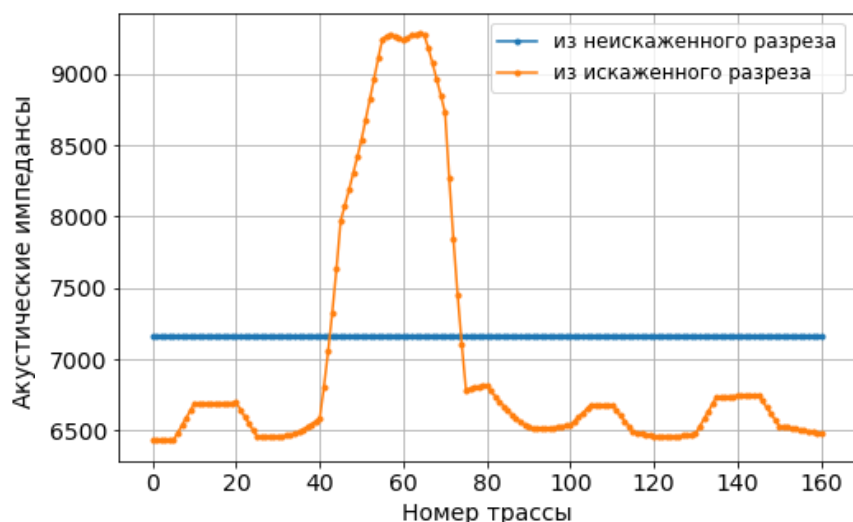


Рис. 7. Сравнение среднеквадратичных амплитуд акустического импеданса (в м/с·г/см³) в окне на границе слоев 2 и 3.

ЭКСПЕРИМЕНТ НА РЕАЛЬНЫХ ДАННЫХ

После анализа влияния амплитудных искажений на результаты акустической инверсии следующим этапом стало исследование возможности повышения ее качества за счет компенсации искажений в реальных сейсмических данных, полученных на участке Западно-Зимнего нефтяного месторождения.

Использованная для интерпретации пара временных разрезов была получена в программном обеспечении G2¹ после стандартной последовательности процедур сейсмической обработки: геометризации, сортировки трасс, подавления поверхностных волн, компенсации сферического расхождения, мьютинга и полосовой фильтрации. Отличие между ними заключалось в том, что для одного набора данных дополнительно выполнялась SCAC и связанные с ней итерации статики, что позволило построить вариант разреза с учетом влияния приповерхностных условий. Второй набор обрабатывался по аналогичной схеме, но без данной коррекции.

Оба варианта временных разрезов были использованы в качестве входных данных для проведения акустической детерминистической инверсии с целью оценки влияния поверхностно-согласованной коррекции амплитуд на получаемые результаты. Для проведения инверсии также были подготовлены входные данные, получаемые с использованием скважинной информации. Низкочастотная модель акустического импеданса была построена на основе акустического и гамма-гамма плотностного каротажа с фильтрацией до 10 Гц – частоты, ниже которой в сейсмическом спектре отсутствует информация. С использованием полученных ранее временных разрезов восстановлены сейсмические импульсы [Cui, Margrave, 2014].

После подготовки входных данных и выполнения акустической инверсии для обоих вариантов сейсмических разрезов была проведена их сравнительная оценка. Сопоставление временных разрезов демонстрирует, что в отсутствие поверхностно-согласованной коррекции амплитуд наблюдается артефакт в виде сквозных полос, прослеживающихся на всей протяженности разреза (рис. 8, а). Эти искажения амплитуд привели к неоднородному распределению акустических импедансов в результате инверсии (рис. 8, б).

¹ [<https://www.geoleader.ru/index.php/ru/produkty-ru/geovation-2>]

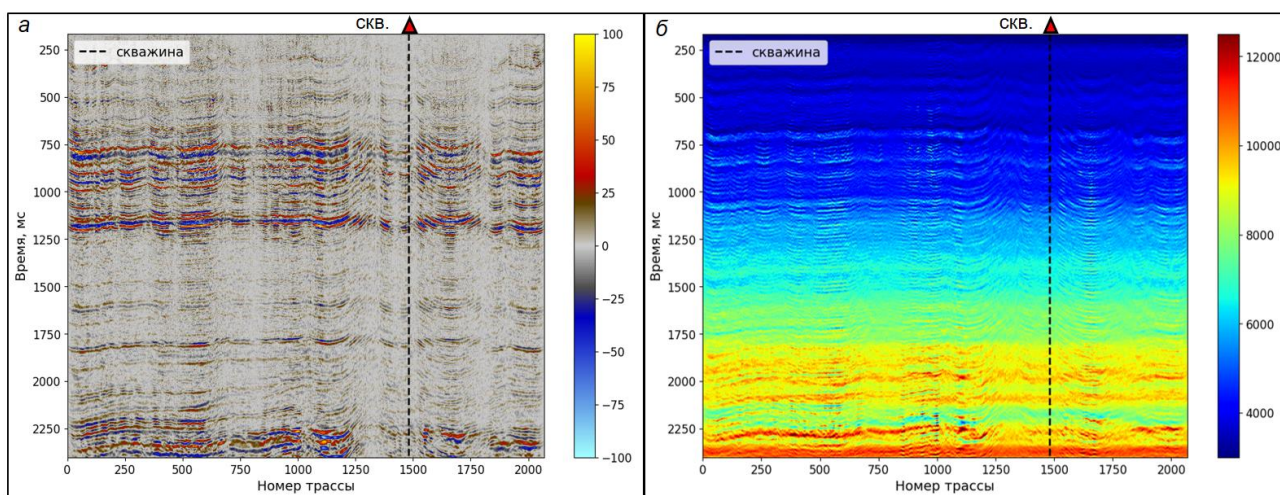


Рис. 8. Временной разрез без проведения поверхностно-согласованной коррекции амплитуд (а) и соответствующий ему разрез акустических импедансов (в $\text{м/с} \cdot \text{г/см}^3$) (б).

Применение поверхностно-согласованной коррекции амплитуд на этапе обработки снизило влияние поверхностных условий на амплитуды сигнала (рис. 9, а). Полосчатость в амплитудах уменьшилась, что позволило получить более выдержанное распределение акустических жесткостей по разрезу (рис. 9, б).

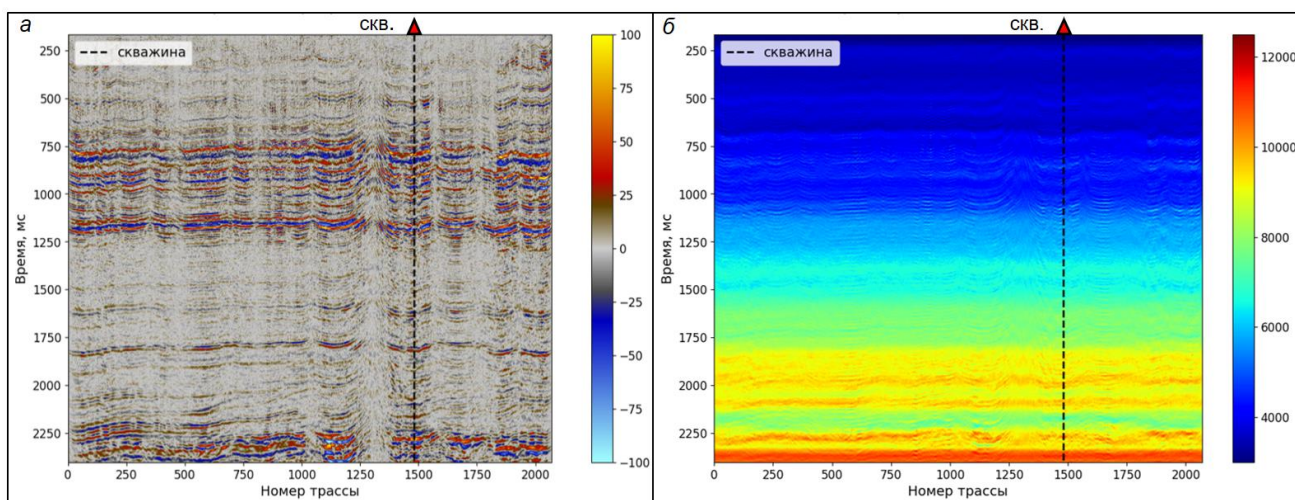


Рис. 9. Временной разрез с проведенной поверхностно-согласованной коррекцией амплитуд (а) и соответствующий ему разрез акустических импедансов (в $\text{м/с} \cdot \text{г/см}^3$) (б).

Для контроля качества результатов акустической инверсии в обоих рассматриваемых случаях и их сравнения между собой была проведена оценка достоверности полученных моделей. Она заключалась в корреляционном сопоставлении восстановленных кривых акустического импеданса с данными каротажа, выполненного в скважине (кривая импедансов по данным геофизических исследований скважин (ГИС) приведена в сейсмическом диапазоне частот – до 65 Гц), а также в анализе пространственного распределения среднеквадратичных значений импеданса вдоль разреза. Эти показатели позволяют количественно оценить степень соответствия полученных моделей реальным геолого-геофизическим

условиям и выявить участки с пониженной надежностью инверсии, указывающие на понижение достоверности получаемых результатов.

Коэффициенты корреляции между кривыми, соответствующими каждой отдельной сейсмической трассе, представлены на рис. 10. Сравнительный анализ, показанный на этом рисунке, демонстрирует существенное влияние амплитудной коррекции на однородность восстановления импеданса. После применения коррекции с использованием процедуры SCAC (на рис. 10 обозначены красным цветом) кривые импеданса демонстрируют высокую степень корреляции по всей протяженности разреза. При отсутствии коррекции («без SCAC» на рис. 10) сопоставимость кривых ограничена участками с минимальным влиянием приповерхностной зоны.

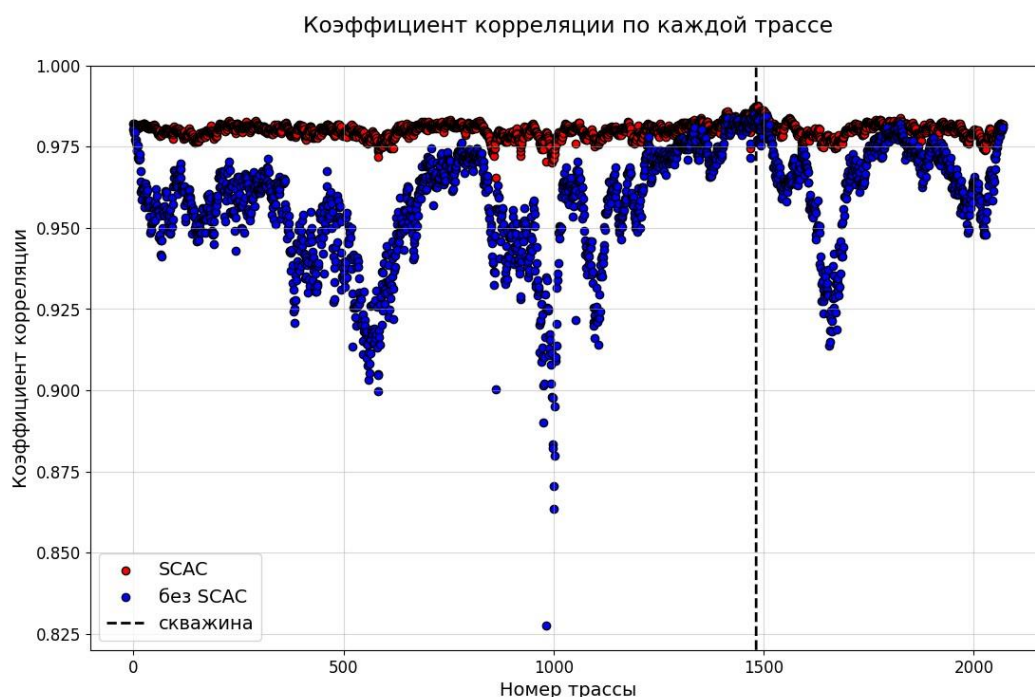


Рис. 10. Корреляция решения с каротажными данными.

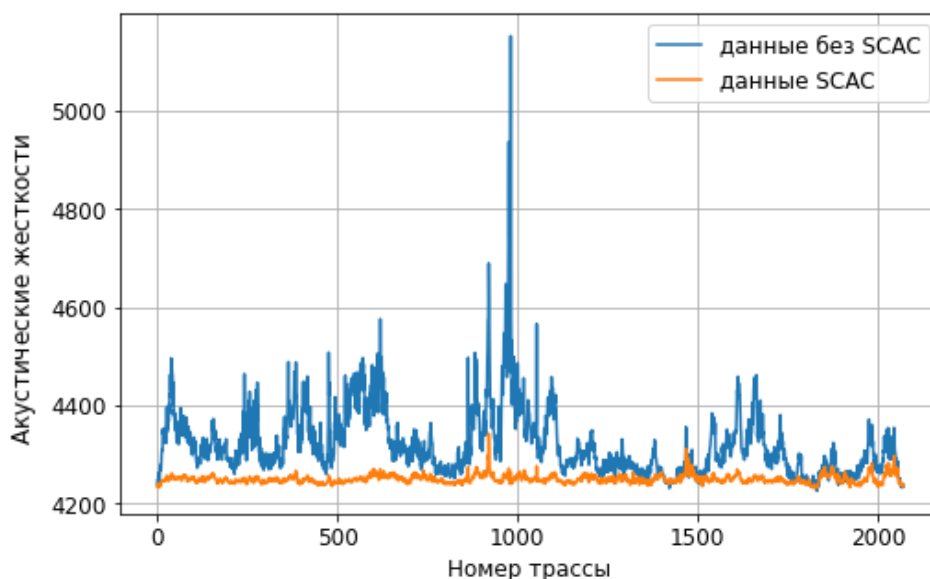


Рис. 11. Распределение среднеквадратичного импеданса (в $\text{м/с} \cdot \text{г/см}^3$) вдоль разреза в окне 750–1000 мс.

