

Алгоритм расчёта временных невязок часов для автономных донных сейсмических станций и способ определения их позиций

■ Станюлис А.Л.-А., Пальцев И.О., ФГБУ "ВНИИОкеангеология", г. Санкт-Петербург.

Аннотация. Синхронизация по времени при использовании глобальной спутниковой системы позиционирования один из самых надежных и точных вариантов для сейсмических систем при наземном их развертывании, но не для подводных исследований с автономными донными сейсмическими станциями, поскольку электромагнитные сигналы не распространяются в воде. Если дрейф внутренних часов донной станции носит линейный характер, то временные поправки для зарегистрированных сейсмических данных могут быть определены с помощью глобальной спутниковой системы позиционирования при ее спуске и подъеме. Но для некоторых модулей в активной расстановке этого недостаточно, поскольку их нелинейная составляющая дрейфа часов может превышать технические допуски работ. Так же сейсмические данные не могут быть синхронизированы данным методом при разряде батареи донной станции или по причине нарушения условий эксплуатации их внутренних часов из-за ударов, вибрации и других факторов при развертывании и подъеме донных модулей. Мы представляем корреляционный метод получения временных невязок для автономных донных станций по зарегистрированным сейсмическим данным. При расчетах временной невязки за уход внутренних часов мы используем пикировки первых вступлений для водной волны. При этом мы предполагаем, что средства синхронизации обеспечивают требуемую точность для одной из двух станций при проведении корреляции данных между ними и такую станцию мы называем опорной станцией. На первом этапе расчета для каждой из станций, для исключения невязки, связанной с ошибками позиционирования донных станций, мы выполняем дифференцирование временных отметок времени для пикировок первых вступлений водной волны в направлениях по фиксированным азимутам на пункты возбуждений сейсмических сигналов. Мы считаем, что ошибки за позиционирование для донного оборудования присутствуют всегда в навигационных данных при производстве работ и поэтому на первом этапе их необходимо исключить из дальнейших расчетов. На втором этапе мы проводим вычитание полученных продифференцированных данных между опорной станцией и станцией рядовой сети. На финальном этапе, после проведения статистической обработки полученных данных, мы проводим операцию суммирования для получения невязки за уход часов для каждого момента регистрации сейсмических данных для рядовой станции. В статье мы показываем, что невязка за смещения донной станции по данным пикировок первых вступлений водной волны с достаточной точностью может быть представлена простой тригонометрической функцией, что дает возможность сделать независимыми алгоритмы вычисления ошибок за синхронизацию донной станции, и пространственной ошибки за положение донной станции в любой момент времени регистрации. Мы представляем в статье результаты расчетов по предложенному алгоритму при использовании модельных и реальных сейсмических данных.

Ключевые слова. синхронизация, автономная донная сейсмическая станция, пикировки первых вступлений водной волны, корреляция, невязка часов автономной донной сейсмической станции, опорная станция.

Введение

Точная синхронизация сейсмических записей имеет решающее значение для современных высокоразрешающих методов обработки при использовании полного азимута [Maver, 2011]. Синхронизация по времени при использовании глобальной спутниковой системы позиционирования (GPS) – это один из самых надежных и точных вариантов для синхронизации сейсмических систем при наземном их развертывании, но не для подводных исследований с автономными донными станциями, поскольку электромагнитные сигналы не распространяются в воде. Если дрейф внутренних часов носит линейный характер, то временные поправки для автономных донных сейсмических станций (АДСС) могут быть оценены с помощью GPS-

синхронизации, проводимой до и после их развертывания, но для некоторых модулей из общего числа регистраторов в активной расстановке этого недостаточно, поскольку их нелинейная составляющая дрейфа часов может не обеспечивать технических требований при проведении работ большой продолжительности [Boissy, 2020]. Так же сейсмические данные не могут быть синхронизированы данным методом при разряде батареи питания донной станции или по причине нарушения условий эксплуатации ее внутренних часов из-за ударов, вибрации, нарушении их герметичности и прочее. Другой особенностью современного донного оборудования является то, что длительность работы станции за счет внедрения Производителями оборудования собственных технических реше-

► **Рис. 1.**
Пример продолжительности работ при выполнении объёма в 1730 км.кв. МОВ ОГТ 3D-4C компанией Axxis Geo Solution AS на участке AX19200 в Норвежском море (продолжительность работ - 80 дней).

Survey name	AX19200
NPDID for survey	8973
Factmaps in new window	link
Status	Ferdig
Area	Nordsjøen
Marked available	Ja
Category	Seismisk undersøkelse
Main type	Havbunnseismisk undersøkelse
Sub type	3D
Company - responsible	Axxis Geo Solutions AS
Source type	Seismisk kilde
Number of sources	9
Source size	2320 cuin
Source pressure	2000 psi
Sensor type	Noder
Numbers of sensors	opp til 9000
Sensor length [m]	Nodene er ca 46 cm plassert i streng med 50 m avstand
Start date - planned	27.06.2019
Start date	01.07.2019
Completed date - planned	31.10.2019
Completed date	18.10.2019
Total length - planned [cdp km]	51000
Total length [cdp km]	58002
Total length - planned [boat km]	17000
Total length [boat km]	19334
Net area - planned 3D/4D [km2]	1939.00
Net area - actual 3D/4D [km2]	1730.00

ний в последние годы резко возросла. Стремление Производителей увеличить продолжительность работы АДСС и в то же время уменьшить их размерность связано с условием максимально адаптировать свои продукты для новых технологий производства сейсмических работ при использовании группы одновременно работающих судов-источников, за рубежом такая методика работ называется «Simultaneous sources». Сегодня при использовании большого количества донного оборудования и нескольких судов-источников Исполнитель работ может за один короткий полевой период в Арктике (2-3 месяца) проводить сейсмические работы MOB ОГТ 3D\4D-4C на площади исследования в несколько тысяч квадратных километров (рис. 1). В последние годы ряд зарубежных сейсмических компаний таких как: «Geospace», «Shearwater», «InApril», «Seisnode», отвечая современным запросам сервисных сейсмических компаний представили на рынке свои новые автономные донные сейсмические станции, которые могут работать без перезарядки до 150-200 дней и более.

