

ОТЧЕТ ПО ПРОЕКТУ РНФ №22-69-00231 «ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ НОДАЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПОД УПРАВЛЕНИЕМ ГРУППЫ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СРЕДСТВ НА ТРУДНОДОСТУПНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ СО СЛОЖНЫМ РЕЛЬЕФОМ МЕСТНОСТИ» ЗА 2024 Г.

1. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ АТТРИБУТОВ ДЛЯ ДВУМЕРНОЙ И ТРЕХМЕРНОЙ ВЕКТОРНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБОТАННЫХ ПОДХОДОВ К МИГРАЦИИ В ОБРАТНОМ ВРЕМЕНИ И УГЛОВОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ ВОЛН

Процесс отражения акустической волны или ее рассеяния на препятствии можно в каждый момент времени рассматривать как взаимодействие двух взаимосвязанных векторов: вектора падающего поля и порожденного им вектора отраженного или рассеянного поля. Тщательное изучение статистик амплитуд и фаз взаимосвязанных векторов для всего ансамбля событий по времени и источникам на основе предлагаемого *Interconnected Vector Pairs Image Conditions* позволяет по-новому взглянуть на традиционные проблемы регуляризации решений неустойчивых задач и построения изображения сред.

1.1. Построение сейсмических атрибутов

Каждая точка акустической среды при прохождении через нее волны является источником вторичного излучения, возмущение от которого может быть зарегистрировано, например, на поверхности. Разрабатываемые в геофизике математические методы могут «собрать» регистрируемое на поверхности поле и мигрировать его обратно в точку среды, где оно возникло. Наиболее развито это в *Wave-Equation-Based Methods* и в частности в методе RTM [Baysal, E., D. D. Kosloff, and J. W. C. Sherwood, 1983, Reverse time migration: *Geophysics*, 48, 1514–1524, doi: 10.1190/1.1441434.][Whitmore, N. D., 1983, Iterative depth migration by backward time propagation: 53th Annual International Meeting, SEG, Extended Abstracts, 382–385.][McMechan, G. A., 1983, Migration by extrapolation of time-dependent boundary values: *Geophysical Prospecting*, 31, 413–420, DOI: 10.1111/j.1365-2478.1983.tb01060.x.] где используется математический формализм решения сопряженных постановок – так называемый *Adjoint State Method* [Plessix, R.-E., 2006, A review of the adjoint-state method for computing the gradient of a functional with geophysical applications:

Geophysical Journal International, 167, 495–503, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02978.x>]. Этот метод является важной частью решения FWI [Alekseev A.S., and Erokhin G.N., 1989, Integration in geophysical inverse problems (Integrated Geophysics), USSR Academy of Sciences Proceedings, Volume 308. № 6., UDC 550.3:517.97, p.1327-1331][Symes, W. W., 2007, Reverse time migration with optimal checkpointing: Geophysics, 72, no. 5, SM213–SM221, doi: 10.1190/1.2742686.][Xie, X. B., 2015, An angle-domain wavenumber filter for multi-scale full-waveform inversion: 85th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1132–1137, <http://dx.doi.org/10.1190/segam2015-5877023.1>.] и описывает градиент целевой функции при оптимизации по скорости. Его вычисление относится к неустойчивым плохо-обусловленным и обратным задачам и требует регуляризации [Anikonov, U.E., B.A., Bubnov and G.N. Erokhin, 1997, Inverse and Ill-Posed Sources Problems, VSP, ISBN 90-6764-273-8.]. Для RTM такая регуляризация осуществляется за счет фильтрации в расширенных пространствах параметров – Extending Image Condition [Yoon, K., and K. J. Marfurt, 2006, Reverse-time migration using the Poynting vector: Exploration Geophysics, 37, 102–107.][Sava, Paul, and Sergey Fomel, 2006, Time-shift imaging condition in seismic migration: Geophysics, 71, no. 6, S209–S217.][Zhang, Q., and G. A. McMechan, 2011, Direct vector-field method to obtain angle-domain common-image gathers from isotropic acoustic and elastic reverse time migration: Geophysics, 76, no. 5, WB135–WB149, doi: 10.1190/geo2010-0314.1.][Vyas, M., D. Nichols, and E. Mobley, 2011, Efficient RTM angle gathers using source directions: 81st Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 3104–3108.][Yan, R., H. Guan, X.-B. Xie, and R.-S. Wu, 2014, Acquisition aperture correction in the angle domain toward true-reflection reverse time migration: Geophysics, 79, no. 6, S241–S250, <http://dx.doi.org/10.1190/geo2013-0324.1>.]

В настоящем подходе предлагается рассматривать падающее и рассеянное поле в виде взаимосвязанных векторных полей, где в каждый момент времени вектор рассеянного поля порождается вектором падающего поля. Тщательное изучение статистик амплитуд и фаз взаимосвязанных векторов для всего ансамбля событий по времени и источникам позволяет сформировать некое множество пар, которое далее по тексту имеет название Vector Domain Common Image Gathers (VDCIG).

Акустическая волна рассматривается как пара (p, \vec{u}) где p – давление, а \vec{u} – векторное поле скорости частицы. Они удовлетворяют линейным дифференциальным уравнениям первого порядка [Pierce A.D., 1989, Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications, ISBN-13: 978-0883186121]. Прямая волна удовлетворяет задаче Коши:

$$\begin{aligned}
p_t^f - c^2 \operatorname{div}(\vec{u}^f) &= r(t)\delta(x - x_s) \\
\vec{u}_t^f &= \nabla p^f \\
p^f|_{t=0} &= 0, \quad \vec{u}^f|_{t=0} = 0.
\end{aligned} \tag{1}$$

Здесь $r(t)\delta(x - x_s)$ – источник, расположенный в граничной точке $x_s \in \Gamma = \{x \in \mathbb{R}^n | x^n = 0, n = 2, 3\}$ (δ – функция Дирака, а r – некоторый вейвлет), T – время наблюдения. Пусть $p_0 = p^f|_{\Gamma \times [0, T]}$ – «измеренное» давление. Тогда сопряженная задача к задаче (1) записывается следующим образом:

$$\begin{aligned}
p_t^b - c^2 \operatorname{div}(\vec{u}^b) &= 0 \\
\vec{u}_t^b &= \nabla p^b + p_0 \delta(x^n) \vec{\nu}_\Gamma \\
p^b|_{t=T} &= 0, \quad \vec{u}^b|_{t=T} = 0,
\end{aligned} \tag{2}$$

где $\nu_\Gamma = (0, \dots, 0, 1)$ – единичный нормальный вектор к Γ . (p^b, \vec{u}^b) называется обратной волной, поскольку распространяется в обратном времени. Таким образом, прямая (p^f, \vec{u}^f) и (p^b, \vec{u}^b) обратная волны включают в себя два векторных поля: $\vec{u}^f(x, t; x_s)$ и $\vec{u}^b(x, t; x_s)$. Для каждого фиксированного источника x_s векторное поле $\vec{u}^b(\cdot; x_s)$ генерируется полем $\vec{u}^f(\cdot; x_s)$. Далее будут использованы сокращенные обозначения $f = \vec{u}^f$, $b = \vec{u}^b$.

Типичное поведение взаимосвязанной векторной пары (Interconnected Vector Pair – IVP) (f, b) при некоторых фиксированных значениях x, x_s представлено на рисунке 1.