Распределение среднеквадратичного импеданса вдоль разреза анализировалось в двух временных интервалах: 750–1000 мс ближе к верхней части разреза (рис. 11) и окно 2250–2400 мс в области нижних горизонтов изучаемого разреза (рис. 12).

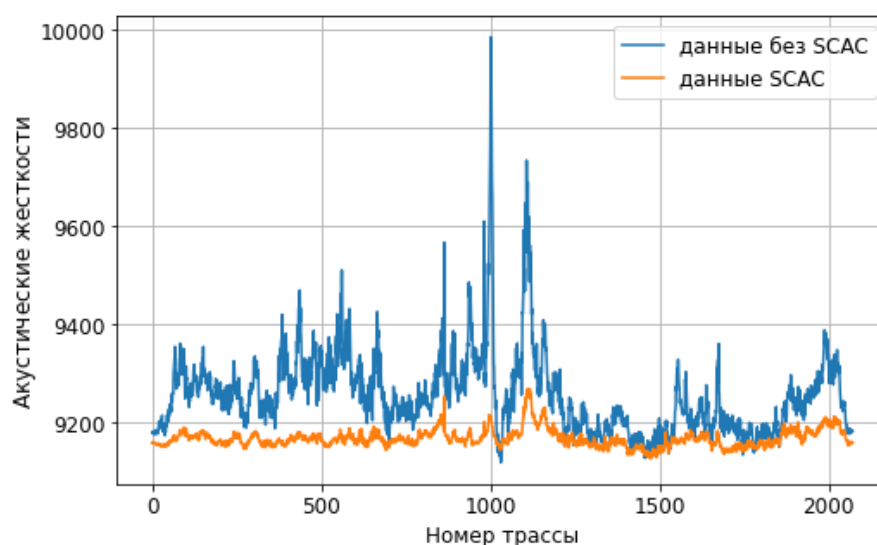


Рис. 12. Распределение среднеквадратичного импеданса (в м/с·г/см³) вдоль разреза в окне 2250–2400 мс.

Анализ аномалий, представленных на рис. 11 и 12, показывает, что искажения импеданса распространяются по всему разрезу, и при интерпретации целевых горизонтов возможны ошибочные оценки свойств отдельных участков разреза.

Согласно полученным результатам, влияние ВЧР приводит к изменению отклика среды и искажению структуры горизонтов. Хотя инверсия без предварительной поверхностно-согласованной коррекции амплитуд может давать визуально более детализированную картину, это сопряжено с высоким риском получения артефактов, которые не будут иметь геологического подтверждения. Это особенно важно, когда требуется сделать прогноз свойств по разрезу в условиях наличия ограниченной априорной геологической информации из-за малого количества скважин. Так, могут выстраиваться ошибочные гипотезы в отношении сложности коллектора или проявлении коллекторских свойств. Например, при построении карт акустического импеданса латеральные вариации его значений могут быть неверно интерпретированы как следствие изменения пористости или изменения других свойств коллектора; также возможно ошибочное прогнозирование зон флюидонасыщения по пониженным значениям импеданса на фоне соседних завышенных из-за влияния приповерхностных условий значений.

Таким образом, использование сейсмических данных с проведенной процедурой SCAC и данных без ее применения приводит к получению разных в геологическом плане моделей. Динамическая обработка позволяет получить несколько иное восприятие разреза и установить, что некоторые неоднородности, наблюдаемые на разрезе, могут иметь не геологическую природу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование демонстрирует связь между этапами обработки и интерпретации сейсмических данных. В частности, установлено, что поверхностно-согласованная коррекция амплитуд является важным этапом, предопределяющим достоверность результатов акустической инверсии.

Исключение SCAC из графа обработки усиливает влияние верхней части разреза, что проявляется в виде артефактов на разрезах импеданса. Полученные результаты показывают, что наличие или отсутствие учета влияния амплитудных искажений на этапе обработки существенно влияет на характер восстанавливаемой модели и способно привести к принципиально различным геологическим интерпретациям.

Таким образом, исследование подчеркивает необходимость учета влияния верхней части разреза и анализа стационарности получаемых результатов инверсии при оценке достоверности моделей сейсмической инверсии в процессе сопоставления полученных результатов со скважинными данными и анализа пространственного распределения восстановленных параметров. Такой подход позволяет минимизировать систематические ошибки и повысить обоснованность прогнозирования свойств пластов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Ампиров Ю.П., Барков А.Ю., Яковлев И.В., Филиппова К.Е., Приезжев И.И. Почти всё о сейсмической инверсии. Часть 1 // Технологии сейсморазведки. 2009. № 4. С. 3–16. EDN:LUNKQLQ.

Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсморазведка: Учебник для вузов. Тверь: Издательство АИС, 2006. 744 с.

Белкина В.А., Бембель С.Р., Забоева А.А., Санькова Н.В. Основы геологического моделирования. Часть 1: Уч. пособие. Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. 167 с.

Гайдук А.В., Твердохлебов Д.Н., Данько Е.А., Долгова Е.И., Клешнин А.Б., Гринченко В.А., Гогужева Е.И., Чиргун А.С. Эффективные технологии сейсморазведки для новых геологических открытий в Восточной Сибири // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12, № 3S. С. 683–702. doi:10.5800/GT-2021-12-3s-0547.

Гурвич И.И. О теоретических основах динамических измерений в сейсморазведке // Известия вузов. Геология и разведка. 1970. № 6. С. 108–113.

Давлетханов Р.Т. Коррекция сейсмических записей за влияние верхней части разреза с сохранением кинематики отраженных волн, соответствующих пластовой модели среды: автореф. дисс. канд. физ.-мат. наук (спец. 25.00.10). М.: МГУ, 2017. EDN:ZQDNAH.

Копенкин Р.Ю., Кирьянова Т.Н., Кляжников Д.В. Оценка эффективности технологии сейсмической инверсии на этапе постановки задачи // Нефтяное хозяйство. 2013. № 5. С. 49–51. EDN:QAEDGZ.

Кушнарев Р.С., Горяевчев Н.А., Митрофанов Г.М. Тестирование матричной реализации алгоритма поверхностно-согласованной компенсации сейсмических амплитуд // Геофизические технологии. 2021. № 4. С. 26–35. doi:10.18303/2619-1563-2021-4-26. EDN:HYWTVM.

Митрофанов Г.М., Горяевчев Н.А., Кушнарев Р.С. Возможности факторной декомпозиции при реализации процедур обработки и интерпретации геофизических данных // Санкт-Петербург 2023. Геонауки: время перемен, время перспектив: Сб. мат. конф. СПб: ООО Геомодель, 2023. С. 303–306. EDN:WCMKTP.

Sary P., Nagarajappa N. A new, simple approach to surface-consistent scaling // CSEG Recorder. 2013. Vol. 38 (10). P. 38–43.

Cui T., Margrave G.F. Seismic wavelet estimation // CREWES Research Report. 2014. Vol. 26. P. 1–16.

Köhn D. Time domain 2D elastic full waveform tomography: PhD Thesis. Kiel: Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2011. 177 p.

- Roberts R., Bedingfield J., Phelps D., Lau A., Godfrey B., Volterrani S., Engelmark F., Hughes K.** Hybrid inversion techniques used to derive key elastic parameters: A case study from the Nile Delta // *The Leading Edge*. 2005. Vol. 24 (1). P. 86–92. doi:10.1190/1.1859708.
- Yatini Y., Rohman H.R.N.** An application of surface consistent amplitude correction (SCAC) in the "HRNR" field // *Indonesian Applied Physics Letters*. 2023. Vol. 4 (2). P. 65–75. doi:10.20473/iapl.v4i2.49910.
- Simm R., Bacon M.** *Seismic amplitude: An interpreter's handbook*. Cambridge University Press, Cambridge, 2014. 264 p. doi:10.1017/CBO9780511984501.

REFERENCES

- Ampilov Yu.P., Barkov A.Yu., Yakovlev I.V., Filippova K.E., Priezzhev I.I.** Almost everything about seismic inversion. Part 1 // *Seismic Technologies*. 2009. No. 4. P. 3–16. (In Russ.).
- Belkina V.A., Bembel S.R., Zaboeva A.A., Sankova N.V.** *Fundamentals of geological modeling. Part 1: Textbook* (In Russ.). Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, 2015. 167 p.
- Boganik G.N., Gurvich I.I.** *Seismic exploration: Textbook for universities* (In Russ.). AIS Publishing House, Tver, 2006. 744 p.
- Cary P., Nagarajappa N.** A new, simple approach to surface-consistent scaling // *CSEG Recorder*. 2013. Vol. 38 (10). P. 38–43.
- Cui T., Margrave G.F.** *Seismic wavelet estimation* // *CREWES Research Report*. 2014. Vol. 26. P. 1–16.
- Davletkhanov R.T.** *Correction of seismic records for the influence of the upper part of the section while preserving the kinematics of reflected waves corresponding to the layered model of the medium: PhD Thesis*. (In Russ.). MSU, Moscow, 2017.
- Gaiduk A.V., Tverdokhlebov D.N., Danko E.A., Dolgova E.I., Kleshnin A.B., Grinchenko V.A., Goguzeva E.I., Chirgun A.S.** Effective seismic technologies for new geological discoveries in East Siberia // *Geodynamics and Tectonophysics*. 2021. Vol. 12 (3S). P. 683–702. doi:10.5800/GT-2021-12-3s-0547.
- Gurvich I.I.** On the theoretical foundations of dynamic measurements in seismic exploration // *Izvestiya vuzov. Geology and Exploration*. 1970. No. 6. P. 108–113. (In Russ.).
- Köhn D.** *Time domain 2D elastic full waveform tomography: PhD Thesis*. Kiel: Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2011. 177 p.
- Kopenkin R.Yu., Kiryanova T.N., Klyazhnikov D.V.** Seismic inversion feasibility assessment in the stage of problem setting // *Oil Industry*. 2013. No. 5. P. 49–51 (In Russ.).
- Kushnarev R.S., Goreyavchev N.A., Mitrofanov G.M.** Testing the matrix implementation of the algorithm for surface-consistent compensation of seismic amplitudes // *Russian Journal of Geophysical Technologies*. 2021. No. 4. P. 26–35. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2021-4-26.
- Mitrofanov G.M., Goreyavchev N.A., Kushnarev R.S.** Possibilities of factor's decomposition in the implementation of procedures for processing and interpreting geophysical data // *St. Petersburg 2023. Geosciences: a time of change, a time of prospects. Geomodel*, St. Petersburg, 2023. P. 303–306. (In Russ.).
- Roberts R., Bedingfield J., Phelps D., Lau A., Godfrey B., Volterrani S., Engelmark F., Hughes K.** Hybrid inversion techniques used to derive key elastic parameters: A case study from the Nile Delta // *The Leading Edge*. 2005. Vol. 24 (1). P. 86–92. doi:10.1190/1.1859708.
- Simm R., Bacon M.** *Seismic amplitude: An interpreter's handbook*. Cambridge University Press, Cambridge, 2014. 264 p. doi:10.1017/CBO9780511984501.

Yatini Y., Rohman H.R.N. An application of surface consistent amplitude correction (SCAC) in the "HRNR" field // Indonesian Applied Physics Letters. 2023. Vol. 4 (2). P. 65–75. doi:10.20473/iapl.v4i2.49910.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ГОЛУБЕВА Маргарита Сергеевна – магистрант Новосибирского государственного университета, инженер-исследователь лаборатории обработки и анализа сейсмических данных научно-образовательного центра “Газпромнефть-НГУ”. Основные научные интересы: динамическая обработка и интерпретация сейсмических данных, комплексная интерпретация данных ГИС и сейсморазведки.

ГОРЕЯВЧЕВ Никита Алексеевич – научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, младший научный сотрудник научно-образовательного центра “Газпромнефть-НГУ”, старший преподаватель кафедры геофизики ГГФ НГУ. Основные научные интересы: методы повышения эффективности обработки геофизических данных.

МИТРОФАНОВ Георгий Михайлович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, доцент кафедры геофизики ГГФ НГУ. Основные научные интересы: обработка и интерпретация геофизических данных, методы решения обратных задач.

Вклад авторов: в рамках проекта № FSUS-2025-0015: Голубева М.С. – подготовка данных и тестирование математического алгоритма, Горевячев Н.А. – реализация математического алгоритма. Митрофанов Г.М. сформулировал постановку задачи при поддержке проекта Минобрнауки РФ FWZZ-2022-0017.

*Статья поступила в редакцию 29 октября 2025 г.,
одобрена после рецензирования 17 ноября 2025 г.,
принята к публикации 18 ноября 2025 г.*



ФОРМАЛЬНЫЕ КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕЛЯЦИИ РАЗРЕЗОВ СКВАЖИН

Владимир Валентинович Лапковский¹, Василиса Ивановна Шелудько^{2,✉}

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

^{1,2}Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия,

¹LapkovskiiVV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6786-9101>

²vasilisasheludko@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0007-5385-6872>

Аннотация. Предлагаются и сравниваются формализованные критерии качества автоматической корреляции скважин. Рассмотрены три показателя: ошибка прогноза значений каротажных кривых на основе кросс-валидации; отношение средней внутригрупповой дисперсии к общей дисперсии данных; среднеквадратическое отклонение глубин набора стратиграфических границ от эталонной модели. Показана очень тесная статистическая связь для первых двух критериев, но в силу сравнительной простоты вычисления более предпочтительным оказывается второй из них. Критерий, связанный с оценкой отклонения от эталонной модели (созданной экспертом), может использоваться в машинном обучении для практических задач, но малоприменим, поскольку требует предварительного построения эталонной модели.