Мы прогнозируем, что в будущем этот тренд сохранится, а стоимость самих станций будет снижаться за счет использования программно-аппаратных решений [Boissy, 2020; Hoogeveen, 2019], поэтому вопрос выработки независимого алгоритма контроля за синхронизацией АДСС по зарегистрированным сейсмическим данным сегодня становится все более актуальным. Представляемые сегодня за рубежом алгоритмы контроля синхронизации по сейсмическим данным используют пикировки времени первых вступлений сейсмической волны (FB), которые позволяют при правильном выборе модели для водного слоя рассчитать ошибки за синхронизацию

[Hoogeveen, 2019]. Условием корректного проведения таких математических вычислений является хорошее знание параметров такой модели [Zinn N, 1999]. Наиболее сложной будет такая математическая модель для мелководных морей или транзитных зон, где влияние на нее таких факторов как: изменения средней скорости в водном слое по времени, и по площади работ из-за перемещения и смешивания водных масс разной плотности; интерференция в области первых вступлений водной волны в следствии явления многолучевости, являются наиболее значимыми. И если при этих условиях учесть так же, что донная станция под действием внешних факторов может изменить свое положение в процессе регистрации то решение такой задачи становится вовсе не однозначным.

Мы представляем алгоритм получения временных невязок часов АДСС, который лишён вышеуказанных недостатков. При этом мы предполагаем, что средства синхронизации при использовании GPS систем при развертывании и подъеме обеспечивают высокую точность для одной из станций и такие станции мы называем опорными, а тестируемые станции называем станциями рядовой сети. Для расчетов мы используем сейсмограммы в сортировках по общему пункту приема (ОПП). Каждый такой набор сейсмических данных сформирован из одинаковых шаблонов, в которых проектное положение пунктов возбуждения (ПВ) являются идентичными. К каждой сейсмограмме ОПП мы применяем кинематическую линейную поправку (LMO) при использовании имеющихся начальных априорных данных о средней скорости в водном слое; глубине водного слоя в пункте приема (ПП); координатах источника

сейсмического сигнала; координате приемника. После применения временной линейной кинематической поправки (LMO) к сейсмическим данным мы проводим пикировку FB водной волны и этот массив данных будет включать в себя все ошибки при используемой нами априорной модели. Часть таких ошибок будут общими для всех пунктов приема (ПП) в активной расстановке, а часть ошибок являться «индивидуальными» для каждого донного модуля. К общим ошибкам можно отнести в первую очередь ошибки в выборе значений средней скорости в водном слое; систематические ошибки в пикировке первых вступлений водной волны из-за явлений интерференции; ошибки в положении центра группы источника сигнала и другие. К «индивидуальным» ошибкам для каждого донного модуля мы относим: ошибку за определение положения при его позиционировании и ошибку синхронизации при сейсмической записи. Предлагаемый нами алгоритм дает возможность сделать независимыми вычисления ошибки за синхронизацию донной станции, и ошибки за положение донной станции в любой момент времени регистрации. Поэтому становится возможным проведение расчета синхронизации с достаточной точностью для АДСС рядовой сети при использовании эталонной станции - опорной сети. Для верификации и повышения точности результатов вычислений для тестируемой станции они могут быть повторены при выборе нескольких опорных станций. При использовании предлагаемого нами решения возможно проведение позиционирования для станций рядовой и опорной сети для любого момента времени, в том числе и при многократном смещении станций.

Представляемое решение

После ввода поправки LMO к сейсмическим данным решение задачи по определению ошибки за смещение и синхронизацию для донного модуля можно ограничить двухмерным случаем. Согласно схеме расчета, представленной на рис. 2, ошибка за смещение АДСС может быть определена для двухмерного случая по следующей формуле:

$$(R_2^2 - R_1^2) = [(x_s - x_\delta)^2 + (y_s - y_\delta)^2] - (x_s^2 + y_s^2) = \Delta\delta^2 - 2R_1(x_\delta \cos(v) + y_\delta \sin(v))$$

$$(R_2 - R_1) = \Delta R = (\Delta\delta^2 / (R_1 + R_2)) - (2R_1 / (R_1 + R_2)) * (\Delta\delta \cos(\theta - v)) \quad (1)$$

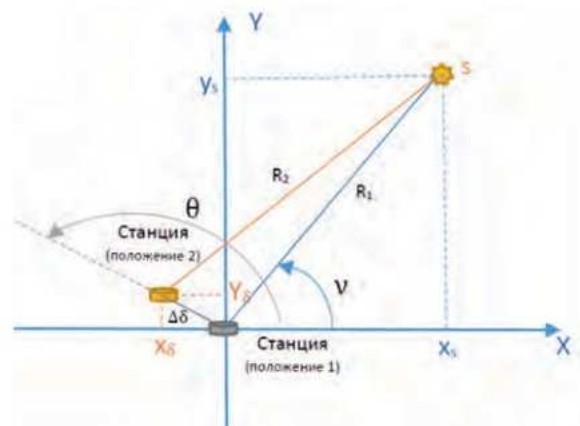
где $\Delta\delta$ – величина смещения АДСС, θ – азимут смещения, v – азимут видимости ПВ с ПП.

Тогда при выполнении условия

$$R_1 \gg \Delta\delta$$

$$\Delta R = \Delta\delta \cos(\theta - v) \quad (2)$$

▼ Рис. 2. Схема расчета. Положения донной автономной станции до смещения (положение 1) и после ее смещения (положение 2) и источника сейсмических сигналов, расположенного в точке S. R_1 и R_2 на схеме расстояние от точки S соответственно до донной станции для положения 1 и 2. Ось X ориентирована вдоль линии расстановки донных автономных сейсмических станций.



Это условие выполнимо для большинства удалений между ПП и ПВ при производстве работ с АДСС.

Тогда выражение для «индивидуальной» невязки по времени для донной станции с учетом (2) можно записать как:

$$\Delta t(V, v, t) = (\Delta \delta / V) * \cos(\theta - v) + \delta(t) \quad (3)$$

где $\delta(t)$ – неизвестная функция, связанная с уходом внутренних часов регистратора, а V – средняя скорость в водном слое.

Задав в (3) среднюю скорость в водном слое « V » и азимут « v » постоянным получим:

$$\Delta t(t) = C + \delta(t) \quad (4)$$

Таким образом из (4) следует, что на фиксированных азимутах расчета, если значение средней скорости определено верно и отсутствует влияние других факторов на вычисление то невязка по времени для отдельно стоящей станции определяется только уходом ее внутренних часов с постоянной составляющей C . При использовании (4) можно предложить различные приемы расчета для неизвестной функции ухода часов $\delta(t)$. В статье мы приводим способ, основанный на проведении дифференцирования отметок момента, полученных по FB вдоль фиксированных азимутов « v ». Проведение таких вычислений возможно и без опорных станций при глубоководных сейсмических исследованиях, где акустическая модель для водного слоя со временем не изменяется и возникающие ошибки связаны только с позиционированием донного модуля и нарушением синхронизации при сейсмической записи.