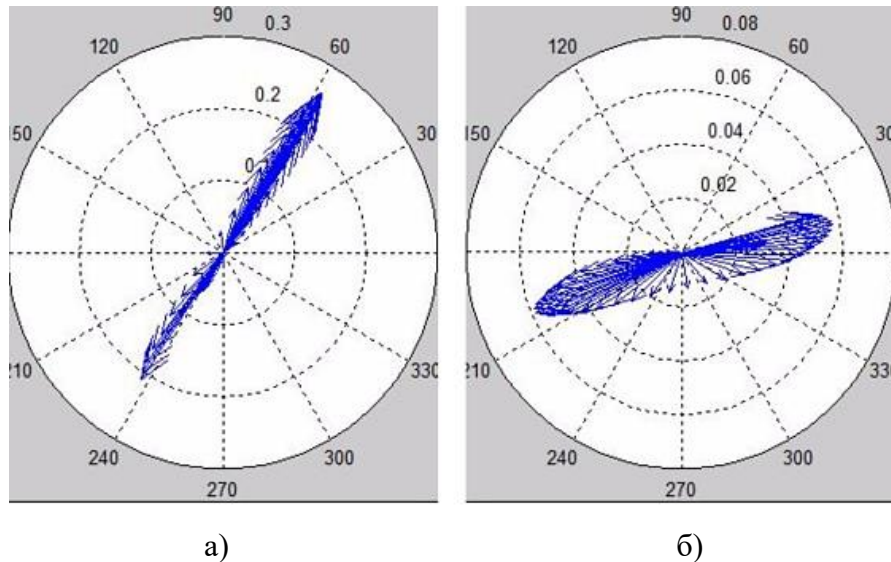


Рисунок 1 – Пример зависящей от времени пары (f, b) в некоторой фиксированной точке x и фиксированного x_s . Поле вектора скорости прямой частицы f во времени (а) и поле вектора скорости обратной рассеянной волны b (б)

При использовании статистики взаимосвязанных векторных пар (f, b) для некоторого набора временных выборок $\tau(x, x_s)$ (около времени прибытия), на примере

рисунка 1 видно, что приблизительно максимальные величины f наблюдаются для углов падения $\alpha \simeq 55^\circ$ и 235° . При этом максимальные величины b наблюдаются для углов рассеяния $\beta \simeq 15^\circ$ и 295° . Поэтому возможно найти угол раскрытия $\theta = (\alpha - \beta)/2 \simeq 20^\circ$ и угол наклона $\gamma = (\alpha + \beta)/2 \simeq 35^\circ$. Отметим, что максимальные величины рассеянной волны почти на порядок меньше падающей. Этот пример показывает, что IVP можно использовать для определения некоторых характеристик акустических сред. Это можно сделать в каждой точке на основе статистического анализа IVP на некотором наборе источников и временных выборок. Далее вводится понятие условия взаимосвязанных векторных пар (Interconnected Vector Pairs Image Conditions – IVPIC) следующим образом:

$$I(x) = R_Q(f, b)(x) \quad (3)$$

Здесь векторные пары (f, b) определяются на допустимом множестве Q вида:

$$Q \subseteq \{t_k, x_s | t_k = \tau(x, x_s) + k\Delta t, k = 0, \dots, N \subset t, s = 1, \dots, N_s\}$$

а R_Q – это некоторый оператор, применяемый к паре векторов (f, b) на Q . Такие пары векторов далее по тексту будут обозначаться как допустимые векторные пары. Оператор R_Q может иметь, например, следующий конкретный вид:

$$R_Q(f, b)(x) = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{k=0}^{N_k} \langle f, b \rangle (x; t_k, x_s), \quad (3a)$$

где \langle, \rangle означает скалярное произведение,

$$R_Q(f, b)(x) = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{k=0}^{N_k} (|f| |b|)(x; t_k, x_s) \quad (3б)$$

$$R_Q(f, b)(x) = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{k=0}^{N_k} (|b|/|f|)(x; t_k, x_s) \quad (3в)$$

$$R_Q(f, b)(x) = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{k=0}^{N_k} M(|f| |b|)/M|f|^2, \quad (3г)$$

где M – математическое ожидание,

$$R_Q(f, b)(x) = \min_{-\pi \leq \theta_0 \leq \pi} D(\theta - \theta_0), \quad (3д)$$

где D – дисперсия для допустимого множества Q ,

$$R_Q(f, b)(x) = \arg \min_{\theta_0} D(\theta - \theta_0), \quad -\pi \leq \theta_0 \leq \pi \quad (3e)$$

и пр.

Отметим, что случай (3б) $R_Q(f, b) = |f| |b|$ сходен с Imaging Conditions для RTM, а случай $R_Q(f, b) = \langle f, b \rangle$ описывает Imaging Conditions аналогичное [Stolk, C. C., M. V. de Hoop, and T. Op't Root, 2009, Linearized inverse scattering based on seismic reverse-time migration: Proceedings of the Project Review, Geo-Mathematical Imaging Group (Purdue University, West Lafayette IN), 91–108.][Whitmore N. D., and Sean Crawley, 2012, Applications of RTM inverse scattering imaging conditions: 82nd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, doi: <http://dx.doi.org/10.1190/segam2012-0779.1>]. Допустимое множество Q (фильтрация) играет важную роль. Пары $(f, b)(x; t_k, x_s)$, такие что $(x; t_k, x_s) \notin Q$ не учитываются. Построение допустимого множества Q в угловой области (α, β) или (θ, γ) аналогичная фильтрация на основе локальной матрицы изображения [Xie, X., and R. S. Wu, 2002, Extracting angle domain information from migrated wavefields: 72nd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1360–1363.][Yan, R., and Xie, X.-B., 2009, A new angle-domain condition for prestack reverse-time migration: 79nd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2784-2788].

Методы построения сейсмических атрибутов на основе описанного выше подхода в общем виде описаны далее. Там же детально рассматривается метод выделения дифракционной компоненты, который носит название Diffraction Reflection Ratio (DRR). Это относительный показатель рассеянной дифракционной энергии к отраженной ее части. Метод построения этого показателя, который носит название DRR Scattering Vector-based Seismic Exploration (DRR SVSE), очень важен для выделения трещинно-кавернозных структур [Erokhin G., Danilin A. and M. Kozlov, 2018, Visualization of Ultra-Weak Diffractors based on Vector Pair RTM, 80th EAGE Conference and Exhibition 2018, doi: 10.3997/2214-4609.201801648]. Ниже приведены примеры построения этим методом изображения трещинных структур.

Второй метод ориентирован на построение синфазной части рассеяния и носит название Depth Imaging Scattering Vector-based Seismic Exploration (DI SVSE). Он выделяет отражающие структуры и близок к традиционному методу RTM (Reverse Time Migration). Отличие состоит в том, что RTM Imaging строится на основе давления [Baysal, E., D. D. Kosloff, and J. W. C. Sherwood, 1983, Reverse time migration: Geophysics, 48, 1514–1524, doi: 10.1190/1.1441434.][Whitmore, N. D., 1983, Iterative depth migration by backward time propagation: 53th Annual International Meeting, SEG, Extended Abstracts, 382–385.][McMechan, G. A., 1983, Migration by extrapolation of time-dependent boundary values: Geophysical

Prospecting, 31, 413–420, DOI: 10.1111/j.1365-2478.1983.tb01060.x.], a Depth Imaging SVSE на основе векторных скоростей частиц [Erokhin G., Time-dependent scattering in reverse time holography method: 83rd EAGE Annual Conference & Exhibition, Jun 2022, Volume 2022, p.1–5 <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202210094>]. Примеры построения Depth Imaging SVSE представлены в отчетных материалах проекта за 2023 год.

Третий метод оценивает скорости в среде. Оценка скорости осуществляется в каждом вокселе среды на основе расчета времен прихода прямой волны и обращенной во времени. Невязка времен приходов (Arrival Time Discrepancy –ATD) затем, связывается с возмущением скорости в этом вокселе на основе уравнения эйконала [Gennady Erokhin and Vitaly Bryksin, High-resolution velocity model estimation by the RTH method, 2020, SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2020: 2863-2867 <https://doi.org/10.1190/segam2020-3410422.1>]. Метод называется RTH Velocity SVSE.

Четвертый метод связан с вычислением флуктуации акустического импеданса относительно изначально заданной модели скорости и плотности [Erokhin G., Reverse Time Holography Approach based on the Vector Domain Common Image Gathers, 2019, SEG Technical Program Expanded Abstracts 2019: 4107-4111., <https://doi.org/10.1190/segam2019-3201622.1>]. Он носит название Relative Impedance SVSE.

Пятый метод рассчитывает углы рассеяния, связанные с синфазной частью рассеяния (отражением) и называется Opening Angle SVSE [Erokhin Gennady, Danilin Aleksandr, and Maksim Kozlov, 2018, Extension of the common image gathers by VPRTM method. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2018: pp. 4438-4442.], Он оперирует фазовой информацией рассеянных волн.

Все пять методов являются составляющими одного общего подхода в сейсморазведке рассеянных волн, который носит название Reverse Time Holography Approach (RTH) [Erokhin G., Time-dependent scattering in reverse time holography method: 83rd EAGE Annual Conference & Exhibition, Jun 2022, Volume 2022, p.1 – 5 <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202210094>][Erokhin G., Reverse Time Holography Approach based on the Vector Domain Common Image Gathers, 2019, SEG Technical Program Expanded Abstracts 2019: 4107-4111., <https://doi.org/10.1190/segam2019-3201622.1>].