Ключевые слова: автоматическая корреляция разрезов скважин, ранжирование корреляционных моделей, стратиграфическая корреляция, критерии качества корреляции

Финансирование: исследование выполнено по плану базовых научно-исследовательских работ ИНГГ СО РАН (проект Минобрнауки РФ FWZZ-2022-0009).

Для цитирования: Лапковский В.В., Шелудько В.И. Формальные критерии качества автоматической корреляции разрезов скважин // Геофизические технологии. 2025. № 2. С. 51–59. doi:10.18303/2619-1563-2025-2-51.

FORMAL QUALITY CRITERIA FOR AUTOMATIC CORRELATION OF WELL LOGS

Vladimir V. Lapkovsky¹, Vasilisa I. Sheludko^{2,✉}

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

^{1,2}Novosibirsk State Technical University, K. Marks Ave., 20, Novosibirsk, 630073, Russia,

¹LapkovskiiVV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6786-9101>

²vasilisasheludko@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0007-5385-6872>

Abstract. This article proposes and compares formalized criteria for the quality of automated well correlation. Three indicators are considered: the error in predicting well log values based on cross-validation; the ratio of the average intra-group variance to the total data variance; and the standard deviation of the depths of a set of stratigraphic boundaries from a reference model. A very close statistical relationship is demonstrated for the first two criteria, but due to the comparative simplicity of calculation, the second is preferable. The criterion associated with assessing the deviation from the reference model (created by an expert) can be used in machine learning for practical tasks, but is of little use because it requires the preliminary construction of a reference model.

Keywords: automatic wellbore correlation, correlation model ranking, stratigraphic correlation, correlation quality criteria

Funding: The study was carried out as part of government assignment to the Russian Academy of Sciences in basic research, Project FWZZ-2022-0009.

For citation: Lapkovsky V.V., Sheludko V.I. Formal quality criteria for automatic correlation of well logs // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2025. No. 2. P. 51–59. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2025-2-51.

ВВЕДЕНИЕ

Стратиграфическая корреляция является ключевым звеном между первичными данными бурения и объемной моделью месторождения, позволяя геологам строить структурные карты продуктивных отложений и модели распределения петрофизических свойств. Процесс корреляции, в большинстве случаев, включает попарное визуальное сравнение скважин, что делает его субъективным и зависимым от опыта интерпретатора, его искусства чтения каротажных кривых. Это приводит к неопределенности в оценках залежей. Проблему не устраняет наличие компьютерных технологий для сопоставления скважин. При этом выбор того или иного варианта сопоставления может существенно повлиять на результаты дальнейшего моделирования, оценки запасов, представление об их локализации и пространственной изменчивости петрофизических свойств. И если традиционно геолог мог рассмотреть малое число альтернативных вариантов корреляции, то на основе компьютерных технологий возможна генерация весьма большого числа корреляционных моделей, которые необходимо оценивать и выбирать наиболее обоснованные. Здесь весьма полезным было бы наличие сформулированных вычисляемых формальных критериев для такой оценки. Пока данный вопрос проработан слабо, и соответствующий инструментарий не реализован в индустриальных программных продуктах.

В настоящее время заметный рост наблюдается в использовании искусственного интеллекта для решения задач идентификации геологических границ и межскважинной корреляции слоев [Шайбаков, 2012; Bakdi et al., 2022; Romanenkova et al., 2022; Латыпов и др., 2024]. Основная проблема в этой области – обучение нейронных сетей и других моделей так, чтобы они могли по набору исходных геофизических данных генерировать разумные корреляционные решения. Как показывает анализ литературы, обучение основывается на настройке параметров в процессе подачи совместно с данными каротажа правильных вариантов корреляции. Модели правильной корреляции должны быть подготовлены заранее до обучения сети. Это делает задачу обучения довольно трудозатратной. И именно здесь весьма благоприятно было бы наличие формального критерия оценки качества корреляции, что позволило бы генерировать множество схем корреляции и подавать их для обучения сети, ранжировав по качеству. Сеть могла бы обучаться не только на хороших примерах работы, но и на примерах некорректной корреляции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Результаты, представленные в статье, получены на данных геофизических исследований скважин одного из кустов Казанского нефтегазоконденсатного месторождения Томской области. Корреляция разрезов скважин и оценка качества полученных моделей выполнены по данным гамма-гамма плотностного каротажа (ГГКП).

Метод корреляции был ранее описан в статье [Лапковский и др., 2015], он заключается в решении оптимизационной задачи сопоставления двух рядов данных на основе DTW (Dynamic Time Warping)

алгоритма. Один из используемых критериев оценки качества сформулирован ранее в работе [Лапковский и др., 2019]. Его идея состоит в том, что более качественная корреляция способствует более точному прогнозу свойств в скважинах. На основе конкретной корреляционной модели методом кросс-валидации вычисляется погрешность прогноза для одной или нескольких каротажных кривых. Лучшему варианту корреляции соответствует меньшая погрешность прогноза.

В этой статье предлагается еще два критерия оценки корреляционного решения:

1. Один из них использует более простые вычисления, не связанные с реализацией алгоритма кросс-валидации по схеме Leave-one-out. Этот критерий основан на сопоставлении дисперсий. То есть задача корреляции рассматривается как своего рода кластеризация (стратиграфически эквивалентные точки принадлежат одному классу). Далее для одной или нескольких каротажных кривых вычисляются средняя внутриклассовая (внутригрупповая) дисперсия и ее доля от общей дисперсии. Дадим несколько пояснений.

У нас имеется N скважин, вскрывающих разрез, стратиграфический диапазон которого параметризован значениями от $stratoMin$ до $stratoMax$. В этом диапазоне мы выделим M реперов. Проще всего определить стратиграфическое значение k -того репера (k от 0 до $M - 1$) как

$$S_k = stratoMin + (stratoMax - stratoMin)/(M - 1).$$

Берем все измерения некоторого каротажа во всех скважинах на каждом выделенном реперном уровне. Таким образом, имеем $N \cdot M$ значений, для которых вычисляется общая дисперсия. Также для каждого из M реперных уровней вычисляем внутригрупповую дисперсию, что позволяет оценить среднюю внутригрупповую дисперсию. Далее вычисляем отношение средней внутригрупповой дисперсии к общей. В качестве критерия мы, по существу, вычисляем величину обратную индексу Калински–Харабаса [Caliński, Harabasz, 1974], который успешно используется для оценки качества кластеризации данных (обратная величина берется нами, чтобы данный критерий имел то же направление, что и основанные на погрешности прогноза: меньшее значение – лучший вариант). Вычисление немного усложняется, если имеются короткие скважины, не вскрывающие весь стратиграфический диапазон.

2. Другой критерий измеряет различие между текущим вариантом корреляции и эталонным (правильным) по заданному набору границ слоев. Этот критерий предполагает наличие правильного варианта корреляции. Эталонный вариант корреляции соответствует некоторой таблице (табл. 1). Делая очередной вариант корреляции, мы получаем таблицу того же размера, но с другими значениями. Используемый критерий – среднеквадратическое отклонение значений этих таблиц. По сути, это среднеквадратическая ошибка корреляции, в нашем случае – в метрах.

Результаты, представленные ниже, получены в ходе корреляции отложений верхней части васюганской свиты.

СРАВНЕНИЕ КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА КОРРЕЛЯЦИИ

Корреляционную модель можно представить в виде таблицы, строки которой – скважины, а столбцы – коррелируемые стратиграфические уровни, значения в таблице – измеренная глубина в скважине различных стратиграфических границ.

Таблица 1

Корреляционная модель

	Bg1	Bg	Gr	Vs	Y_1_0_K_mt	Y_1_0_K_mb	Y_1_1_A_t	Y_1_1_A_b	Y_1_1_B_t	Y_1_1_B_b	Y_1_2t	Y_1_2b	Y_2_0t
1	2901.86	2917.06	2924.39	2930.34	2938.51	2939.03	2954.36	2956.65	2958.12	2959.61	2971.47	2979.54	2996.8
2	2857.22	2874.17	2881.53	2887.82	2897.06	2897.5	2911.16	2913.26	2921.13	2922.53	2926.57	2935.13	2957.41
3	2932.8	2949.65	2957.05	2963.94	2973.42	2973.87	2988.49	2990.86	2991.7	2993.24	3005.2	3012.02	3031.38
4	2876.22	2893.49	2900.79	2907.84	2916.04	2916.49	2929.08	2930.97	2934.17	2935.72	2947.8	2953.73	2976.06
5	2597.51	2613.95	2621.62	2628.5	2638.11	2638.93	2653.7	2656.28	2657.54	2658.93	2671.47	2679.84	2697.77
6	2550.37	2567.62	2575.13	2582.23	2591.35	2591.73	2606.97	2609.23	2610.75	2611.96	2623.34	2630.48	2648.25
7	2439.61	2456.55	2463.92	2470.67	2479.52	2480.07	2496.6	2498.68	2499.95	2501.47	2514.19	2521.35	2542.45
8	2605.86	2621.87	2629.55	2636.51	2646.1	2646.76	2660.59	2662.87	2667.51	2669.01	2680.35	2688	2705.94
9	2595.11	2611.79	2619.25	2625.68	2633.85	2634.34	2647.24	2649.02	2653.96	2655.33	2667.14	2675.28	2695.51
10	2792.33	2808.85	2816.54	2822.82	2831.87	2832.34	2848.36	2850.83	2852.04	2853.66	2864.45	2872.9	2887.33
11	2947.07	2963.61	2971.27	2977.94	2986.83	2987.28	3002.48	3005.12	3006	3007.8	3019.14	3026.09	3041.99

Вместе с данными ГГКП по скважинам и литологическими колонками эта модель представляется разрезом (рис. 1). Показанный разрез является эталонным (правильно прокоррелированным с точки зрения интерпретатора).

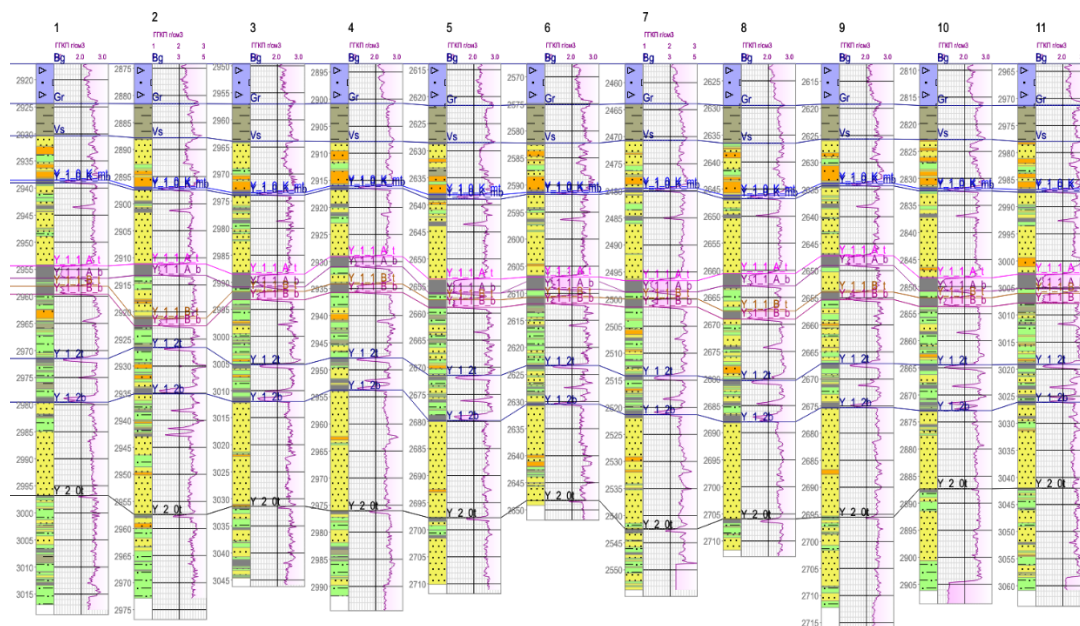


Рис. 1. Разрез по 11 скважинам баженовской, георгиевской и верхней части васюганской свит.

Для оценки критериев качества корреляции из модели была удалена большая часть границ пластов в пределах васюганской свиты (ниже границы Vs). Полученный разрез (рис. 2) проходил процедуру автоматической корреляции в разных режимах, и для каждого варианта вычислялись значения критериев качества. Как видно из рисунка, интервал, в котором реально выполнялось построение модели, ограничен двумя уровнями – кровлей васюганской свиты и кровлей одного из угольных пластов (Y_2_0t). Эти два уровня были заданы во всех скважинах. Остальные стратиграфические границы внутри васюганской свиты представлены в четвертой скважине и очень редко в других скважинах.