Для мелководных морей и транзитных зон, члены уравнения (4) будут входить

как слагаемые к сумме общих ошибок для всех станций в активной расстановке (рядовых и опорных). Таким образом алгоритм расчетов невязки за синхронизацию может быть сведен к следующей последовательности: на первой стадии вычислений проводится дифференцирование пикировок FB вдоль азимута видимости ПВ для каждой станции за счет чего мы получаем массив данных в котором отсутствует составляющая в невязки за позиционирование; на второй стадии расчетов при разности полученных значений между рядовыми и опорными станциями учитываются «общие» ошибки (учет изменения средней скорости, искажений пикировок FB из-за интерференции, смещения центра группы ПИ в зависимости от азимута его видимости и др.). Остаточные значения разности вычислений для рядовой станции при использовании опорных будут соответствовать ошибкам ухода часов для тестируемой станции. При статистической обработке мы выбираем временное окно для получения осредненных данных из предположения, что за данный интервал времени изменений в синхронизации не происходило, это легко обеспечить при расчете так как возбуждение сигналов проводится с высокой скоростью (обычно около 5 узлов $= 5 * 1,85 = 9,25$ км\час), а плотность сети отстрела очень высокая (обычно 25 метров). После интегрирования этих осреднённых ошибок можно получить значение функции за уход внутренних часов для всего времени регистрации. Таким образом высокая точность и помехоустойчивость алгоритма обеспечивается большим набором исходных данных и широкими окнами для осреднения сигнала перед интегрированием.

Так как современные АДСС имеют высокоточные внутренние часы и боль-

шинство модулей при недолговременных (обычно до 15-20 дней) измерениях сегодня в активной расстановке обеспечивают техническую точность по синхронизации, поэтому возможно использование данного алгоритма для проведения Контроля Качества (QC) синхронизации сейсмических данных при последовательном проведении расчетов для каждой пары регистраторов вдоль линии ПП. Правомерность такого подхода обусловлена тем, что вероятность того, что обе станции при таком расчете будут иметь ошибку в синхронизации весьма мала. Так же с учетом того, что полученный результат в уравнении (2) для dR представляет собой элементарную функцию косинуса от одной переменной - азимута расчета с известной частотой равной 1 Гц и неизвестными: амплитудой равной $\Delta\delta$ и фазой, соответствующему азимуту смещения θ , то представляется также возможным проведение вычислений с высокой точностью положения регистратора для любого момента времени

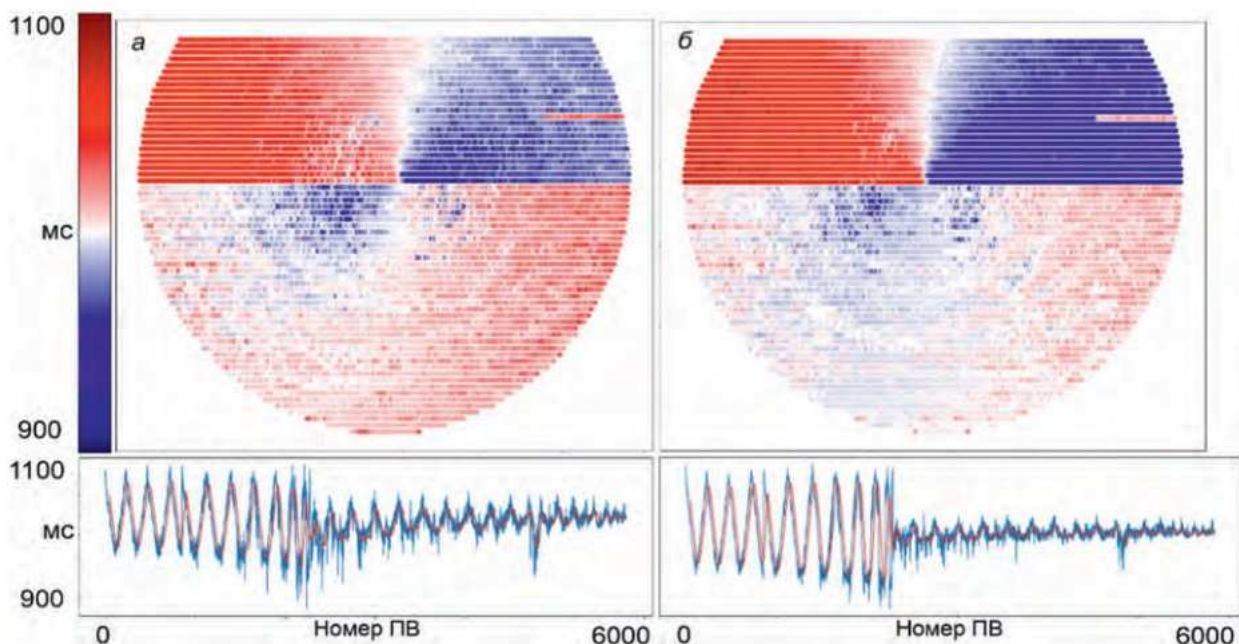
(любой линии ПВ или ее интервала).