Оценки всех сейсмических атрибутов в методах строятся как вычисление моментов многомерного статистического распределения. Как правило, широко известные сейсмические атрибуты совпадают с первым моментом. К таким, например, относится Opening Angle, Dip Angle, Frequency и др.

RTM и RTH

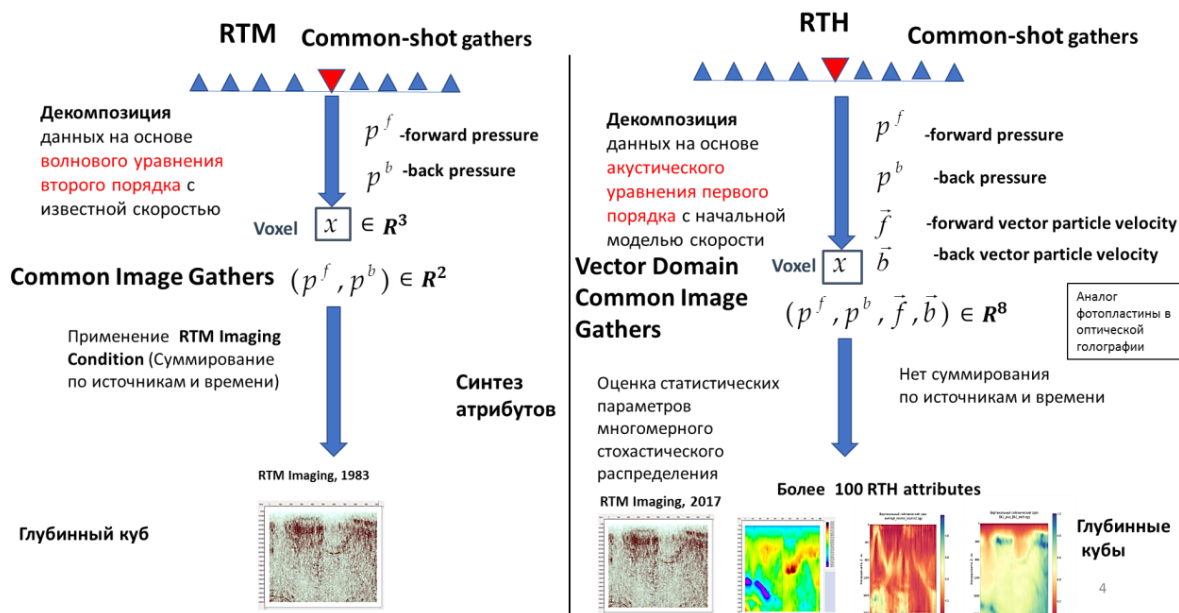


Рисунок 2 – Сравнение графа обработки сейсмической информации в RTM и в RTH

На рисунке 2 и в таблице 1 приведены сравнительные характеристики наиболее известного на данный момент метода обработки данных RTM (Reverse Time Migration) и комплекса вышеописанных методов в рамках RTH подхода.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики подходов RTM и RTH

RTM (1983)	RTH (2017)
<p><i>Базовые принципы:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Обращение во времени (Reverse Time) для давления 	<p><i>Базовые принципы:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Обращение во времени (Reverse Time) для давления и векторов скорости • Двухлучевая интерферометрия, лежащая в основе оптической голографии
<i>Входные данные:</i> 3Д/2Д ОГТ(ОТВ)	<i>Входные данные:</i> 3Д/2Д ОГТ(ОТВ)
<i>Количество параметров декомпозиции сейсмических данных общей точки взрыва (CIG):</i> 2	<i>Количество параметров декомпозиции сейсмических данных общей точки взрыва (VDCIG):</i> 8
<i>Модель рассеяния:</i> не зависит от частоты	<i>Модель рассеяния:</i> может зависеть от частоты
<i>Количество глубинных сейсмических атрибутов метода:</i> 1 (куб глубинной миграции)	<i>Количество глубинных сейсмических атрибутов метода:</i> куб глубинной миграции и еще более 100, включая все известные в сейсморазведке атрибуты
<i>Скоростная томография:</i> отсутствует	<i>Скоростная томография:</i> имеется. Пространственное разрешение до 1 метра
<i>Учет верхней части разреза (ВЧР):</i> необходим предварительный расчет статических поправок ВЧР	<i>Учет верхней части разреза:</i> автоматический учет ВЧР, расчет статических поправок не требуется

Продолжение таблицы 1

RTM (1983)	RTN (2017)
<i>Система регистрации сейсмических данных: регулярная, типа «крест», кратность не ограничена</i>	<i>Система регистрации сейсмических данных: произвольная, метод устойчив на разреженных регулярных и нерегулярных системах регистрации и возбуждения средней кратности (до 80)</i>
<i>Время обработки данных для 100 кв.км: 10 суток</i>	<i>Время обработки данных для 100 кв.км: 1 сутки</i>
<i>Уровень автоматизации: требуется постоянное участие группы высококвалифицированных специалистов по обработке</i>	<i>Уровень автоматизации: полная автоматизация процесса обработки. Требуется участие 2-х специалистов среднего звена</i>
<i>Применение в геологическом прогнозе методами III: малая эффективность, особенно для горизонтальных скважин</i>	<i>Применение в геологическом прогнозе методами III: высокая эффективность, безальтернативен для горизонтальных скважин</i>

1.2. Примеры построения атрибутов для моделей

В настоящем исследовании рассматривается двумерный случай. Для решения задач (1)–(2) используется метод конечных разностей во временной области с разнесенными сетками в пространстве и времени. Пространственные производные аппроксимируются с 12-м порядком точности, а временные – со вторым порядком точности. Параметры моделирования следующие: вся вычислительная область $17 \times 3.5 \text{ km}$, шаг пространственной сетки 5 m , количество источников 200, шаг между источниками 50 m , 701 количество приемников, 10 m интервал приемников, 0.4 ms временной шаг, $r(t)$ – вейвлет Рикера с доминирующей частотой 40 Hz .

Важной проблемой для методов типа RTM является обнаружение дифракций на фоне сильных отражений [Landa, E., Shtivelman, V. and Gelchinsky, B., 1987, A method for detection of diffracted waves on common-offset sections. *Geophysical Prospecting*, 35, 359-374.][Khaidukov V., Landa E. and Moser T.J., 2004, Diffraction imaging by focusing-defocusing: an outlook on seismic super resolution. *Geophysics*, 69, 1478-1490.][Zhu X., and Wu R., 2008, Imaging diffraction points using the local image matrix in prestack migration, 78nd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, P. 2161–2165.][Kremlev, A.N., G. N., Erokhin, L. E. Starikov, and S.V. Rodin, 2011, Fracture and cavernous reservoirs prospecting by the CSP prestack migration method: 73th Conference & Exhibition, EAGE, Extended Abstracts, B024][Erokhin, G.N., A.N. Kremlev, L.E Starikov, V.V. Maltcev, and S.E. Zdolnik, 2012, CSP-Method Prospecting of Fracture-cavernous Reservoirs in the Bazhen Formation of the Salym Oilfield: 74th Conference & Exhibition, EAGE, Extended abstract, Y028.]. Эту задачу можно успешно решить на основе предлагаемого Imaging Conditions (3) с помощью целевой

фильтрации вектора с учетом амплитудных и фазовых особенностей распределений для точек отражения и дифракции. Рассмотрим типичный случай (рисунок 3).