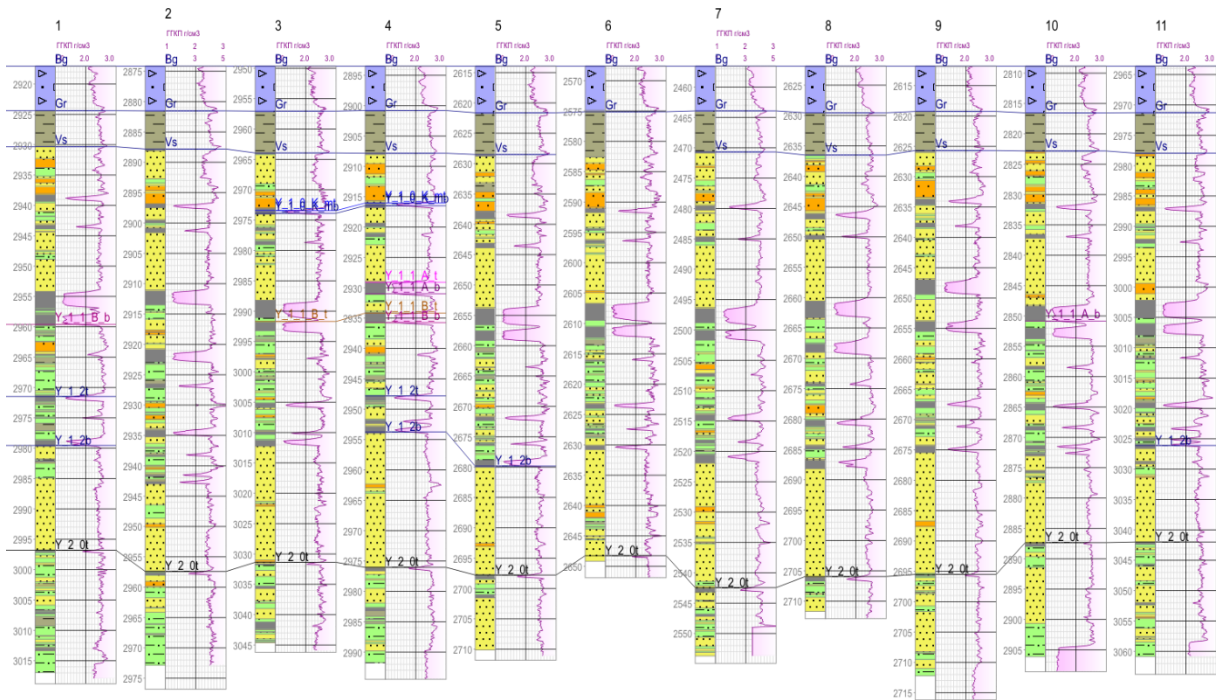


Рис. 2. Исходная модель для корреляции разрезов скважин.

Таблица стратиграфических разбивок исходной модели имеет многочисленные пробелы. Задача корреляции – заполнить эти пробелы, после чего могут быть вычислены критерии качества. Всего было построено 10 различных вариантов корреляции скважин, здесь мы показываем только один из них и совсем не лучший (рис. 3).

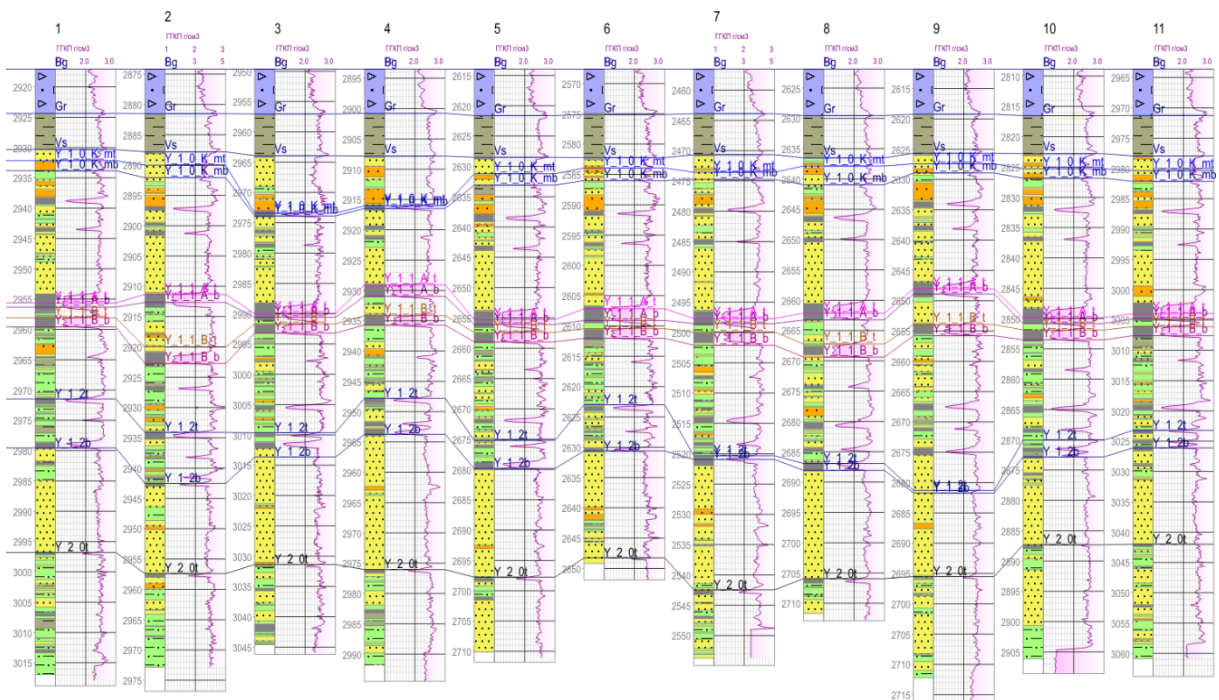


Рис. 3. Один из вариантов корреляции разрезов скважин.

Предложенный ранее критерий, основанный на вычислении погрешности корреляции, и отношение дисперсий (критерий, предлагаемый в данной статье) оказались достаточно тесно связаны

линейной зависимостью (рис. 4). Коэффициент корреляции для них составил +0.97. Это вполне естественно: чем меньше внутригрупповая дисперсия, тем меньше и погрешность прогноза значений для данной группы. То есть вместо индикатора, вычисление которого требует многочисленных экспериментов с пространственной интерполяцией данных (что необходимо при реализации методов кросс-валидации), можно использовать вычисление внутригрупповых дисперсий для каждой стратиграфически эквивалентной группы точек в стволах разных скважин. Это намного проще, а результат почти неотличим.

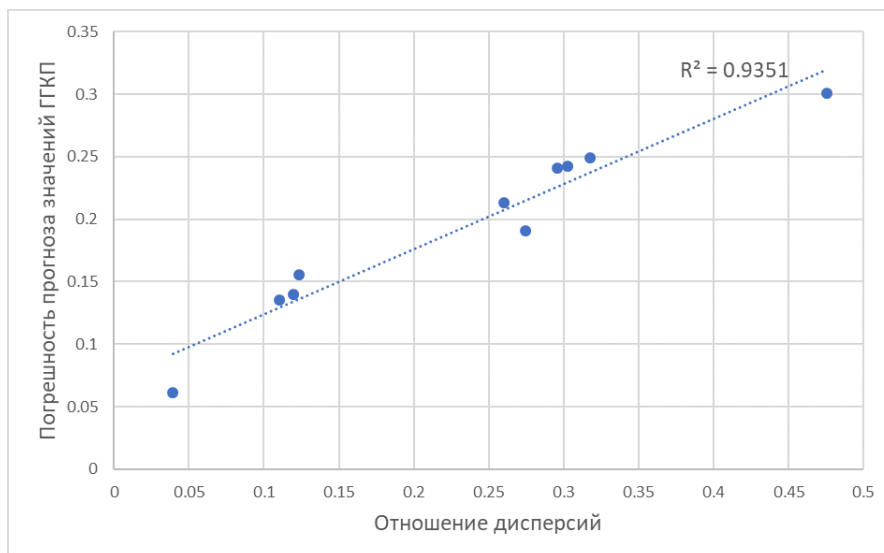


Рис. 4. Линейная зависимость между двумя критериями качества корреляционной модели.

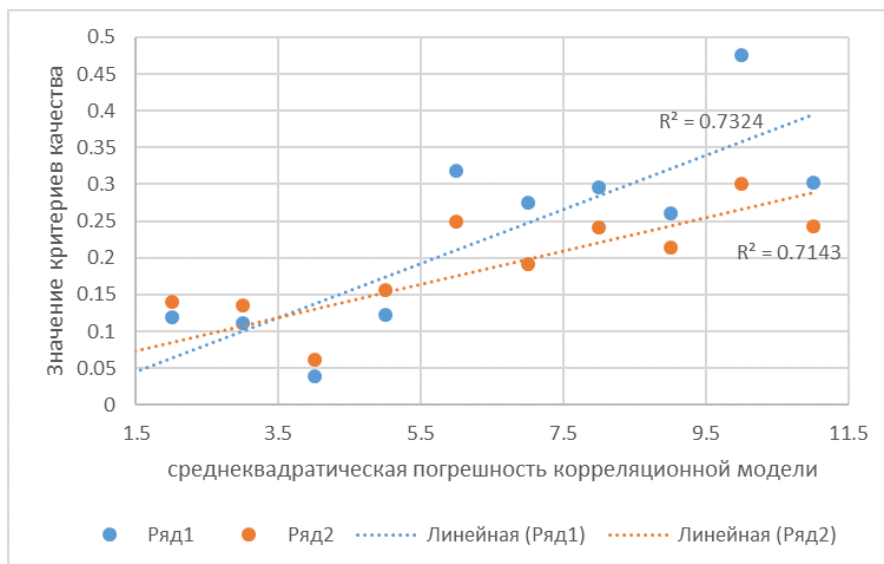


Рис. 5. Соотношение среднеквадратической ошибки корреляционной модели и двух критериев качества. Ряд 1 – отношение дисперсий, Ряд 2 – погрешность прогноза ГКП.

Рисунок 5 показывает довольно сильную зависимость используемых критериев качества корреляции от среднеквадратического отклонения от эталонной корреляции. Для каждого из критериев коэффициент корреляции с погрешностью модели (отклонение в метрах) составил около +0.85. Чуть больше он оказался для отношения дисперсий. По-видимому, геолог, сравнивая варианты корреляции,

оценивает их по величине отклонения от некоторой идеальной модели, которую он представляет. В этом отношении надежным критерием качества могла бы быть среднеквадратическая погрешность корреляционной модели (ось X на рис. 5). Но это очень неудобный параметр: чтобы его вычислить, надо предварительно создать эталонную корреляционную модель. Возможно, для обучения нейронных сетей искусству корреляции такой подход приемлем, но для работы с реальными данными он мало пригоден. Хорошим обстоятельством здесь является то, что критерии, вычисляемые по самой модели в отсутствие эталона (отношение дисперсий и погрешность прогноза свойств), имеют весьма тесную линейную связь с критерием, который вычисляется в сравнении с эталоном.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты являются новыми и важными для задачи стратиграфической корреляции. Корреляционные модели традиционно оценивались путем неформальной экспертизы. На основании предложенных в статье критериев возможно эффективно ранжировать модели сопоставления разрезов скважин в числовых метриках. Это позволяет подбирать оптимальные параметры для вычислительных процедур, а также имеет хорошие перспективы для создания эффективных технологий обучения нейронных сетей и других методов, связанных с использованием искусственного интеллекта и машинного обучения. Числовое выражение качества корреляции позволяет реализовывать процедуры оптимизации весовых коэффициентов нейронных сетей и градиентного спуска при многомерной оптимизации.

В дальнейшем планируется провести сравнение и анализ формальных критериев качества корреляции с оценками и ранжированием моделей, которые выполняются несколькими квалифицированными специалистами. Вычисление критериев качества будет включено в плагины стратиграфических корреляций для среды W-Seis интерпретации геолого-геофизических данных.

Мы думаем об исследованиях в области создания корреляционных решений на основе ИИ, при этом для обучения сетей предполагаем использовать разработанные критерии качества.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Лапковский В.В., Истомин А.В., Конторович В.А., Бердов В.А. Корреляция разрезов скважин как многомерная оптимизационная задача // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 3. С. 624–630. doi:10.15372/GiG20150309. EDN:TNUWLJ.

Лапковский В.В., Моисеев С.А., Лунев Б.В. Критерий качества автоматической корреляции разрезов скважин по каротажным данным // Геофизические технологии. 2019. № 2. С. 12–22. doi: 10.18303/2619-1563-2019-2-12. EDN:VTZOZN.

Латыпов И.Д., Марков А.В., Евграфов Н.А., Шагмарданова Л.Р. Разработка подходов к автоматизированной внутрипластовой корреляции по данным геофизических исследований скважин с применением машинного обучения // Экспозиция Нефть Газ. 2024. № 4. С. 47–51. doi: 10.24412/2076-6785-2024-4-47-51. EDN:GVMMOB.

Шайбаков Р.А. Использование нейросетевого аппарата для идентификации границ геологических объектов // Технические науки: традиции и инновации: Материалы I Международной научной конференции. Челябинск: Два комсомольца, 2012. С. 8–11. <https://moluch.ru/conf/tech/archive/6/1491>.

Bakdi S., Kannan N., Masini S., Chennakrishnan B. Automated well correlation using machine learning and facial recognition techniques // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. 2020. doi:10.2118/203301-MS.

Caliński T., Harabasz J. A dendrite method for cluster analysis // Communications in Statistics. 1974. Vol. 3 (1). P. 1–27. doi:10.1080/03610927408827101.

Romanenkova E., Rogulina A., Shakirov A., Stulov N., Zaytsev A., Ismailova L., Kovalev D., Katterbauer K., AlShehri A. Similarity learning for wells based on logging data // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. Vol. 215 (Part B). 110690. doi:10.1016/j.petrol.2022.110690.

REFERENCES

Bakdi S., Kannan N., Masini S., Chennakrishnan B. Automated well correlation using machine learning and facial recognition techniques // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. 2020. doi:10.2118/203301-MS.