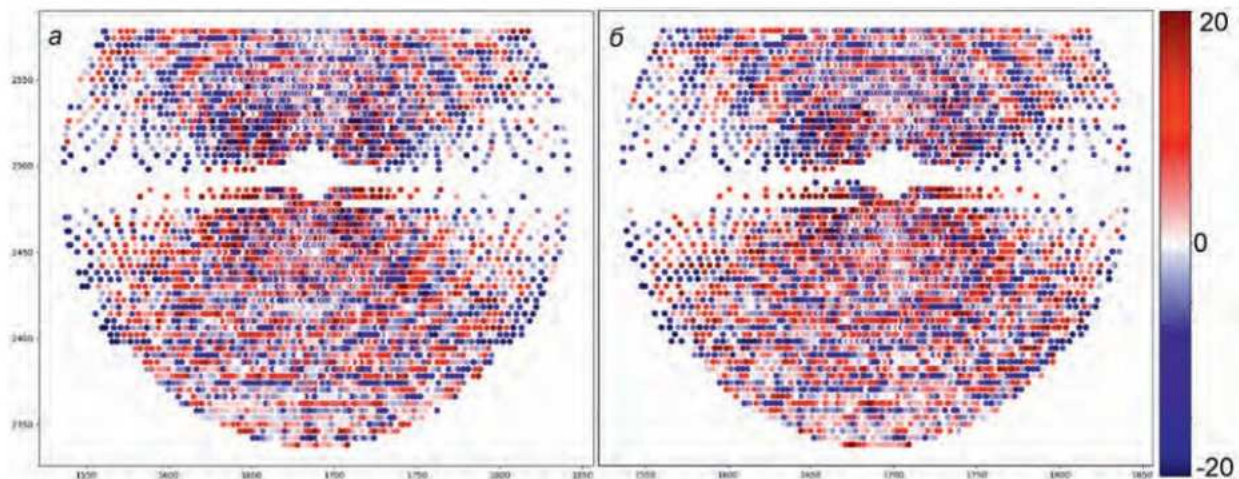
Результаты

Для расчёта величины ухода часов АДСС были взяты реальные полевые данные пикировок первых вступлений водной волны для двух станций, имеющих смещения от своих позиций более чем на 50 метров (рис. 3). Изменение их позиции происходило многократно во время проведения регистрации. Расчеты показали, что станции не имеют ухода часов и в дальнейшем, с целью оценки точности вычислений по предложенному алгоритму, расчеты были повторены при заданном уходе часов для станции «А» по линейному закону от 0 до -10 мс.

Согласно алгоритму, изложенному выше, были отсортированы невязки по азимутам для каждого пункта возбуждения и произведено осреднение этих значений, лежащих на одном профиле для окна ширина которого определяется сектором для угла видимости ПВ с ПП в 1 градус. После дифференцирования по

▼ Рис. 3. Пример значений FB после ввода поправки LMO для двух анализируемых станций. Радиус используемых данных при расчете ограничен удалением в 3000 метров. Нулевой уровень LMO смещен на 1000 мс. Нижний рисунок: графики LMO, ось ординат – время регистрации. Вертикальная шкала в мс.





▲ Рис. 4. Результаты дифференцирования по азимутам для каждой из станций в мс.

азимутам были получены расчетные данные для каждой из станций, в которых отсутствует составляющая за смещение модулей (рис. 4).

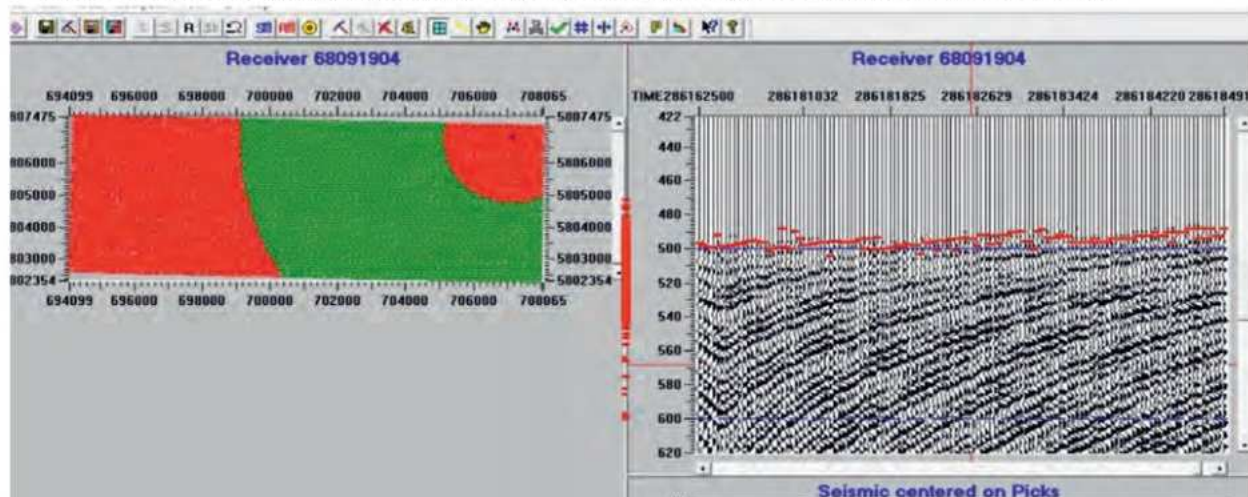
Как видно на рис.4 мы получили хорошо коррелируемые наборы продифференцированных данных для двух станций, имеющих выраженное радиальное распределение. Эти данные имеют высокую корреляцию, так как регистрация для них была проведена синхронно и все операции по пикированию первых вступлений были идентичными. Выраженная радиальная зависимость в данных обусловлена структурой пикировок первых вступлений водной волны из-за многолучевости, возникающей в ограниченном водном слое (волноводе). Пояснение

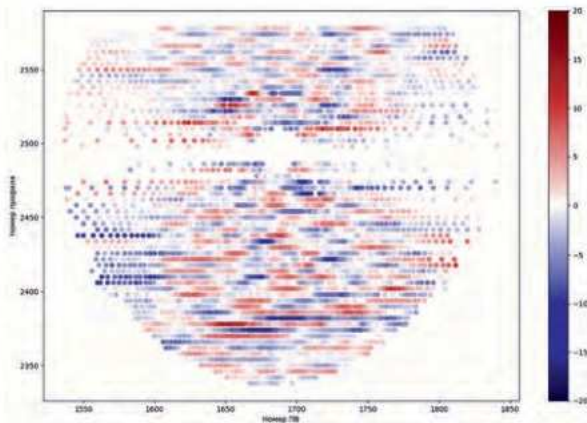
этого эффекта показано на рис. 5.

Поскольку все вносимые искажения в данные расчетов для станций А и Б являются общими (пикирование, выбор скорости, и прочее), на следующем шаге производится вычитание набора данных станции Б, являющейся опорной, из набора данных станции А - рядовой. Итоговая разность представлена на рис. 6.

Как видно на рис. 6 мы получили значения расчетов близкие к случайному распределению. В дальнейшем мы провели интегрирование данных при использовании временного окна, равного продолжительности времени отработки вдоль каждой линии ПВ. Мы предполагали при этом, что за время отработки вдоль линии возбуждения (это в среднем

▼ Рис. 5. Результаты пикирования первых вступлений в области волновода в мс.