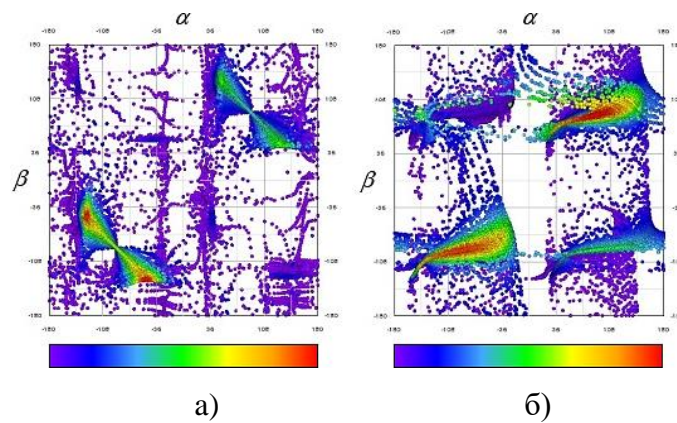


Рисунок 3 – (α, β) – распределение углов $|\vec{b}|$ в точке отражения (а) и в точке дифракции (б)

Для любой точки $(t, s) \in Q$ вычисляются углы α и β . Эти углы определяют точку в квадрате $-180^\circ \leq \alpha, \beta \leq 180^\circ$. На рисунке 3 цвет соответствует величине вектора $b(t, s)$. Назовем это представление распределением величин вектора b точке x . Видно, что распределение углов сильно зависит от того, является ли точка x точкой отражения или точкой дифракции. Это различие позволяет выбрать R_Q , что соответствует точкам отражения или дифракции. При этом фильтрация выполняется на основе распределения величин вектора b . Результаты таких фильтраций (фильтр отражения и дифракции) для модели из трех тонких слоев (рисунок 4) представлены на рисунках 5 и 6.

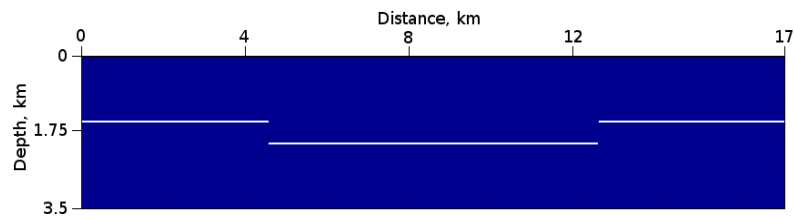


Рисунок 4 – Модель трех тонких слоев. Скорость в среде 3 km/s и в слоях 4 km/s

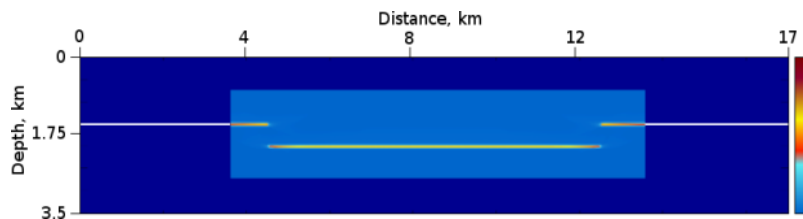


Рисунок 5 – Демонстрация результатов работы метода Depth Imaging SVSE. Фильтрация «отражений» на основе условий IVPIC вида (3б)

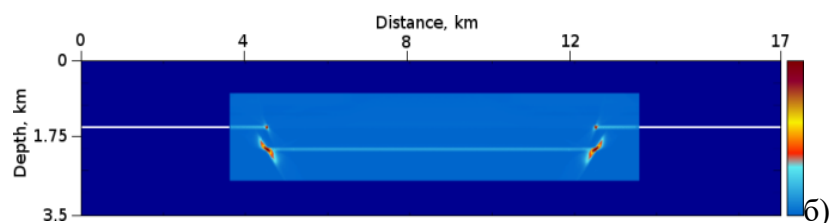


Рисунок 6 – Демонстрация результатов работы метода Diffraction Reflection Ratio SVSE. Фильтрация на основе условий IVPIC (3б)

Модель двух дифракторов в однородной среде представлена на рисунке 7. Каждый дифрактор создан скачком скорости только в одном узле. Левый дифрактор (белый цвет) с уменьшением скорости на 0.1 km/s относительно фоновой скорости 3 km/s , правый (красный) с увеличением скорости на 0.1 km/s .

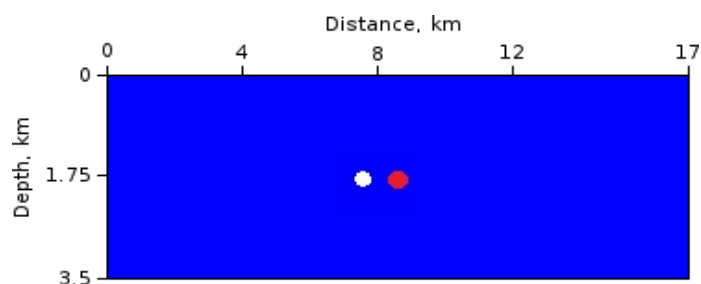


Рисунок 7 – Модель «мягких» и «жестких» дифракторов

Результат работы метода Diffraction Reflection Ratio SVSE представлен на рисунке 8. Метод работает на основе фильтрации IVPIC (3б).

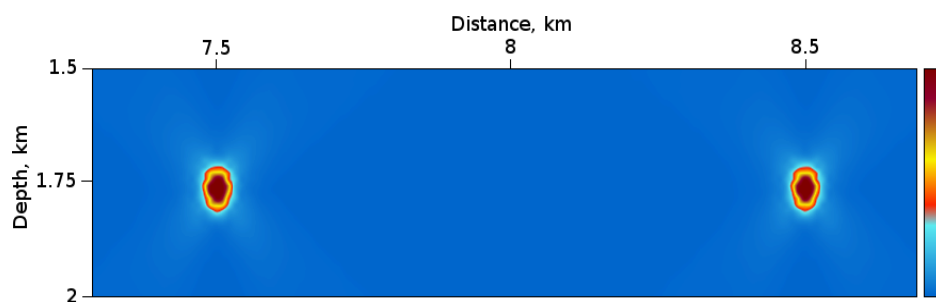


Рисунок 8 – Демонстрация результатов работы метода Diffraction Reflection Ratio SVSE. Фильтрация на основе условий IVPIC (3б)

Результат работы метода Opening Angle SVSE представлен на рисунках 9-10.

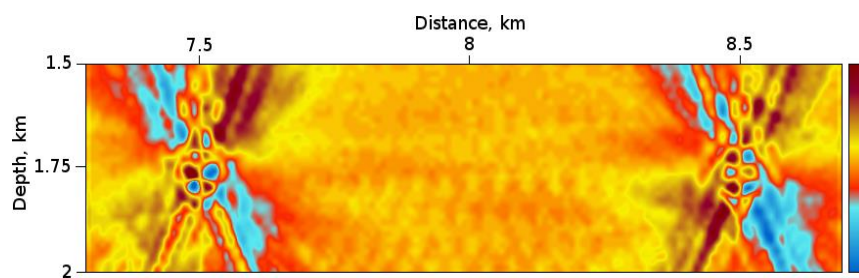


Рисунок 9 – Демонстрация результатов работы метода Opening Angle SVSE. Фильтрация на основе условий IVPIC (3e)

Метод работает на основе фазовой фильтрации по углам вида IVPIC (3e) – рисунок 9 и по дисперсии углов IVPIC (3д) – рисунок 10. В последнем случае видна высокая чувствительность фазового фильтра относительно небольших вариаций скорости. Это подтверждается высокой корреляцией между истинной скоростью и дисперсией Opening Angle.

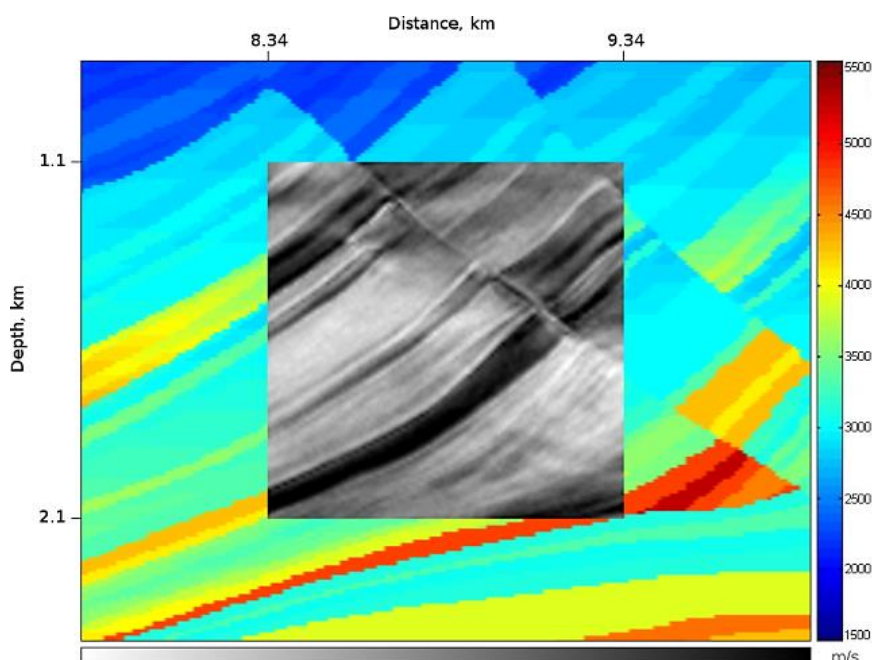


Рисунок 10 – Демонстрация результатов работы метода Opening Angle SVSE. Сравнение дисперсии открытого угла вида IVPIC (3д) (черно-белое изображение) и скорости модели Marmousi2 (цветное изображение)