Caliński T., Harabasz J. A dendrite method for cluster analysis // Communications in Statistics. 1974. Vol. 3 (1). P. 1–27. doi:10.1080/03610927408827101.

Lapkovsky V.V., Istomin A.V., Kontorovich V.A., Berdov V.A. Correlation of well logs as a multidimensional optimization problem // Russian Geology and Geophysics. 2015. Vol. 56 (3). P. 487–492. doi:10.1016/j.rgg.2015.02.009.

Lapkovsky V.V., Moiseev S.A., Lunev B.V. Quality criteria for automatic correlation of well sections based on logging data // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2019. No. 2. P. 12–22. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2019-2-12.

Latypov I.D., Markov A.V., Evgrafov N.A., Shagimardanova L.R. Development of approaches to automated correlation from well log data using machine learning // Exposition Oil Gas. 2024. No. 4. P. 47–51. (In Russ.). doi:10.24412/2076-6785-2024-4-47-51.

Romanenkova E., Rogulina A., Shakirov A., Stulov N., Zaytsev A., Ismailova L., Kovalev D., Katterbauer K., AlShehri A. Similarity learning for wells based on logging data // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. Vol. 215 (Part B). 110690. doi:10.1016/j.petrol.2022.110690.

Shaibakov R.A. Using a neural network device for identifying the boundaries of geological objects (In Russ.) // Engineering Sciences: Traditions and Innovations: Proceedings of the First International Scientific Conference. Chelyabinsk, 2012. P. 8–11. <https://moluch.ru/conf/tech/archive/6/1491>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ЛАПКОВСКИЙ Владимир Валентинович – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории сейсмогеологического моделирования природных нефтегазовых систем Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Профессор кафедры Вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Основные научные интересы: математические методы изучения строения осадочных бассейнов, создание стратиграфических моделей, использование геостатистики и многомерных сплайнов для прогнозирования петрофизических свойств, разработка профессионального программного обеспечения.

ШЕЛУДЬКО Василиса Ивановна – аспирант Новосибирского государственного технического университета, ассистент кафедры вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Основные научные интересы связаны с задачами многомерной оптимизации, анализа временных рядов и искусственного интеллекта.

*Статья поступила в редакцию 25 ноября 2025 г.,
одобрена после рецензирования 28 ноября 2025 г.,
принята к публикации 28 ноября 2025 г.*



ОЦЕНКА МОЩНОСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ КАМЧАТКИ ПО ДАННЫМ ВРЕМЕННЫХ И ПОСТОЯННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Татьяна Александровна Ступина^{1,✉}, Наталья Анатольевна Бушенкова²

^{1,2}Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

¹StupinaTA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7489-9731>

²BushenkovaNA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8792-9060>

Аннотация. Работа посвящена изучению неоднородности коро-мантийной границы центрального района полуострова Камчатка. Для района исследований по данным 2019–2020 гг. плотной сети из 33 временных и 14 постоянных станций рассчитаны значения толщины земной коры и усредненные значения отношения V_P/V_S . Для определения глубины коро-мантийной границы (Мохоровичича, Мохо) использовался метод приемных функций, основанный на анализе разницы времен прихода прямой и обменных фаз сейсмических волн от телесейсмических событий. Инверсия приемных функций осуществлялась методом сеточного поиска в координатах H (толщины земной коры) и k (отношения V_P/V_S), в предположении, что земная кора – это однородный изотропный слой, лежащий на полупространстве. Результаты показали, что глубина границы Мохоровичича варьирует в пределах 30–35 км под станциями, расположенными в центральной области Камчатки с заглублением до 40 км в районе вулкана Авачинский. Для станций временной сети, установленной силами сотрудников ИНГТ СО РАН, и большинства привлеченных станций постоянной сети КФ ФИЦ ГС РАН результат получен впервые и в зонах пересечения согласуется с выводами в ранее опубликованных работах других авторов.

Ключевые слова: сейсмология, граница Мохоровичича, метод приемных функций, обменные продольные и поперечные волны

Финансирование: исследование выполнено по плану базовых научно-исследовательских работ ИНГТ СО РАН (проект Минобрнауки РФ FWZZ-2022-0017).

Благодарности: авторы выражают благодарность А.Д. Иванову и член-корр. РАН, д.г.-м.н. И.Ю. Кулакову за консультирование и помощь в алгоритмической реализации методики.

Для цитирования: Ступина Т.А., Бушенкова Н.А. Оценка мощности земной коры центральной Камчатки по данным временных и постоянных сейсмических станций // Геофизические технологии. 2025. № 2. С. 60–73. doi:10.18303/2619-1563-2025-2-60.

ESTIMATION OF THE EARTH'S CRUSTAL THICKNESS OF CENTRAL KAMCHATKA ACCORDING TO TEMPORARY AND PERMANENT SEISMIC STATIONS

Tatiana A. Stupina^{1,✉}, Natalia A. Bushenkova²

^{1,2}Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

¹StupinaTA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7489-9731>

²BushenkovaNA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8792-9060>

Abstract. The work is devoted to the study of the heterogeneity of the boundary of the Earth's crust and mantle in the central region of the Kamchatka Peninsula. For the research area, according to a dense network of 33 temporary and 14 permanent stations for 2019–2020, the values of the thickness of the Earth's crust and the average V_P/V_S ratio were calculated. To determine the depth of the crust-mantle boundary (Moho), the receiver function method was used, based on the analysis of the difference in the arrival time of direct and exchange phases of seismic waves from teleseismic events. The inversion of the receiver functions was carried out using the grid search method in the coordinates H (crust thickness) and k (V_P/V_S ratio), assuming that the crust is a homogeneous isotropic layer on a half-space. The results showed that the Moho depth ranges from 30–35 km under the stations in the Kamchatka central region, with a deepening to 40 km in the area of the Avacha Volcano. For the stations of the temporary network that were set up by the IPGG SB RAS staff, and most of the stations of the KB GS RAS permanent network, the result was obtained for the first time and in the intersection areas is consistent with the conclusions contained in previously published works by other authors.

Keywords: seismology, Moho boundary, receiver function method, transformation of seismic P - and S -waves

Funding: The study was carried out as part of government assignment to the Russian Academy of Sciences in basic research, Project FWZZ-2022-0017.

Acknowledgments: the authors are grateful to Andrey D. Ivanov and Ivan Yu. Koulakov for consulting and assistance in the algorithmic implementation of the methodology.

For citation: Stupina T.A., Bushenkova N.A. Estimation of the Earth's crustal thickness of central Kamchatka according to temporary and permanent seismic stations // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2025. No. 2. P. 60–73. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2025-2-60.

ВВЕДЕНИЕ

Упругие свойства литосферы являются ключевыми параметрами для понимания протекающих в ней геодинамических процессов и могут быть оценены на основе анализа сейсмических записей. Одной из важнейших задач является определение глубин основных сейсмических границ, наиболее контрастной из которых является граница коры и мантии или граница Мохоровичича (также Мохо). Неоднородность этой границы связана с природой и эволюцией формирования блоков земной коры, поэтому является важным параметром для геодинамического моделирования. В настоящем исследовании рассматривается регион центральной Камчатки, для которого до недавнего времени не представлялось возможным детально изучить толщину коры в силу малого количества и плотности распределения сейсмостанций. Так, для рассматриваемой нами области центральной Камчатки в работе [Levin et al., 2002] представлены результаты по четырем станциям (относительно обоснованные для станций MIL и APA, приблизительные – для станций PET и ZUP). Результаты по трем станциям (IVS, PET и DAL) в области Авачинской группы вулканов содержатся в исследовании [Резниченко и др., 2023], а также для постоянных станций вдоль восточной части полуострова глубины отражающих горизонтов представлены в [Хритова и др., 2025] (в интервале центральной зоны Камчатки под станциями ASA, PET и AVH).

Благодаря данным временной сейсмической сети (более 30 станций), установленной в центральной части Камчатского региона на период 2019–2020 гг., стало возможным расширение площади исследований.

Основной метод определения глубинных границ базируется на использовании обменных сейсмических продольных (P) и поперечных (S) волн, когда в результате преломления или отражения на резких границах часть энергии волны уходит на формирование волны другого типа. Путем выполнения специальной процедуры обработки сейсмической записи от далекого (телесеismicкого) землетрясения возможно построить импульсные характеристики прихода различных обменных волн, называемых

приемными функциями или функциями приемника (метод приемных функций, Receiver Functions, RF [Vinnik, 1977; Langston, 1979; Винник, 2019]). Существует ряд алгоритмов, которые позволяют с использованием этих функций восстанавливать положение границ и распределение скорости в коре под приемником. Известно, что задача инверсии приемных функций нелинейная с неединственным решением, но из-за простоты реализации связанной прямой задачи линейная инверсия все еще широко применяется [Harland et al., 2009]. Один из наиболее общепризнанных подходов *H-k-stacking* [Zhu, Kanamori, 2000] направлен на определение глубины одной границы (главным образом Мохо) и отношения скоростей продольных и поперечных волн (V_P/V_S). В настоящем исследовании представлены результаты применения этого подхода к данным сейсмостанций постоянной и временной сетей в пределах центральной Камчатки за период с 2019 по 2020 г.

ОПИСАНИЕ РЕГИОНА

Активные океанические окраины, в том числе зоны субдукции, характеризуются наиболее интенсивными геодинамическими процессами на Земле. В этих районах наблюдаются максимальные значения скорости конвергенции литосферных плит, которые могут превышать 10 см в год. Центральная зона Камчатки, как и основная часть полуострова, находится под влиянием процессов Тихоокеанской субдукции (рис. 1, А). Интенсивные деформации, а также подъем флюидов и расплавов в относительно узкой полосе на границе плит вызывают чрезвычайно активные механические и химические процессы. Эти процессы ответственны за разнообразие наблюдаемых геологических структур.

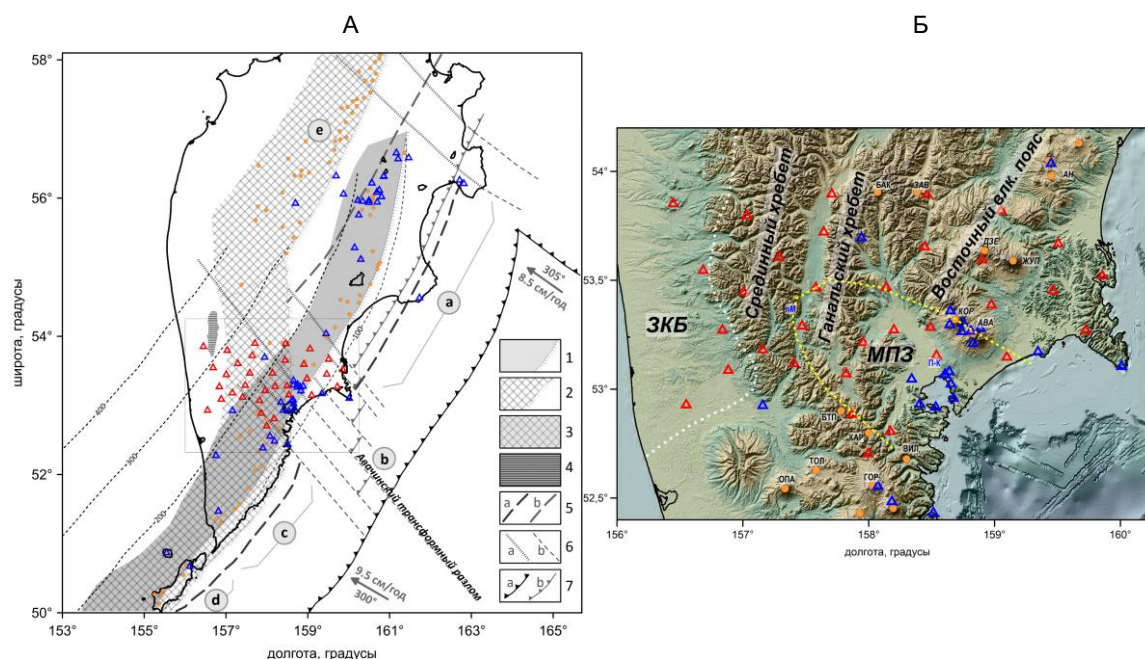


Рис. 1. Расстановка сейсмических станций в изучаемой области (на схеме А выделена прямоугольником): временных в центральной зоне Камчатки (эксперимент ИНГГ СО РАН 2019–2020 гг., красные треугольники) и постоянных станций (КФ ГС РАН, синие треугольники), оранжевыми точками показаны вулканы. А – схема разновозрастных вулканических дуг Курило-Камчатской островодужной системы по [Авдейко и др., 2003] с дополнениями: 1 – современная вулканическая дуга Восточной Камчатки и ее вулканический фронт; 2 – неогеновая вулканическая дуга Срединного хребта и Южной Камчатки и ее вулканический фронт; 3 – Курило-Южно-Камчатский участок наложения современной Курило-Камчатской дуги на неогеновую дугу; 4 – фрагменты предполагаемой палеогеновой вулканической дуги Западной Камчатки; 5–7 – выходы пород внутриплитного геохимического типа по [Volynets, 1994]: 5 – осевая зона современной тектонической (фронтальной) островной дуги (а) и реконструированная осевая зона неогеновой Срединно-Камчатской островной дуги (б); 6 – основные поперечные разломы на суше (а) и на море (б), вероятно

являвшиеся трансформными в неогене; 7 – ось современного глубоководного желоба (а) и предполагаемое положение оси палеопрогиба неогеновой островодужной системы (b). Буквы в кружках обозначают сегменты новейшей дуги: а – Восточно-Камчатская, b – Малко-Петропавловская зона поперечных дислокаций, с – Южно-Камчатская, d – Северо-Курильская, e – Срединно-Камчатская дуга. Б – карта рельефа и основных геологических структур района исследований. Обозначения: вулканы Бакенин (БАК), Заварицкого (ЗАВ), Академии Наук (АН), Дзензурский (ДЗЕ), Жупановский (ЖУП), Корякский (КОР), Авачинский (АВА), Вилючинский (ВИЛ), Горелый (ГОР), Опала (ОПА), Карымшина (КАР), Толмачевский Дол (ТОЛ) и Большебанное термальное поле (БТП). Желтым пунктиром отмечена Малко-Петропавловская зона (МПЗ), белым пунктиром – Западно-Камчатский блок (ЗКБ). Аббревиатуры синего цвета: П-К – город Петропавловск-Камчатский, пМ – поселок Малки.