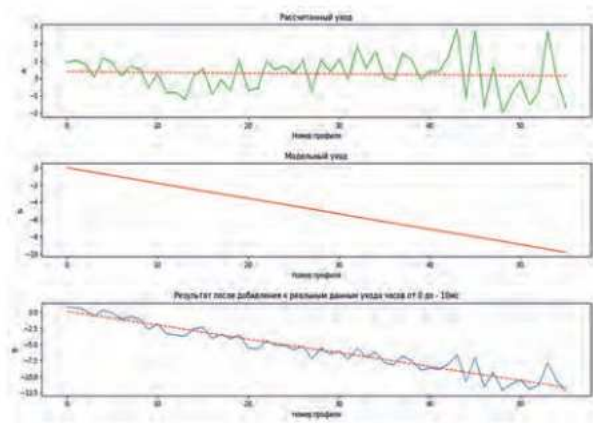


▲ Рис. 6. Результат вычитания (Б – А) в мсек.

2 часа) уход внутренних часов для АДСС пренебрежимо мал и не сопоставим с погрешностью вычислений. Результаты окончательных расчетов ухода внутренних часов АДСС «А» за все время работ представлены на рис. 7 (верхний график). Так как мы получили нулевой уход часов, мы повторили расчеты после ввода невязки по линейному закону от 0 до –10 мс. и эти результаты повторных расчетов представлены на нижнем графике рис. 7.

Мы не проводили уточнения позиций АДСС, т. к. это не являлось основной целью данных вычислений.

На следующем этапе для тестирования алгоритма были использованы модельные данные для прямоугольной системы

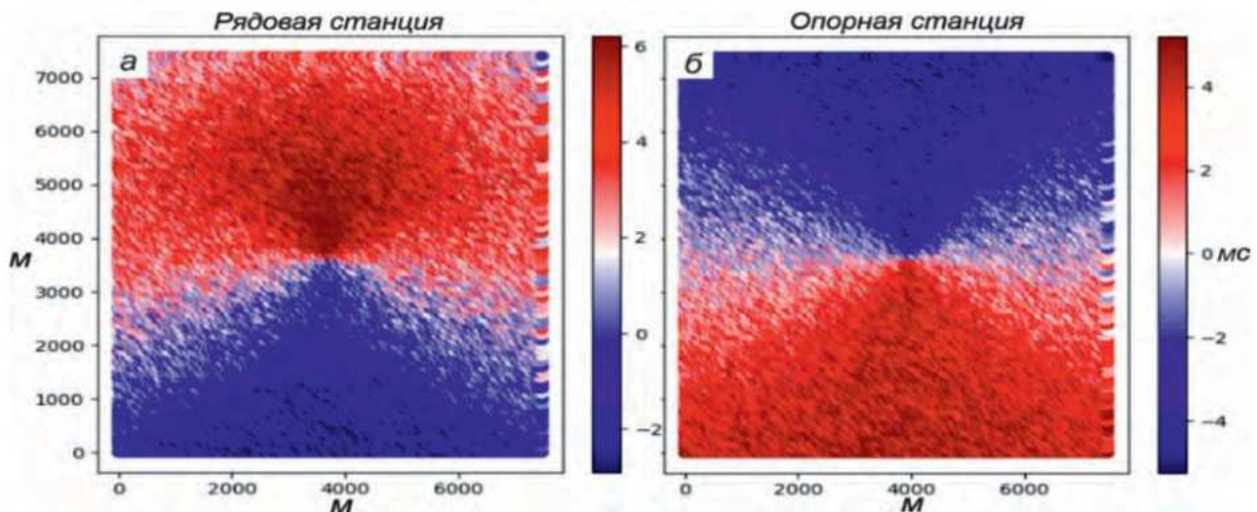


▲ Рис. 7. Результат вычислений полевых данных – верхний рисунок, Заданный модельный уход часов – средний график, Результат вычислений с введённым уходом часов – нижний график. Вертикальная шкала в мс, горизонтальная шкала соответствует номеру линии ПВ по времени их отработки.

координат с количеством линий возбуждения равным 75. Рядовая станция находилась в центре планшета, а опорная была смещена на +300 метров по оси абсцисс. Расстояние между соседними профилями составило 100 м, а шаг между пунктами возбуждения равнялся 25 м.

В модельных данных для каждой станции были заданы смещения относительно нулевого положения координат (x, y, h): (0; -6; -2) для первой и (0;6;2) для

▼ Рис. 8. Карта отклонений времен первых вступлений водной волны для смещённых станций, где (а) – значения для станции со смещением и уходом часов, (б) – значения для опорной станции со смещением, но без ухода часов.



второй. Для первой станции также задан уход внутренних часов, описываемый половиной периода синусоиды с максимумом в 3 мс. В оба набора данных для каждой трассы была введена случайная помеха в диапазоне максимальных значений от -2 до 2 мс. Для обеих станций было задано изменение скорости в водном слое во времени по линейному закону от 1499,5 до 1500,5 м/с. Карта модели отклонений времен первых вступлений водной волны для набора данных реальных координат от нулевых представлена на рис. 8.

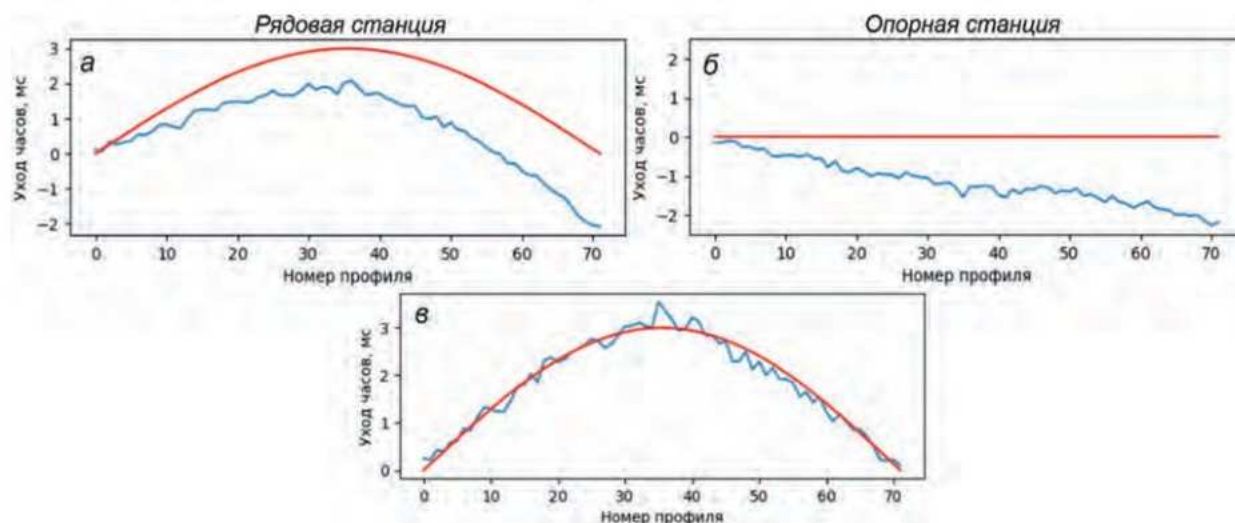
После обработки данных для опорной и рядовой станции были получены свободные от ошибок позиционирования графики ухода часов. Для освобождения данных от ошибок, связанных с изменением скорости в водном слое, производилось вычитание значений ухода опорной (рис. 9б) станции из значений рядовой станции (рис. 9а). итоговый график ухода внутренних часов для рядовой станции представлен на рис. 9в.