2. Анализ результатов апробации разработанных методов построения сейсмических атрибутов для двумерной и трехмерной векторной сейсморазведки на реальных данных 2D/3D, сформированных на основе метода общей глубинной точки (МОГТ), с целью получения сейсмических атрибутов высокого пространственного разрешения

2.1. Пример полевых данных 2D МОГТ

На рисунке 11 представлен результат традиционной глубинной миграции Кирхгофа для одного из месторождений Западной Сибири. На рисунке 12 приведен результат метода Depth Imaging SVSE этого же участка, Сильные отражения в середине разреза соответствуют баженовской свите. Сравнение результатов этих методов показывает, что Depth Imaging SVSE не уступает, как минимум, в качестве традиционной обработке. На рис.13 представлен результат нового метода Diffraction Reflection Ratio SVSE. Показатель интенсивности от синего к красному соответствует отношению дифракционной компоненты к отраженной и является мерой трещиноватости среды. Баженовская линия соответствует зеленой линии. Наиболее сильные зоны трещиноватости расположены в верхней части фундамента (красная линия). Бурение нефтяных скважин в этих зонах (черная вертикальная линия) дало дебиты нефти почти на порядок больше, чем в баженовской свите.

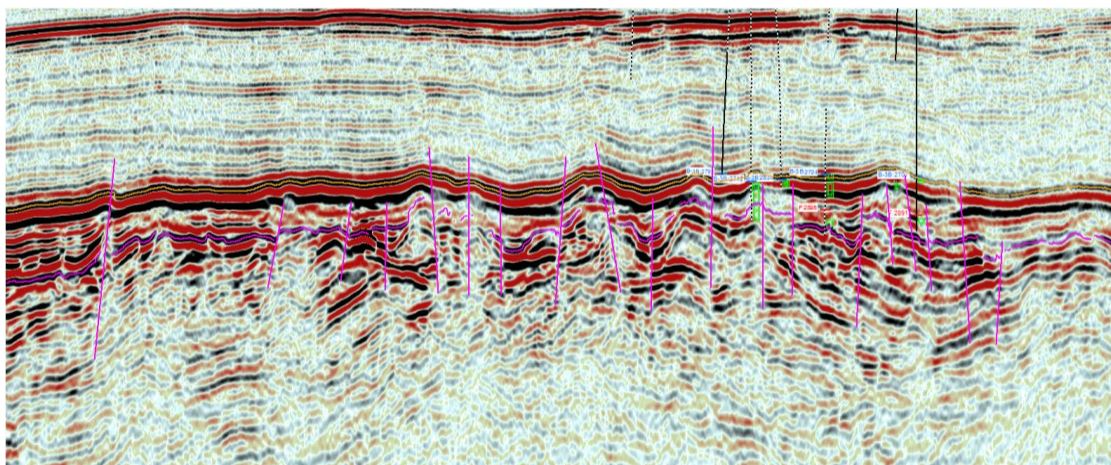


Рисунок 11 – Результат глубинной миграции Кирхгофа

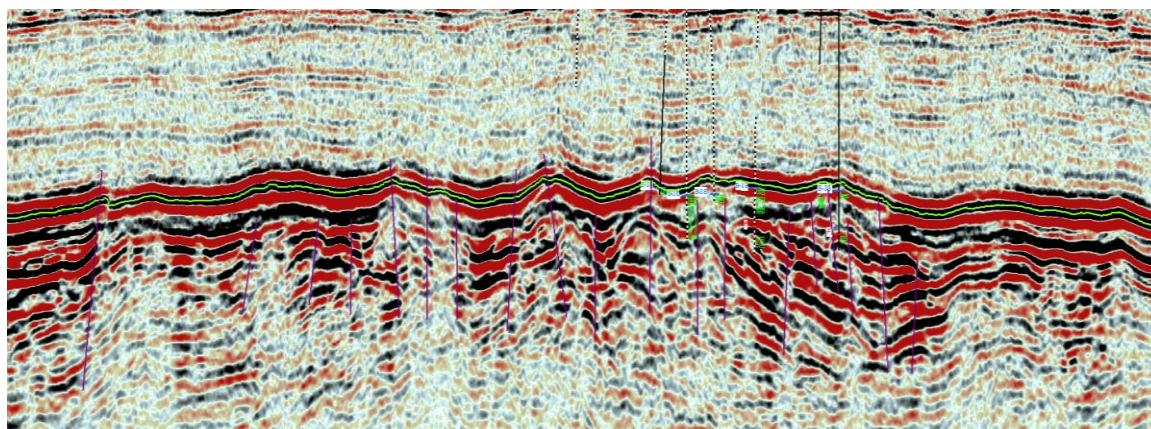


Рисунок 12 – Результат метода Depth Imaging SVSE

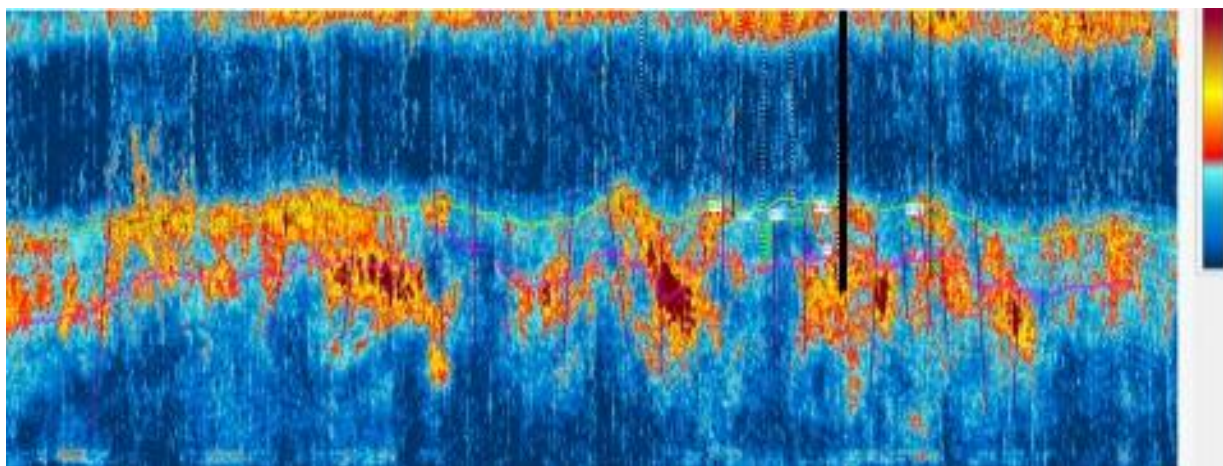


Рисунок 13 – Результат метода Diffraction Reflection Ratio SVSE

На следующем рисунке 14 представлены сравнительные результаты обработки данных сейсморазведки кровли трещинного фундамента на одном из нефтяных месторождений Восточной Сибири. Длина глубинного сечений составляет 2 км, глубина 400 метров вблизи целевого нефтяного горизонта (горизонт выделен волнистой субгоризонтальной линией). На рисунке 14а представлен результат обработки традиционным методом RTM, на рисунке 14б приведен результат обработки методом Depth Imaging SVSE и на рисунке 14в методом RTH Velocity SVSE. Сравнение результатов демонстрирует более высокое пространственное разрешение метода Depth Imaging SVSE в сравнении с обычным методом RTM. Скоростная же компонента дополняет общее представление о расположении низкоскоростных трещинных зон в кровле фундамента. Эти зоны, как и аналогичные, изображенные на рисунке 13, могут содержать значительные залежи нефти.