В центральной зоне Камчатки располагается Малко-Петропавловская зона (МПЗ, рис. 1, Б) поперечных дислокаций, по которой, как предполагается, проходит граница между двумя принципиально разными режимами субдукции на севере и юге полуострова [Бушенкова, Кучай, 2023]. Разрозненные разномасштабные результаты исследований предыдущих лет выявили морфологическое изменение рельефа и распространения вулканов на переходе между центральной и южной частями Камчатки, примерно соответствующем расположению МПЗ на широте $\sim 53^\circ \text{C}$ [Авдейко и др., 2006]. Сама МПЗ представляет собой грабенообразную структуру, перпендикулярную субдукционной дуге, с пониженной в сравнении с восточной окраиной Камчатки сейсмоактивностью [Государственная геологическая карта..., 2000; Шеймович, Сидоров, 2000; Гордеев и др., 2006].

В работах [Bushenkova et al., 2023; Бушенкова, Кучай, 2023] сделан вывод о том, что МПЗ расположена на продолжении Авачинского трансформного разлома океанической Тихоокеанской плиты, выделенного на основании анализа магнитных аномалий [Андреев, 1993]. Этот глубинный трансформный разлом рассматривается как граница между разновозрастными сегментами Тихоокеанского слэба. Севернее разлома возраст Тихоокеанской плиты, погружающейся под Восточный вулканический пояс, составляет 87–92 млн лет, тогда как под южной Камчаткой возраст плиты оценивается в 100–105 млн лет [Gorbatov et al., 1997; Syracuse, Abers, 2006].

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В обработке использовались трехкомпонентные сейсмические записи, 100 Hz, с временной сети из 33 станций (рис. 1, Б), установленной в период с июня 2019 по июль 2020 г. в районе центральной Камчатки в рамках проекта, объединяющего научно-исследовательские институты РАН (ИНГГ СО РАН, ИФЗ РАН, ИВиС ДВО РАН), Academia Sinica, Taiwan, и с постоянной сети КФ ФИЦ ГС РАН из 19 станций. Общая конфигурация приборов временной сети (CR01 – CR14, EH01 – EH11, WH02 – WH04, WR01 – WR05): сенсор Guralp CMG-6T и регистратор DataCube3 ext. BreakOut Box (1:10); сейсмостанция Guralp CMG-6TD; сенсор Trillium Compact 120s и регистратор DataCube3 ext. BreakOut Box (1:10); сейсмостанция Nanometrics Meridian Compact PH 120s (MC120-PH2). Для исследуемого центрального района Камчатки в обработке также использовались данные 8 длиннопериодных (APC, AVH, DAL, IVS, KRM, SBLV, SPN, UBL) и 11 короткопериодных (GNL, GRL, KRE, KRK, KRX, KRY, MTV, RUS, SDL, SMA, UGL) сейсмологических станций постоянной сети [Чебров и др., 2024].

Из каталога землетрясений Международного Сейсмологического Центра (International Seismological Centre, ISC) за период с августа 2019 по июль 2020 г. было отобрано 298 сильных землетрясений $M > 5.5$ и эпицентральным расстоянием от 30 до 100° . Теоретические времена вступления Р-фаз от каждого события для всех станций были определены на основе одномерной скоростной модели

Земли IASP91 [Kennett, Engdahl, 1991]. После визуального контроля качества волновых форм телесеismicических землетрясений и коррекции времен первых вступлений, с учетом различного рабочего периода временных сейсмических станций, в дальнейшей обработке осталась 31 станция с записями удовлетворительного качества не менее десяти событий по каждой из них. Распределение событий, отобранных для дальнейшего анализа, представлено на рис. 2. На рисунке 3 продемонстрирован пример принятой к дальнейшей обработке волновой формы телесеismicического события с $M=6.6$, произошедшего в районе Фиджи.

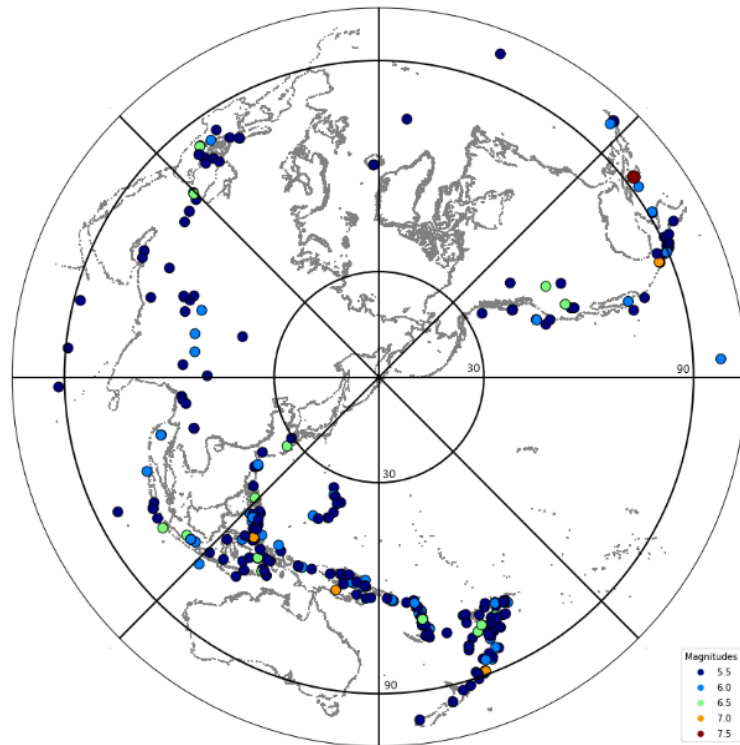


Рис. 2. Распределение телесеismicических землетрясений, используемых при построении приемных функций.

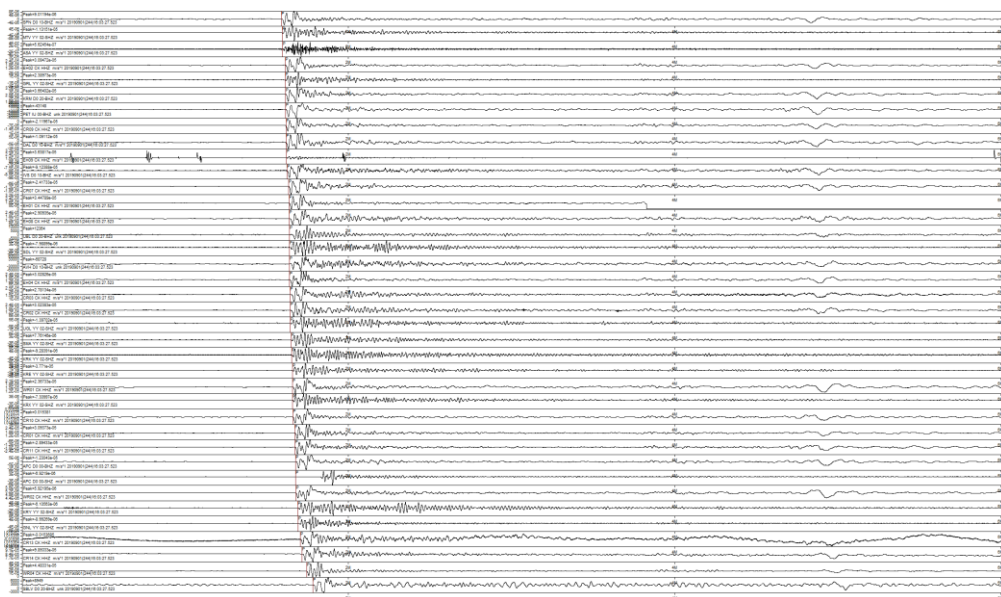


Рис. 3. Пример нефильтованной 8-минутной записи Z-компоненты телесеismicического землетрясения 2019-09-01 15:54, $M = 6.6$, глубина 591 км, широта 20.4(S) долгота 178(W), район Фиджи. Визуализация выполнена в программе DIMAS [Дроздин, Дроздина, 2010].

Метод приемных функций характеризуется по типу основной P - или S -волны и возникающих на границах обменных фаз, P -функция (P Receiver Function, PRF) представляет собой волновую форму поперечных обменных волн (Ps), порождаемых телесеismicической P -волной, S -функция (S Receiver Function, SRF) образуется при конверсии поперечной волны в продольную. Поскольку данных с временной сети станций для расчета S -функций оказалось недостаточно, мы рассмотрели PRF-функцию и оценили импульсы четырех фаз, схематически представленных на рис. 4: Ps (преломленная на границе как S), $PpPs$ (преломленная на границе как P , отраженная от свободной поверхности как P и отраженная от границы как S) и $PpSs$ (преломленная на границе как P , отраженная от свободной поверхности как S и отраженная от границы как S). Многократно отраженные волны более высокого порядка обычно настолько слабы, что ими можно пренебречь. Методика вычисления индивидуальной приемной функции состоит из четырех основных этапов:

1. Частотная фильтрация трехканальной сейсмической записи полосовым фильтром в диапазоне 0.05–1.5 Гц.

2. Пересчет сейсмограммы из координат (Z, N, E) ориентации сейсмометра в лучевую систему координат (L, Q, T), где L -компонента параллельна главному направлению смещений в продольной волне, а компоненты Q и T соответствуют SV и SH направлениям.

3. Выполнение процедуры деконволюции трехкомпонентной записи в предположении, что L -компонента является функцией источника. Она реализовывалась двумя способами: 1) в частотной области делением спектров, $RF(\omega) = Q(\omega)/L(\omega)$, и далее с переходом во временную область обратным преобразованием Фурье; 2) во временной области применением итеративного подхода, в результате которого L -компонента приближалась к сигналу заданной формы, близкой к дельта-функции, с минимально предустановленной степенью схожести в 70 % [Ligorria, Ammon, 1999].

4. Выполнение процедуры суммирования с учетом кинематических поправок и лучевого параметра по всем PRF, вычисленным для одной станции.

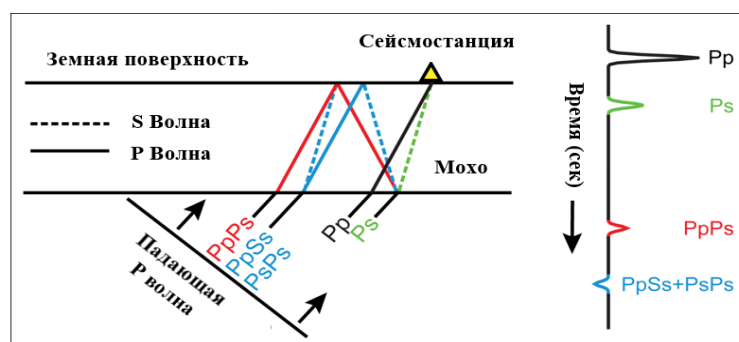


Рис. 4. Схематическое представление лучевых диаграмм основных сейсмических фаз, применяемых в вычислении P -функции приемника в H - k методе (слева), справа – синтетическая P -функция приемника.

Направление импульса на записи приемной функции (рис. 4) указывает на изменение скорости на границе отражения: положительный импульс демонстрирует увеличение скорости, отрицательный – уменьшение. Для комплексной интерпретации всех трех фаз и оценки мощности (глубины) земной коры мы использовали H - k stacking метод [Zhu, Kanamori, 2000], представляющий собой сеточный поиск абсолютного максимума целевого функционала $s(H, k)$ в координатах H (расстояние до границы) и k (отношение скоростей V_P/V_S) в предположении, что под станцией находится изотропный однородный слой

мощностью H над полупространством. В соответствии с этой моделью времена четырех фаз (см. рис. 4) относительно времени вступления P -волны определяются следующими формулами:

$$t_{P_s}(H, k, v_p, \rho) = H \left[\sqrt{\frac{k^2}{v_p^2} - \rho^2} - \sqrt{\frac{1}{v_p^2} - \rho^2} \right], \quad (1)$$

$$t_{P_p P_s}(H, k, v_p, \rho) = H \left[\sqrt{\frac{k^2}{v_p^2} - \rho^2} + \sqrt{\frac{1}{v_p^2} - \rho^2} \right], \quad (2)$$

$$t_{P_s P_s}(H, k, v_p, \rho) = 2H \sqrt{\frac{k^2}{v_p^2} - \rho^2}, \quad (3)$$

$$s(H, k) = w_1 r(t_{P_s}) + w_2 r(t_{P_p P_s}) - w_3 r(t_{P_s P_s}). \quad (4)$$

где $r(t_i)$ – амплитуда радиальной компоненты приемной функции на рассчитанном в соответствии с уравнениями (1–3) времени прибытия i -ой фазы с параметрами (H, k, v_p, ρ) , H и k – перебираемые параметры в диапазонах $20 \leq H \leq 50$ км и $1.5 \leq k \leq 2.0$, константа $v_p = 6.5$ км/с – скорость P -волны в верхнем слое в соответствии с томографической моделью [Кулаков и др., 2011; Bushenkova et al., 2023], ρ – параметр луча и $w_1 \setminus w_2 \setminus w_3$ – нормированные весовые коэффициенты соответствующих фаз. Весовые коэффициенты подбирались итеративно с целью максимизации амплитуды целевого функционала $s(H, k)$ и минимизации неоднозначности решения. Для подавляющего большинства станций оптимальным оказался набор $0.4 \setminus 0.3 \setminus 0.3$. Точность решения оценивалась путем анализа стандартного отклонения для каждого параметра относительно радиуса центра тяжести целевого функционала [Zhu, Kanamori, 2000]. Обработка данных выполнена с использованием процедур из пакетов Obspy, Rf и Seispy [Ху, Не, 2023] на языке программирования Python.