Анализируя графики (рис. 9) можно отметить влияние скорости в водном слое на уход часов на двух станциях. Первые два графика (рис. 9, а, б) сравнивают рассчитанный уход часов, получен-

ный на основе обработки модельных данных, с реальным уходом, представленным красной линией. Наблюдается тенденция к увеличению расхождения между рассчитанным и реальным уходом с течением времени. Это связано с заданным линейным изменением скорости в водном слое во времени от 1499,5 до 1500,5 м/с, которое моделирует реальный физический процесс, влияющий на определение ухода часов. В результате, наблюдается систематическое отклонение расчетного ухода от фактического. Вычитая значения рассчитанного ухода для опорной станции из значений для рядовой станции, мы устраняем влияние линейной зависимости скорости, поскольку она вносит одинаковые искажения для двух станций. В результате, на третьем графике (рис. 9, в) представлен фактический уход часов для рядовой станции в сравнении с заданными модельными значениями.

Отметим, что заданные ошибки являются вполне типичными при производстве сейсморазведочных работ, а часть из них (например, изменение скорости в 1 м/с) вовсе не могут быть обеспечены по точности инструментальными средствами.

▼ Рис. 9. Результат расчёта ухода часов по модельным данным, где (а) – рядовая станция, (б) – опорная станция, (в) – результат вычитания значений опорной станции из рядовой. Красный график – заданный для модели уход внутренних часов станции.



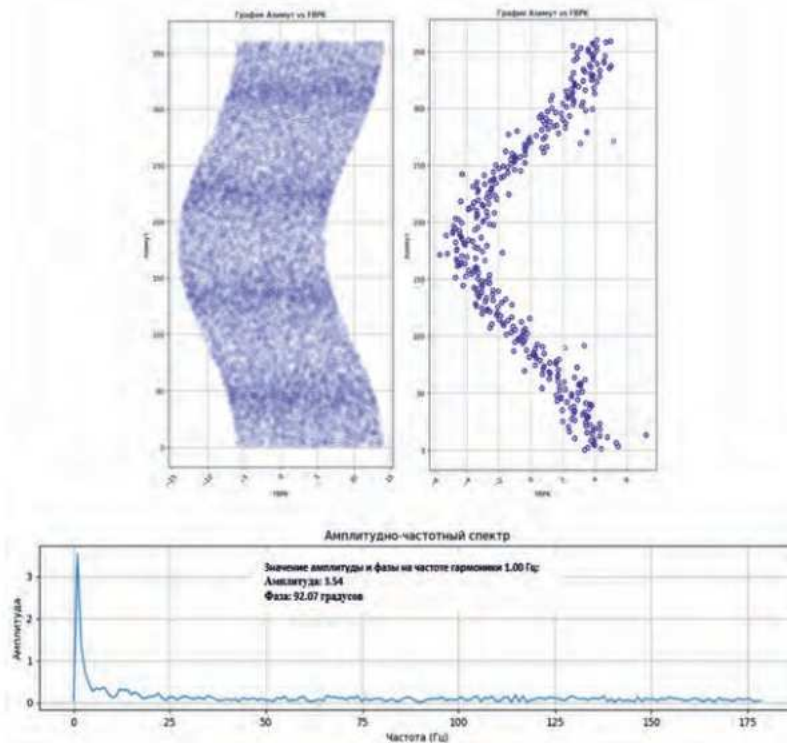


Рис. 10. Результат расчёта по позиционированию донной станции при использовании модельных данных. Верхние рисунки – точечные диаграммы отклонений значений FB в мсек при полно-азимутальной регистрации после применения к сейсмическим данным функции LMO: слева данные до осреднения; справа после осреднения в секторе в 1 град. Нижний график – график амплитудно-частотного спектра для осредненных данных. Значение амплитуды и фазы для спектров детектированы для гармоники частотой 1 Гц.

На рис.10, и рис.11 мы приводим пример расчетов по позиционированию донных регистрирующих систем. Мы проводили наши расчеты по данным для математической модели со следующими параметрами: смещение станции 6 метров; азимут смещения 90°; скорость в водном слое 1500 м\сек; соотношение

для пикировок FB $\text{сигнал} \backslash \text{noise} = 1 \backslash 2$. В первом варианте (рис.10) расчет проведен по полному азимуту, во втором случае (рис.11) мы ограничили азимут регистрации до 180°. Тем самым мы хотели показать возможности проведения «непрерывного» позиционирования для донных систем, при ограничении