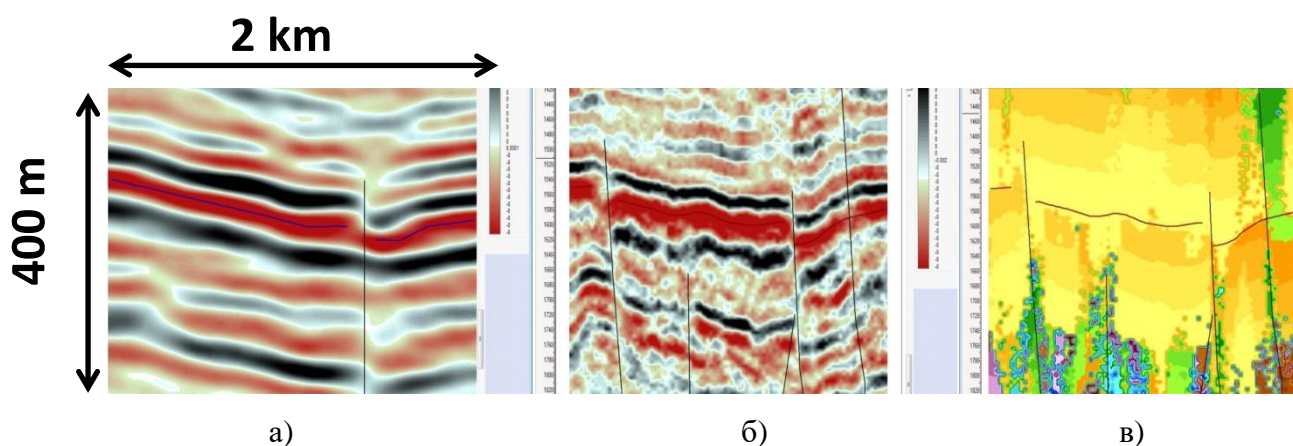


Рисунок 14 – Результат обработки традиционным методом RTM (а). результат обработки методом Depth Imaging SVSE (б). результат обработки методом RTH Velocity SVSE. Пояснения в тексте отчета

Следующий пример построения атрибутов для данных 2Д сеймики касается съемки на севере Коми. На рисунках 15–19 приведены различные сейсмические атрибуты для профиля длиной 10 км. и глубиной 2 км. Шаг между источниками здесь 25 метров, а между приёмниками 5 метров. Размер пространственной ячейки 25x5 метров. Результаты уникальны своей детальной системой регистрации, поэтому качественные сейсмические атрибуты вычисляются вплоть до размера вычислительной ячейки 10x2 метра, что недостижимо для других методов обработки данных сейсморазведки.