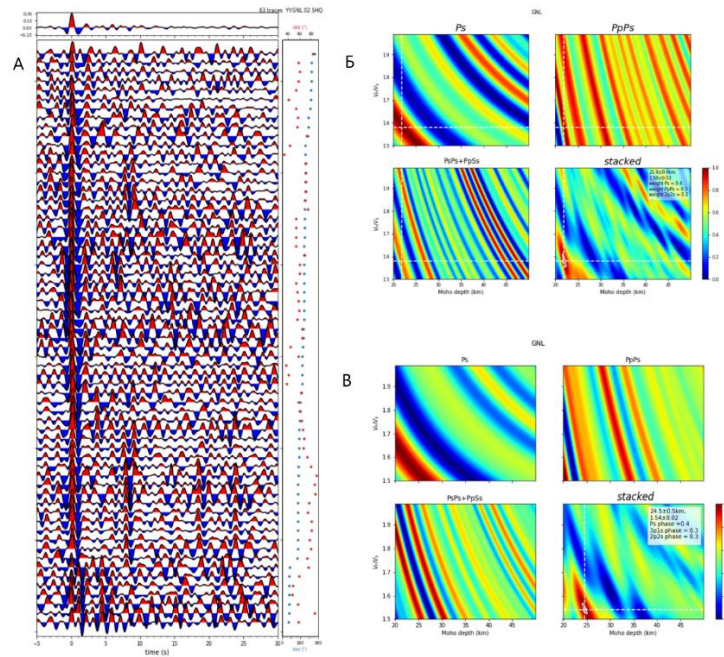


Рис. 5. Визуализация результатов применения H - k stacking к данным станции GNL: А – волновые формы индивидуальных и осредненной PRF (Q -компонента) от телесеизмических событий; Б – функция $s(H, k)$ на целевых фазах $P_s \setminus P_p P_s \setminus 2p_2s$ (т. е. $P_s P_s + P_p S_s$) и стекированная с весами $0.4 \setminus 0.3 \setminus 0.3$ после применения фильтра Гаусса (0.5–1.5) и деконволюции в частотной области; В – после применения фильтра Гаусса (0.5–1.2) и итеративной деконволюции во временной области.

На рисунке 5 представлен пример *H-k stacking* метода инверсии PRF для станции GNL. Визуализированы ранжированные по азимуту (BAZ) волновые формы индивидуальных PRF от телесейсмических событий, их суммарная PRF и распределение значений функционала (4) с представлением по каждой фазе. Индивидуальные PRF дополнительно анализировались с целью улучшения качества определения вступлений целевых фаз и подбора весовых коэффициентов w_i .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты оцененных *H-k stacking* методом значений мощности земной коры и осредненных значений отношения V_P/V_S под каждой из рассматриваемых станций представлены в табл. 1, на рис. 6 и 7. Среднее значение границы Мохоровичича под станциями, расположенными в центральном районе Камчатки, составило 31 км с вариацией от 23.4 до 40.1 км в районе Авачинской группы вулканов. Мощность коры в западной части полуострова 30–35 км со средней оценкой погрешности, не превышающей 0.5 км. В районе Авачинской зоны вблизи разлома наблюдается существенная вариация по глубине, значения изменяются от 23.4 км под станцией SDL до 40.1 км под станцией UGL.

Под станцией GNL, расположенной южнее вулканического комплекса Бакенин (в центре рассматриваемого района), расчетная глубина границы Мохоровичича составила 24.4 ± 0.5 км, отношение V_P/V_S составило 1.54 ± 0.02 , что несколько меньше среднего значения по всем станциям (см. табл. 1).

Таблица 1

Сейсмические станции: координаты, мощность земной коры и коэффициент отношения скоростей

Станция	Широта	Долгота	H , км	k	N
APC	52.9257	157.133	30.7 ± 0.9	1.71 ± 0.05	22
AVH	53.2642	158.7398	29.8 ± 0.6	1.70 ± 0.03	64
CR02	53.2836	158.4917	36.5 ± 1.5	1.86 ± 0.07	12
CR03	53.272	158.2004	34.0 ± 4.0	1.90 ± 0.19	12
CR04	53.1542	158.5382	32.1 ± 4.9	1.68 ± 0.21	10
CR06	53.0706	157.8194	28.5 ± 1.05	1.70 ± 0.07	8
CR09	52.7031	157.9948	28.1 ± 1.5	1.90 ± 0.03	11
CR11	53.2902	157.4711	29.4 ± 0.7	1.50 ± 0.02	11
DAL	53.0311	158.754	37.0 ± 1.4	1.79 ± 0.06	16
EH02	53.2705	159.7234	27.0 ± 4.1	1.81 ± 0.15	8
EH08	53.3858	158.976	38.6 ± 5.5	1.70 ± 0.21	12
EH09	53.1465	159.097	39.1 ± 1.1	1.87 ± 0.04	9
GNL	53.695	157.942	24.5 ± 0.5	1.54 ± 0.02	63
IVS	53.0659	158.608	26.5 ± 0.8	1.83 ± 0.05	10
KRE	53.304	158.749	27.2 ± 1.7	1.74 ± 0.11	16
KRK	53.296	158.643	34.8 ± 6.0	1.74 ± 0.23	19
KRM	52.8278	158.131	29.5 ± 5.1	1.96 ± 0.25	31
KRX	53.359	158.649	23.4 ± 0.8	1.62 ± 0.06	26
SBLV	54.3038	155.9611	35.8 ± 6.1	1.72 ± 0.24	9
SDL	53.278	158.887	23.7 ± 4.4	1.68 ± 0.12	24
SMA	53.266	158.812	25.9 ± 1.6	1.87 ± 0.08	27
SPN	53.1058	160.0114	26.2 ± 5.9	1.58 ± 0.25	13

UBL	52.8235	156.2821	32.5 ± 4.5	1.57 ± 0.13	9
UGL	53.21	158.8288	40.1 ± 5.5	1.84 ± 0.12	16
WH02	53.6065	157.289	35.8 ± 4.5	1.62 ± 0.12	17
WH03	53.4453	157.007	33.0 ± 1.3	1.60 ± 0.05	18
WH04	53.1807	157.158	29.9 ± 4.2	1.76 ± 0.07	11
WR01	53.0865	156.883	31.2 ± 1.6	1.68 ± 0.06	14
WR02	53.2707	156.8378	27.3 ± 2.8	1.52 ± 0.07	9
WR03	53.5451	156.685	28.9 ± 1.4	1.74 ± 0.08	9
WR04	53.8511	156.446	31.7 ± 0.7	1.63 ± 0.05	25

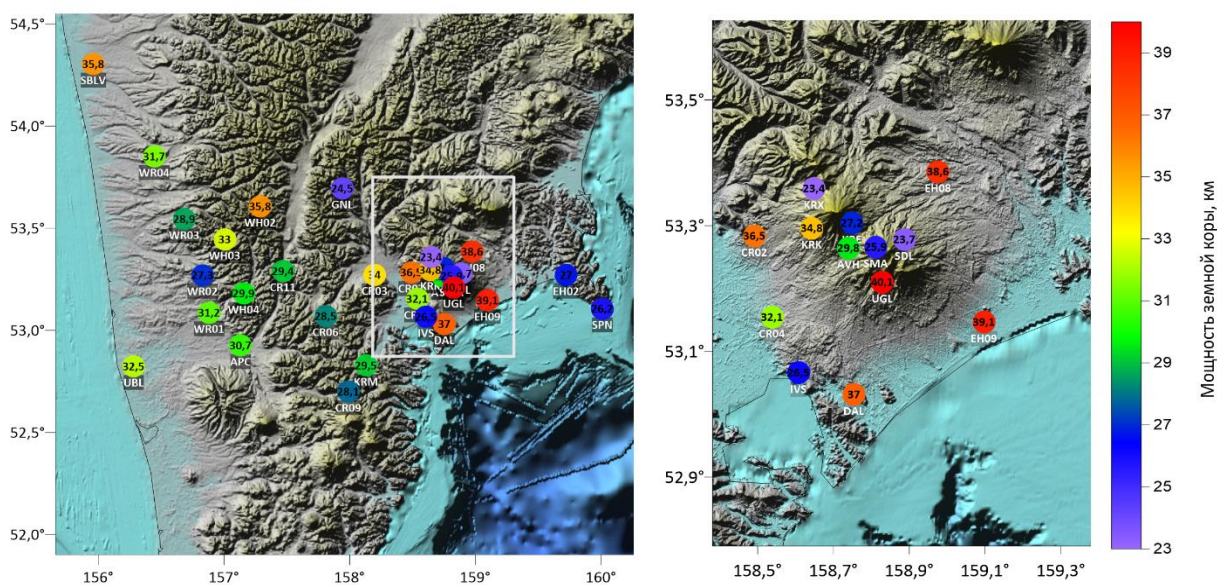


Рис. 6. Мощность земной коры в районе центральной Камчатки под сетью станций (см. табл. 1), оцененная $H-k$ методом.

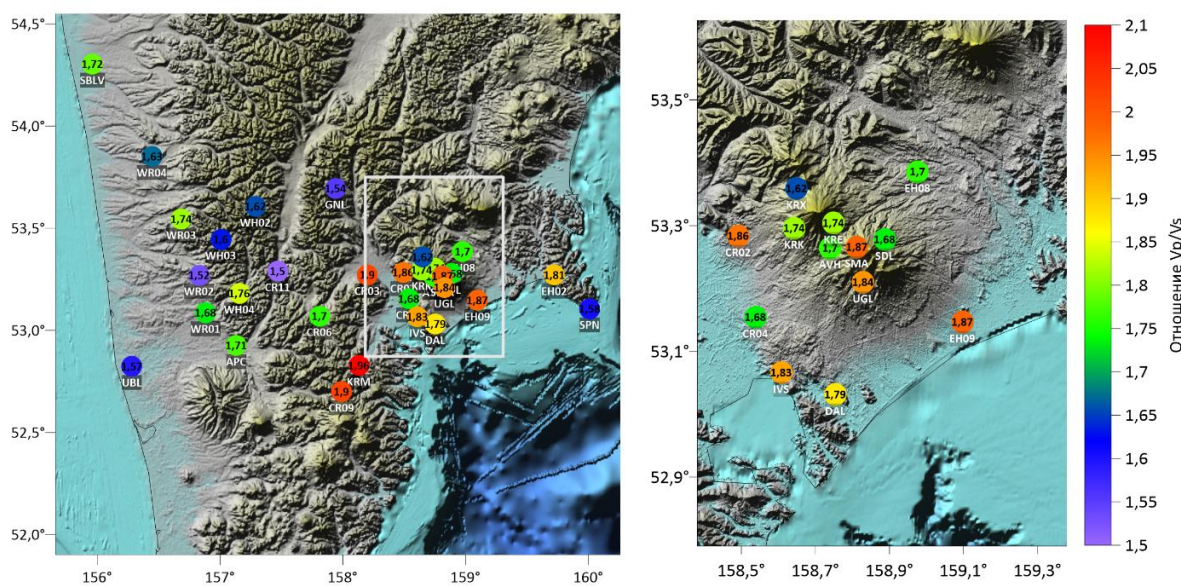


Рис. 7. Отношение V_p/V_s в районе центральной Камчатки под сетью станций (см. табл. 1).