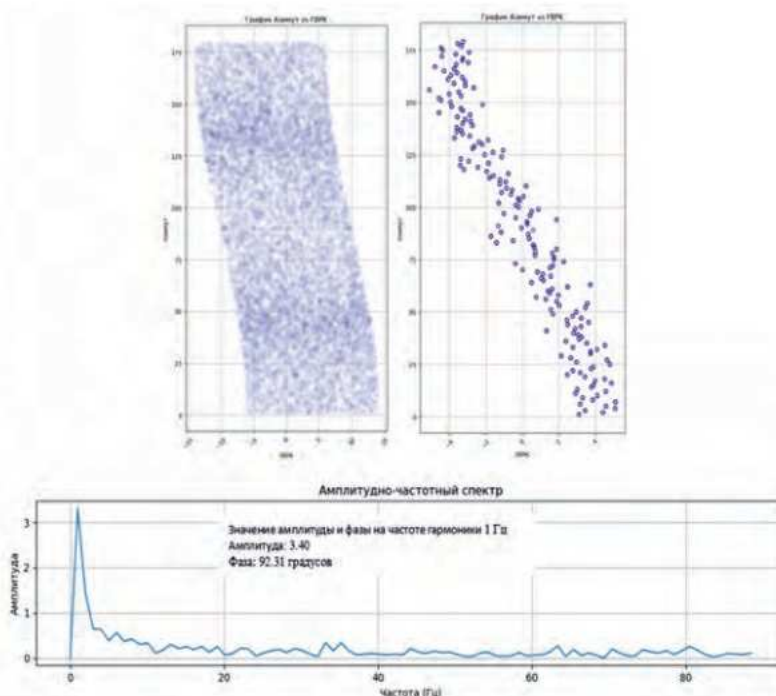


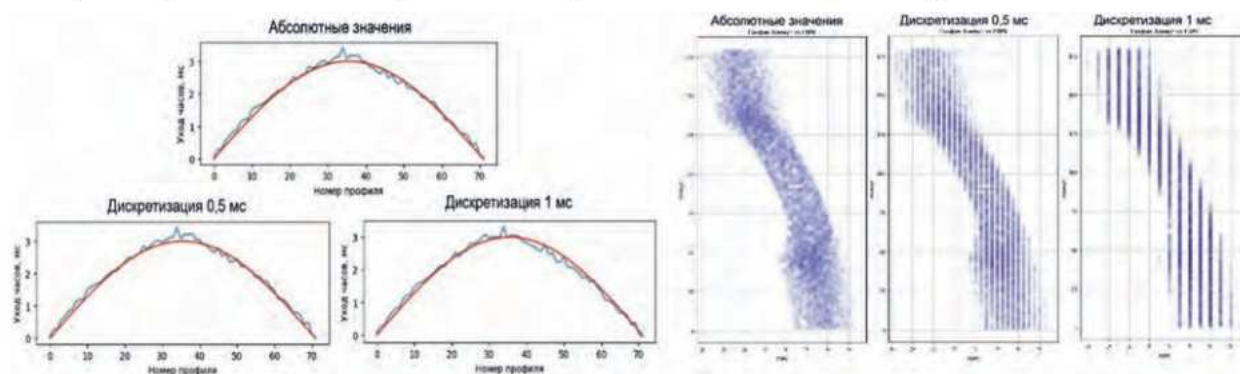
Рис. 11. Результат расчёта по позиционированию донной станции при использовании модельных данных. Верхние рисунки – точечные диаграммы отклонений значений FB в мсек при широко-азимутальной регистрации после применения к сейсмическим данным функции LMO: слева данные до осреднения; справа после осреднения в секторе в 1 град. Нижний график – график амплитудно-частотного спектра для осредненных данных. Значение амплитуды и фазы для спектров детектированы для гармоники частотой 1 Гц.

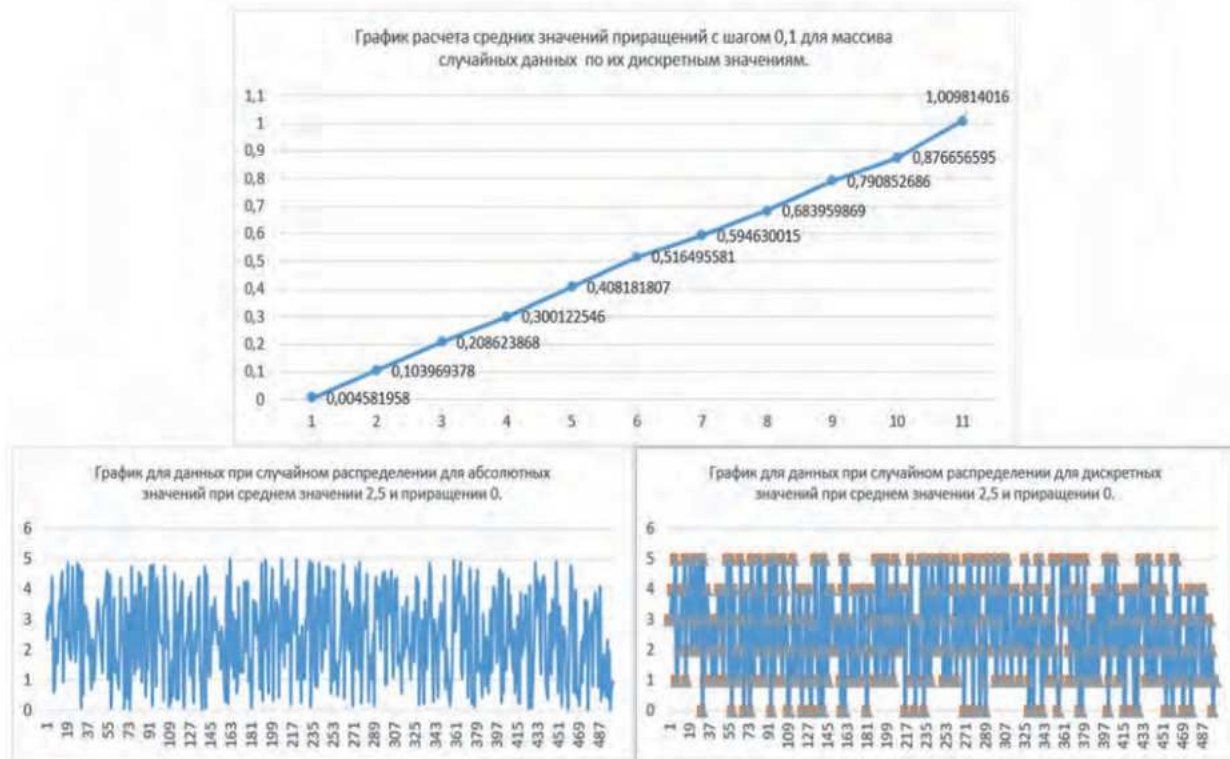
массива зарегистрированных сейсмических данных. Как видно из рис.10 и рис.11 расчеты при обработке данных в спектральной области дали следующие результаты: для модуля смещения $3,54 \cdot 1,5 = 5,31$ метра и 5,1 метра; и для азимута $92,07^\circ$ и $92,31^\circ$; ошибка в расчетах по позиционированию для донного регистратора составила 0,69 и 0,9 метра соответственно. При совершенствовании алгоритма расчета точность вычислений может быть существенно повышена.