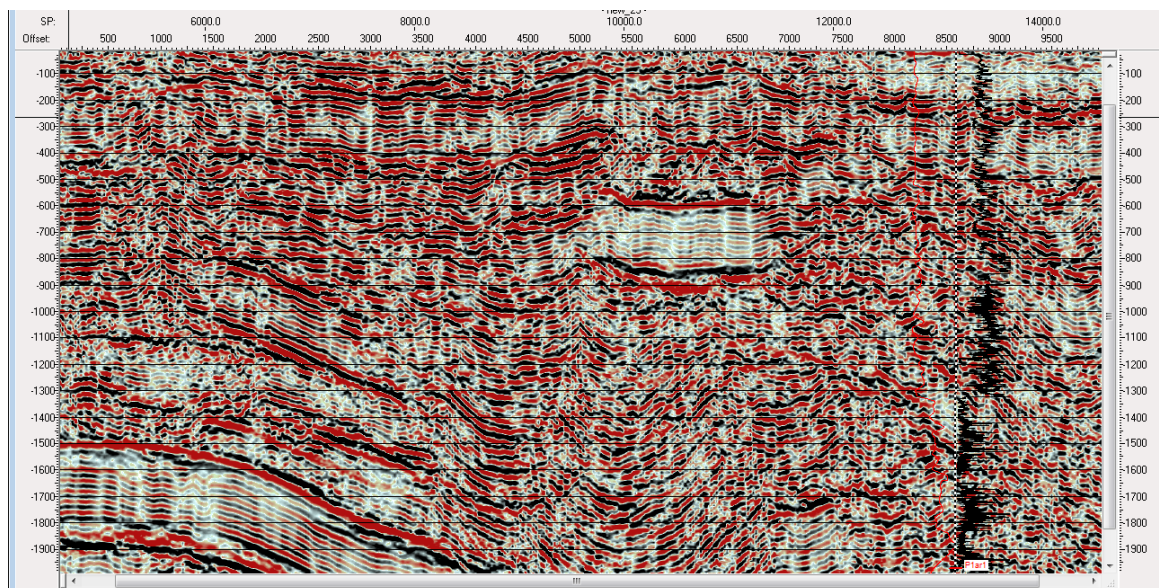


Рисунок 15 – Результат обработки методом Depth Imaging SVSE

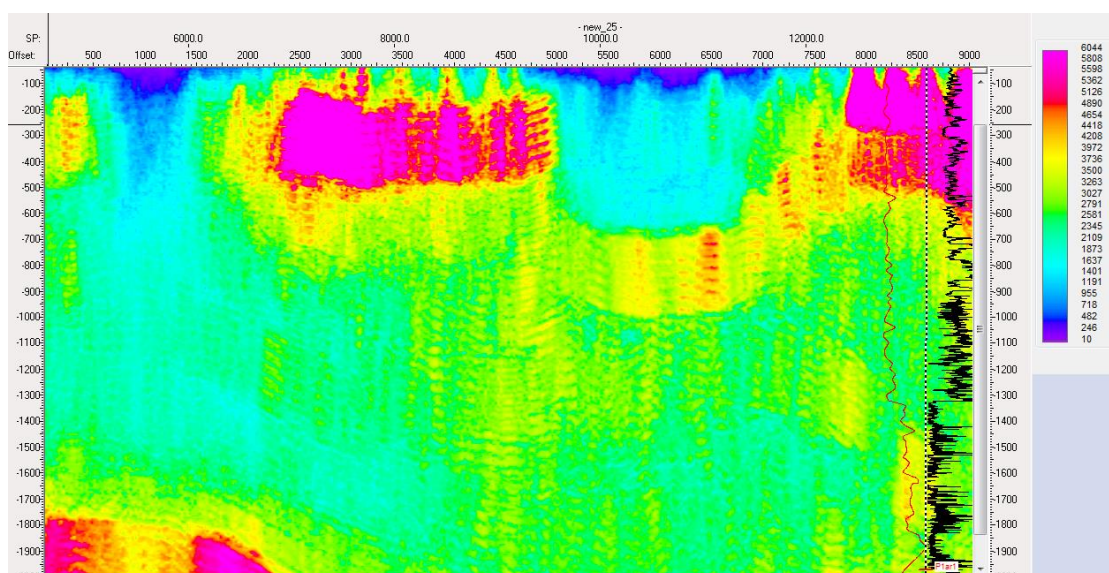


Рисунок 16 – Результат обработки методом Relative Impedance SVSE

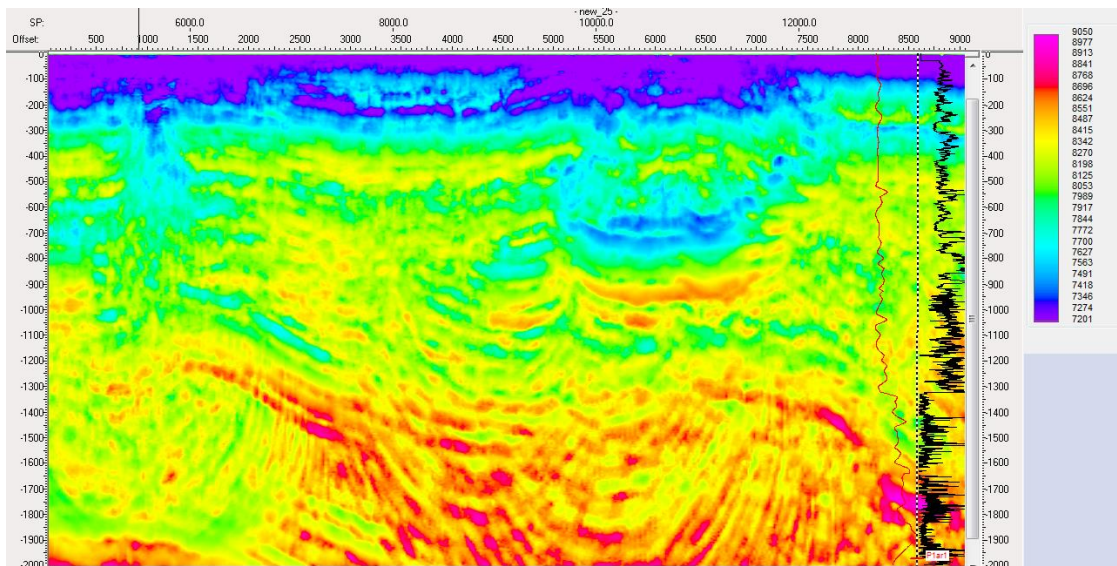


Рисунок 17 – Результат обработки методом RTH Velocity SVSE

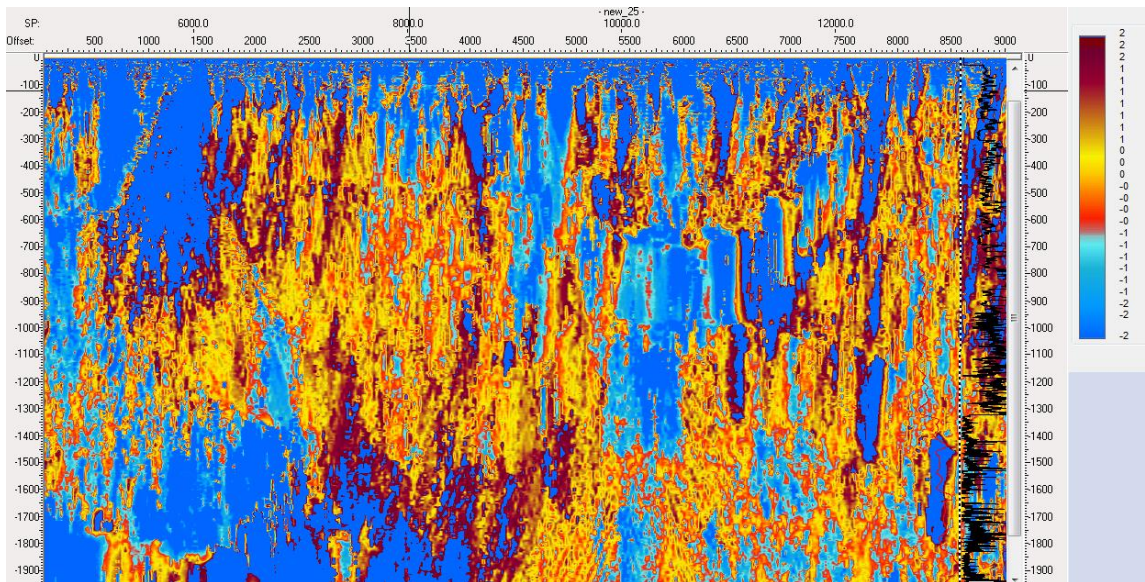


Рисунок 18 – Результат обработки методом Opening Angle SVSE

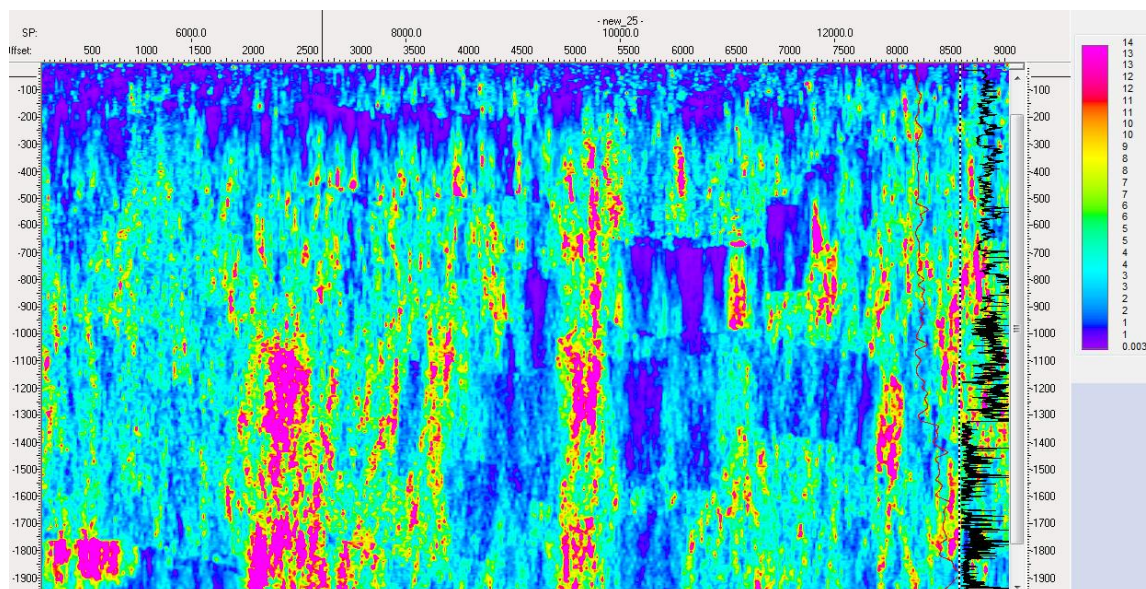


Рисунок 19 – Результат обработки методом Diffraction Reflection Ratio SVSE

2.2. Результаты обработки данных 2Д, зарегистрированных в ходе экспериментов в Башкирии

2.2.1. Данные регистрации сенсорами АО «Башнефтегеофизика»

Анализ данных и предварительная обработка

Для обработки были переданы 68 сейсмограмм ОПВ, представляющие собой коррелограммы (результат корреляции виброграмм со свипом) длительностью 2 сек. Наблюдения были произведены на 9 позициях источника, на каждой позиции источник обрабатывал по несколько раз. В каждом наблюдении отраженный сигнал принимали 37 приемников. Шаг между позициями источников 25 м, между позициями приемников 25 м. Таким образом, общая длина профиля приемников была равна 900 метрам. Схема наблюдения представлена на рисунке 20.

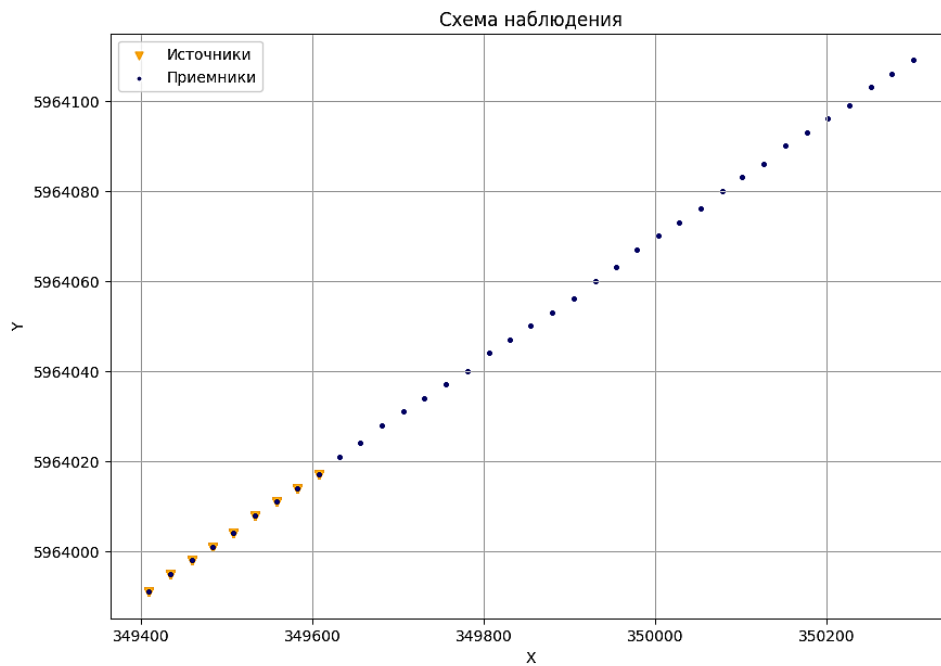
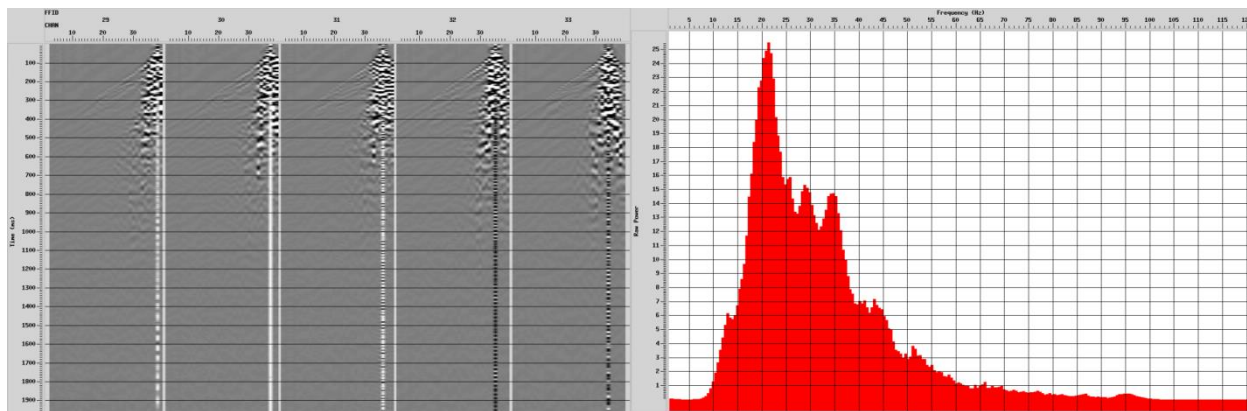