Сравнивая значение мощности коры, 29.5 км под станцией KRM, полученное в настоящей работе, со значениями 30 км в работе [Гонтовая и др., 2007], 32 км в работе [Хритова и др., 2025] и 35 км в работе

[Резниченко и др., 2023], можно отметить практически полное совпадение в рамках интервального значения ошибки (см. табл. 1). Различие же по глубине, 26.5 ± 0.8 км, границы Мохо под станцией IVS, даже с учетом интервальной ошибки, при сравнении со значением, 33–35 км, в работе [Резниченко и др., 2023] можно объяснить различием как в методиках интерпретации приемных функций, так и в наборах данных по существенно раздробленной и неоднородной структуре коры, главным образом в грабеноподобной структуре МПЗ [Бушенкова, Кучай, 2023], как зоне вероятного влияния системы трансформных разломов в слэбе, особенно Авачинского (см. рис. 1). Тем не менее, полученные распределения сравниваемых значений достаточно близки к схеме мощности коры в исследовании [Гонтовая и др., 2007]. Выявленные региональные вариации мощности земной коры также согласуются с разрозненными результатами более ранних работ [Кузин, 1974; Levin et al., 2002].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в настоящем исследовании значения глубин границы Мохоровичича под центральной зоной полуострова Камчатка, в совокупности с предыдущими результатами, расширяют и во многом дополняют информацию о неоднородности мощности коры этой области, особенно в зоне влияния Авачинского трансформного разлома. Установлено, что в центральной Камчатке мощность коры варьирует в диапазоне 23–40 км, с выраженным максимумом (~40 км) в районе Авачинской группы вулканов и минимумом (<25 км) к югу от вулканического комплекса Бакенин. Наблюдаемая пространственная неоднородность согласуется с положением северо-восточного борта Малко-Петропавловской зоны разломов, что подтверждает ее глубинную природу и влияние на современную структуру коры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Авдейко Г.П., Савельев Д.П., Попруженко С.В., Палуева А.А.** Принцип актуализма: критерии для палеотектонических конструкций на примере Курило-Камчатского региона // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2003. № 1. С. 32–59. EDN:HRSHTV.
- Авдейко Г.П., Палуева А.А., Хлебородова О.А.** Геодинамические условия вулканизма и магмообразования Курило-Камчатской островодужной системы // Петрология. 2006. Т. 14, № 3. С. 248–265. EDN:HTQMVJ.
- Андреев А.А.** Трансформные разломы земной коры северо-запада Тихого океана // Тихоокеанская геология. 1993. № 3. С. 14–20.
- Бушенкова Н.А., Кучай О.А.** Структура краевых областей Малко-Петропавловской разломной зоны по данным локальной сейсмотомографии и механизмам очагов землетрясений // Геология и геофизика. 2023. Т. 64, № 10. С. 1485–1496. doi:10.15372/GiG2023130. EDN:CPNMVS.
- Винник Л.П.** Сейсмология приемных функций // Физика Земли. 2019. № 1. С.16–27. doi:10.31857/S0002-33372019116-27. EDN:BYXDGU.
- Гонтовая Л.И., Гордиенко В.В., Попруженко С.В., Низкоус И.В.** Глубинная модель верхней мантии Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 1 (9). С. 90–104. EDN:IAGJHT.
- Гордеев Е.И., Гусев А.А., Левина В.И., Леонов В.Л., Чебров В.Н.** Мелкофокусные землетрясения полуострова Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 28–38. EDN:HTUGUR.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Серия Южно-Камчатская. Лист N-57-XXVII (Петропавловск-Камчатский) / Ред. Б.А. Марковский. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. 303 с.

Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46, № 3. С. 22–34. EDN:NEAXOZ.

Кузин И.П. Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. М.: Наука, 1974. 132 с.

Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л., Бушенкова Н.А., Яковлев А.В. Форма слэбов в зонах субдукции под Курило-Камчатской и Алеутской дугами по данным региональной томографии // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 6. С. 830–851. EDN:NVUDEX.

Резниченко Р.А., Гоев А.Г., Алёшин И.М., Тарасов С.А., Гонтовая Л.И., Чебров Д.В. Глубинные скоростные разрезы района Авачинской бухты полуострова Камчатка, полученные методом функций приемника // Геофизические исследования. 2023. Т. 24, № 2. С. 25–38. doi:10.21455/gr2023.2-2. EDN:KBYGPRJ.

Хритова М.А., Мордвинова В.В., Кобелева Е.А. Структура земной коры и верхов мантии восточной части полуострова Камчатка по данным приемных функций продольных волн // Геодинамика и тектонофизика. 2025. Т. 16, № 3. 0831. doi:10.5800/GT-2025-16-3-0831. EDN:FOLQDJ.

Чебров Д.В., Копылова Г.Н., Касимова В.А., Макаров Е.О. Комплексные геофизические наблюдения и информационные ресурсы Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН (полуостров Камчатка) // Российский сейсмологический журнал. 2024. Т. 6, № 2. С. 7–26. doi:10.35540/2686-7907.2024.2.01. EDN:IRMSEH.

Шеймович В.С., Сидоров М.Д. Строение фундамента вулканического пояса, Юго-Восточная Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2000. № 5. С. 68–75.

Bushenkova N., Koulakov I., Bergal-Kuvikas O., Shapiro N., Gordeev E.I., Chebrov D.V., Abkadyrov I., Jakovlev A., Stupina T., Novgorodova A., Droznina S., Huang H.H. Connections between arc volcanoes in Central Kamchatka and the subducting slab inferred from local earthquake seismic tomography // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2023. Vol. 435. 107768. doi:10.1016/j.jvolgeores.2023.107768.

Gorbatov A., Kostoglodov V., Suárez G., Gordeev E. Seismicity and structure of the Kamchatka Subduction Zone // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1997. Vol. 102 (B8). P. 17883–17898. doi:10.1029/96JB03491.

Harland K.E., White R.S., Soosalu H. Crustal structure beneath the Faroe Islands from teleseismic receiver functions // Geophysical Journal International. 2009. Vol. 177 (1). P. 115–124. doi:10.1111/j.1365-246X.2008.04018.x.

Kennett B.L.N., Engdahl E.R. Traveltimes for global earthquake location and phase identification // Geophysical Journal International. 1991. Vol. 105. P. 429–465. doi:10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x.

Langston C.A. Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves // Journal of Geophysical Research. 1979. Vol. 84 (B9). P. 4749–4762. doi:10.1029/JB084iB09p04749.

Levin V., Park J., Brandon M., Lees J., Peyton V., Gordeev E., Ozerov A. Crust and upper mantle of Kamchatka from teleseismic receiver functions // Tectonophysics. 2002. Vol. 358 (1–4). P. 233–265. doi:10.1016/S0040-1951(02)00426-2.

Ligorria J.P., Ammon. C.J. Iterative deconvolution and receiver-function estimation // Bulletin of the Seismological Society of America. 1999. Vol. 89 (5). P. 1395–1400. doi:10.1785/BSSA0890051395.

- Syracuse E.M., Abers G.A.** Global compilation of variations in slab depth beneath arc volcanoes and implications // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2006. Vol. 7 (5). Q05017. doi:10.1029/2005GC001045.
- Vinnik L.P.** Detection of waves converted from P to SV in the mantle // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1977. Vol. 15 (1). P. 39–45. doi:10.1016/0031-9201(77)90008-5.
- Volynets O.N.** Geochemical types, petrology and genesis of Late Cenozoic volcanic rocks from the Kurile-Kamchatka island arc system // *International Geology Review*. 1994. Vol. 36 (4). P. 373–405. doi:10.1080/00206819409465467.
- Xu M., He J.** Seispy: Python module for batch calculation and postprocessing of receiver functions // *Seismological Research Letters*. 2023. Vol. 94 (2A). P. 935–943. doi:10.1785/0220220288.
- Zhu L., Kanamori H.** Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2000. Vol. 105 (B2). P. 2969–2980. doi:10.1029/1999JB900322.

REFERENCES

- Andreev A.A.** Transform faults of the Earth's crust, Northwestern Pacific // *Pacific Geology*. 1993. No. 3. P. 14–20. (In Russ.).
- Avdeiko G.P., Saveliev D.P., Popruzhenko S.V., Palueva A.A.** Principles of uniformitarianism: criteria for paleotectonic reconstructions by the example of the Kurile-Kamchatka region // *Vestnik KRAUNTS. Seriya Nauki o Zemle*. 2003. No. 1. P. 32–59 (In Russ.).
- Avdeiko G.P., Palueva A.A., Khleborodova O.A.** Geodynamic conditions of volcanism and magma formation in the Kurile-Kamchatka island-arc system // *Petrology*. 2006. Vol. 14 (3). P. 230–246. doi:10.1134/S0869591106030027.
- Bushenkova N., Koulakov I., Bergal-Kuvikas O., Shapiro N., Gordeev E.I., Chebrov D.V., Abkadyrov I., Jakovlev A., Stupina T., Novgorodova A., Droznina S., Huang H.H.** Connections between arc volcanoes in Central Kamchatka and the subducting slab inferred from local earthquake seismic tomography // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2023. Vol. 435. 107768. doi:10.1016/j.jvolgeores.2023.107768.
- Bushenkova N.A., Kuchay O.A.** The boundary areas structure of the Malko-Petropavlovsk fracture zone from local seismic tomography and earthquake foci mechanism data // *Russian Geology and Geophysics*. 2023. Vol. 64 (10). P. 1241–1250. doi:10.2113/rgg20234573.
- Chebrov D.V., Kopylova G.N., Kasimova V.A., Makarov E.O.** Integrated geophysical observations and information resources of the Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (Kamchatka Peninsula) // *Russian Journal of Seismology*. 2024. Vol. 6 (2). P. 7–26 (In Russ.). doi:10.35540/2686-7907.2024.2.01.
- Droznin D.V., Droznina S.Ya.** Interactive DIMAS program for processing seismic signals // *Seismic Instruments*. 2011. Vol. 47 (3). P. 215–224. doi:10.3103/S0747923911030054.
- Gontovaya L.I., Gordienko V.V., Popruzhenko S.V., Nizkous I.V.** A depth model for the upper mantle of Kamchatka // *Vestnik KRAUNTS. Seriya Nauki o Zemle*. 2007. No. 1 (9). P. 90–104. (In Russ.).
- Gorbatov A., Kostoglodov V., Suárez G., Gordeev E.** Seismicity and structure of the Kamchatka Subduction Zone // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1997. Vol. 102 (B8). P. 17883–17898, doi:10.1029/96JB03491.
- Gordeev E.I., Gusev A.A., Levina V.I., Leonov V.L., Chebrov V.N.** Shallow earthquakes in the Kamchatka peninsula // *Volcanology and Seismology*. 2006. No. 3. P. 28–38. (In Russ.).

- Harland K.E., White R.S., Soosalu H.** Crustal structure beneath the Faroe Islands from teleseismic receiver functions // *Geophysical Journal International*. 2009. Vol. 177 (1). P. 115–124. doi:10.1111/j.1365-246X.2008.04018.x.
- Kennett B.L.N., Engdahl E.R.** Traveltimes for global earthquake location and phase identification // *Geophysical Journal International*. 1991. Vol. 105. P. 429–465. doi:10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x.
- Khritova M.A., Mordvinova V.V., Kobeleva E.A.** Crustal and upper mantle structure in the eastern part of the Kamchatka Peninsula from *P*-wave receiver functions // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2025. Vol. 16 (3). 0831. (In Russ.). doi:10.5800/GT-2025-16-3-0831.
- Koulakov I.Yu., Dobretsov N.L., Bushenkova N.A., Yakovlev A.V.** Slab shape in subduction zones beneath the Kurile-Kamchatka and Aleutian arcs based on regional tomography results // *Russian Geology and Geophysics*. 2011. Vol. 52 (6). P. 650–667. doi:10.1016/j.rgg.2011.05.008.
- Kuzin I.P.** The focal zone and the upper mantle structure in the East Kamchatka region (In Russ.). Nauka, Moscow, 1974. 132 p.
- Langston C.A.** Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves // *Journal of Geophysical Research*. 1979. Vol. 84 (B9). P. 4749–4762. doi:10.1029/JB084iB09p04749.
- Levin V., Park J., Brandon M., Lees J., Peyton V., Gordeev E., Ozerov A.** Crust and upper mantle of Kamchatka from teleseismic receiver functions // *Tectonophysics*. 2002. Vol. 358 (1–4). P. 233–265. doi:10.1016/S0040-1951(02)00426-2.
- Ligorria J.P., Ammon. C.J.** Iterative deconvolution and receiver-function estimation // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1999. Vol. 89 (5). P. 1395–1400. doi:10.1785/BSSA0890051395.
- Markovskiy B.A.** (Ed.). State geological map of the Russian Federation. Scale of 1:200 000. South Kamchatka Series. Sheet N-57-XXVII (Petropavlovsk-Kamchatsky). Explanatory notes (In Russ.). VSEGEI, St. Petersburg, 2000. 303 p.
- Reznichenko R.A., Goev A.G., Aleshin I.M., Tarasov S.A., Gontovaya L.I., Chebrov D.V.** Deep velocity sections of the Avachinskaya bay area of the Kamchatka Peninsula obtained by the receiver function method // *Geophysical Investigations*. 2023. Vol. 24 (2). P. 25–38. (In Russ.). doi:10.21455/gr2023.2-2.
- Sheimovich V.S., Sidorov M.D.** South-eastern volcanic belt of Kamchatka: structure of the basement // *Volcanology and Seismology*. 2001. Vol. 22 (5). P. 505–514. EDN:LGUCZZ.
- Syracuse E.M., Abers G.A.** Global compilation of variations in slab depth beneath arc volcanoes and implications // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2006. Vol. 7 (5). Q05017. doi:10.1029/2005GC001045.
- Vinnik L.P.** Detection of waves converted from *P* to *SV* in the mantle // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1977. Vol. 15 (1). P. 39–45. doi:10.1016/0031-9201(77)90008-5.
- Vinnik L.P.** Receiver function seismology // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2019. Vol. 55 (1). P. 12–21. doi:10.1134/S1069351319010130.
- Volynets O.N.** Geochemical types, petrology and genesis of Late Cenozoic volcanic rocks from the Kurile-Kamchatka island arc system // *International Geology Review*. 1994. Vol. 36 (4). P. 373–405. doi:10.1080/00206819409465467.
- Xu M., He J.** Seispy: Python module for batch calculation and postprocessing of receiver functions // *Seismological Research Letters*. 2023. Vol. 94 (2A). P. 935–943. doi:10.1785/0220220288.
- Zhu L., Kanamori H.** Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2000. Vol. 105 (B2). P. 2969–2980. doi:10.1029/1999JB900322.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

СТУПИНА Татьяна Александровна – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: геостатистика, обработка и анализ сейсмических данных, методы построения оценок качества моделей.

БУШЕНКОВА Наталья Анатольевна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: структуры коры и мантии, тектонические процессы и закономерности, методы сейсмической томографии, комплексная интерпретация геофизических полей.

*Статья поступила в редакцию 24 ноября 2025 г.,
одобрена после рецензирования 2 декабря 2025 г.,
принята к публикации 3 декабря 2025 г.*