В завершении, при обсуждении вопроса точности расчета для сейсмических данных, в зависимости от интервала их дискретизации, мы представляем на рис.12 результаты вычислений для тех же данных, что и на рис.9 с дискретизацией 0,5 мсек и 1 мсек. Полное совпадение результатов расчетов не зависимо от интервала дискретизации данных на рис. 12 мы объясняем тем, что создаваемый при дискретизации шум является просто аддитивной помехой к данным с нормальным распределением, который имеет свое среднее значение равно нулю для каждого окна осреднения и он не оказывает влияния на конечный результат расчета. Т.е. при большом массиве данных вычислений среднего значения мы получаем ту же точность не

зависит от того имеют данные дискретизацию или нет. Данный подход при анализе расчетов является вполне правомерным так как по мере усложнения сигнала в окне расчета корреляция между сигналом и шумом на выходе линейной системы (системы квантования) из-за ошибки квантования уменьшается [Оппенгейм 1979]. Если учесть, что мы всегда будем иметь в расчетах из-за качества пикирования выборки FB ошибку в не менее 2-5 отсчетов, а сам сигнал будет представлен суммой «общих» и «индивидуальных» регистрируемых ошибок для АДСС в активной расстановке, то тогда при дискретной регистрации сейсмических данных в 1 мсек, согласно нашим предварительным модельным расчетам, алгоритм может дать точность расчета невязки за уход внутренних часов АДСС в первые сотни мсек. Т.е. точность таких вычислений может оказаться выше чем при использовании стандартных на сегодня инструментальных средств для синхронизации АДСС при вводе линейной поправки, формируемой при развертывании и подъеме АДСС с использованием GPS систем и быть на уровне телеметрических сейсмических систем. Основным фактором, определяющим точность при таком алгоритме вычисле-

▼ Рис. 12. Результат расчёта ухода часов по модельным данным для абсолютных по точности регистрации данных, с дискретизацией 0,5 мсек и 1 мсек. Красный график – заданный для модели уход внутренних часов станции. Параметры модели те же, что и для представленных данных на рис.9.





▲ Рис. 13. Пример результата расчёта по дискретным данным среднего значения приращений с шагом 0,1 мсек для массива случайных данных. Среднеквадратическое значение ошибки при расчете составило 11,5 мсек.

ний, является, по нашему мнению, точность синхронизации, которая может быть обеспечена для опорной станции и большой объем используемых данных для вычислений. С получением большого объема данных при работах с АДСС, как уже ранее отмечалось, проблем нет, а задача точности синхронизации для опорных станций может быть решена при использовании различных методов: буев с GPS системой с прямой связью или при использовании цифровых акустических модемов, использование атомных часов, а сами такие опорные станции могут быть отличными по конструкции от рядовых АДСС и являться вспомогательной системой для получения сейсмических данных. Такой вывод по точности расчетов при использовании дискретизированных по времени сейсмических данных мы также подтверждаем простыми расчётами приращения среднего значения,

выполненного в Excel и представленного на рис.13. При этих расчетах к массиву случайных данных мы последовательно добавляли приращение с шагом 0,1 мсек, затем проводили их дискретизацию и затем расчет среднего значения. Формула (5) поясняет используемую нами при анализе результатов статистическую модель шума квантования сигнала.

$$X(n) = x(n) + e(n) \quad (5)$$

где $x(n)$ - «абсолютное» значение выборки и $e(n)$ - ошибка квантования; $X(n)$ - сигнал после проведения квантования.

$$\left(-\frac{\Delta}{2}\right) < e(n) < \left(\frac{\Delta}{2}\right) \quad (6)$$

где Δ - ширина шага квантования;

$$(\sigma e)^2 = \Delta^2 / 12, \quad (7)$$

где $(\sigma e)^2$ - дисперсия шума квантования.

Заключение

В работе рассмотрен алгоритм, позволяющий получить из зарегистрированных сейсмических данных значение невязки за уход внутренних часов АДСС и провести позиционирование донных систем при использовании сейсмических данных. Продемонстрировано на примере реальных и модельных сейсмических данных, когда обе станции имеют смещения и данные пикировок FB искажены интерференцией из-за многолучевости и других факторов, что алгоритм обеспечивает требуемую точность расчета для контроля синхронизации сейсмических данных и ее коррекции. Дана качественная и предварительная количественная оценка точности вычислений для дискретных сейсмических данных. Показано на моделях, что точность синхронизации при использовании данного алгоритма может достигать первых сотен мксек, т.е. быть сопоставима с точностью при работах с телеметрическим сейсмическим оборудованием. Метод может быть использован при обработке и регистрации сейсмических данных. С целью повышения точности вычислений данный алгоритм может быть построен на вычислении невязки для рядовой станции при использовании группы независимых расчетов от нескольких опорных станций. Планируется дальнейшая разработка алгоритма и программного кода для расширения области его применения для контроля и коррекции сейсмических данных за ошибки в синхронизации и позиционировании.

Литература

1. Башилов И. П., Волосов С. Г., Королёв С. А. Средства синхронизации автономных сейсмостанций в сейсмических группах // Сейсмические приборы, 2012, т. 48 (4), с. 27–39.

2. Попов Д. А. и др. "Программа для первичной обработки материалов автономных донных станций" ("OBS MANAGER"). – 2019.

3. Boissy C. Boosting global OBN performances with predictive software adapted to precision clocks based on low-power OCXOs // First Break, Volume 38, Issue 12, Dec 2020, p. 57–59.

4. Xiao F., Yang J., Liang B., Zhang M., Li R., Li F., Xiao H., Lei X., Liu Q., Heesom T. High-density 3D point receiver seismic acquisition and processing – a case study from the Sichuan Basin, China // First Break, 2014, т. 32 (1), с. 41–46. doi: 10.3997/1365-2397.32.1.72598

5. Hoogeveen J.: Method for establishing position and timing of seismic recording devices that are deployed on a seafloor // 2019-11-28 Publication of WO2019224354A1

6. Maver K. Ocean bottom seismic: Strategic technology for the oil industry // First Break. – 2011. – т. 29. – №. 12.

7. Zinn N. ResearchGate [электронный ресурс]. 1999: <https://www.hydro-metronics.com/downloads/GEOL%207333%20Term%20Paper.pdf> (Дата обращения 01.08.2024)

8. Оппенгейм А.В., Шафер Р.В. Цифровая обработка сигналов. Москва, «Связь». 1979.

Подробнее об авторах



Станюлис
Александр
Леонас-Альгирдасович

Начальник сектора
ФГБУ «ВНИИОкеан-
геология»



Пальцев
Илья Олегович

Инженер 1 категории
ФГБУ «ВНИИОкеан-
геология»