Рисунок 20 – Схема наблюдения

Коррелограммы и их спектр представлены на рисунке 21. Для корректной последующей обработки и ослабления случайных помех, накопления на одинаковых позициях источника были просуммированы (рисунок 22).



а) б)
Рисунок 21 – Коррелограммы (а) и их спектр (б)

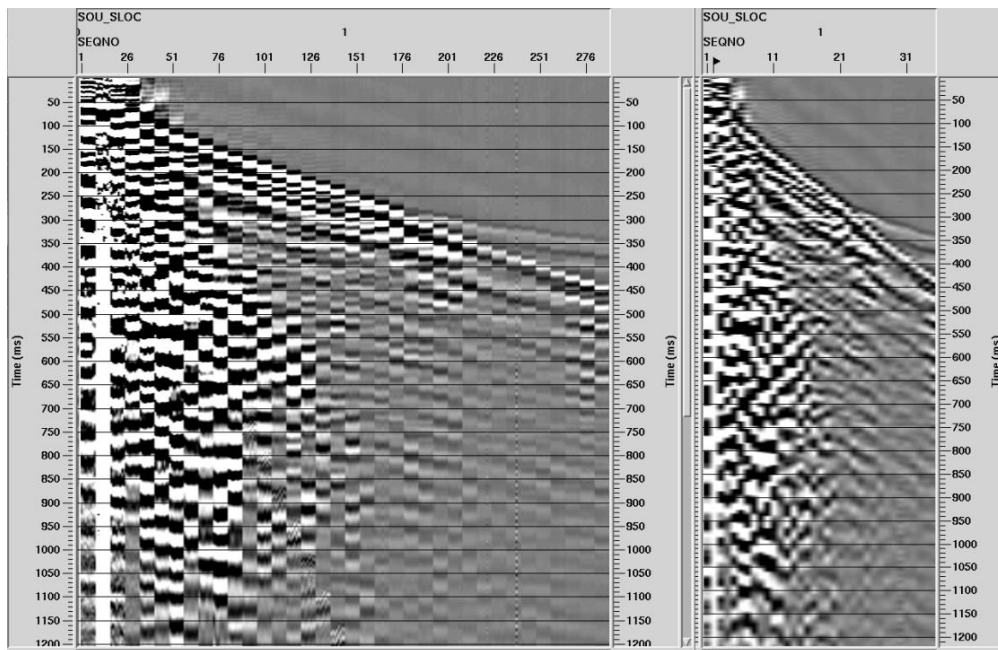


Рисунок 22 – Коррелограмма от одной позиции источника до суммирования (слева) и после суммирования (справа)

Далее была проведена экспресс-обработка по методу ОГТ с расчетом средних точек между источником и приемником, бинирования их на сетку с шагом 12.5 м (максимальная кратность 9), подавлением помех, оценкой средних скоростей и расчетом глубинной миграции. Некоторые результаты обработки приведены на рисунках 23–26.

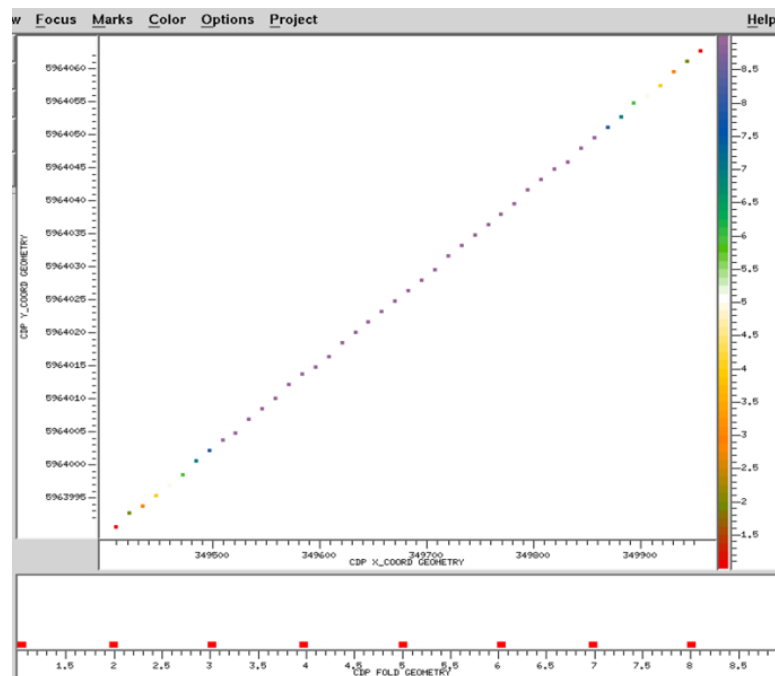
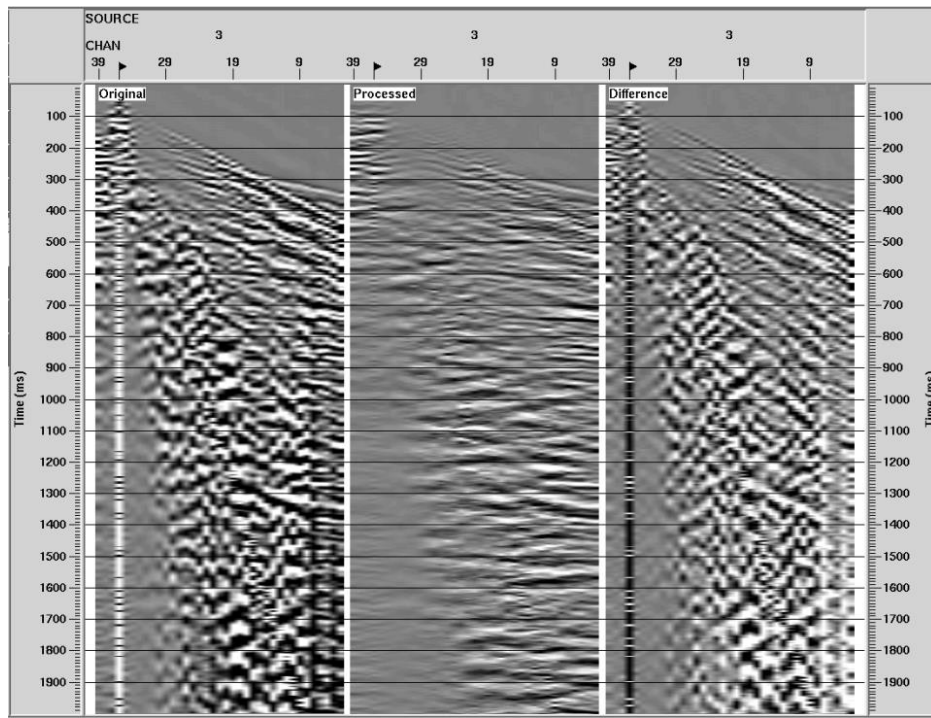


Рисунок 23 – Карта и гистограмма кратности ОГТ для сенсоров АО «Башнефтегеофизика»

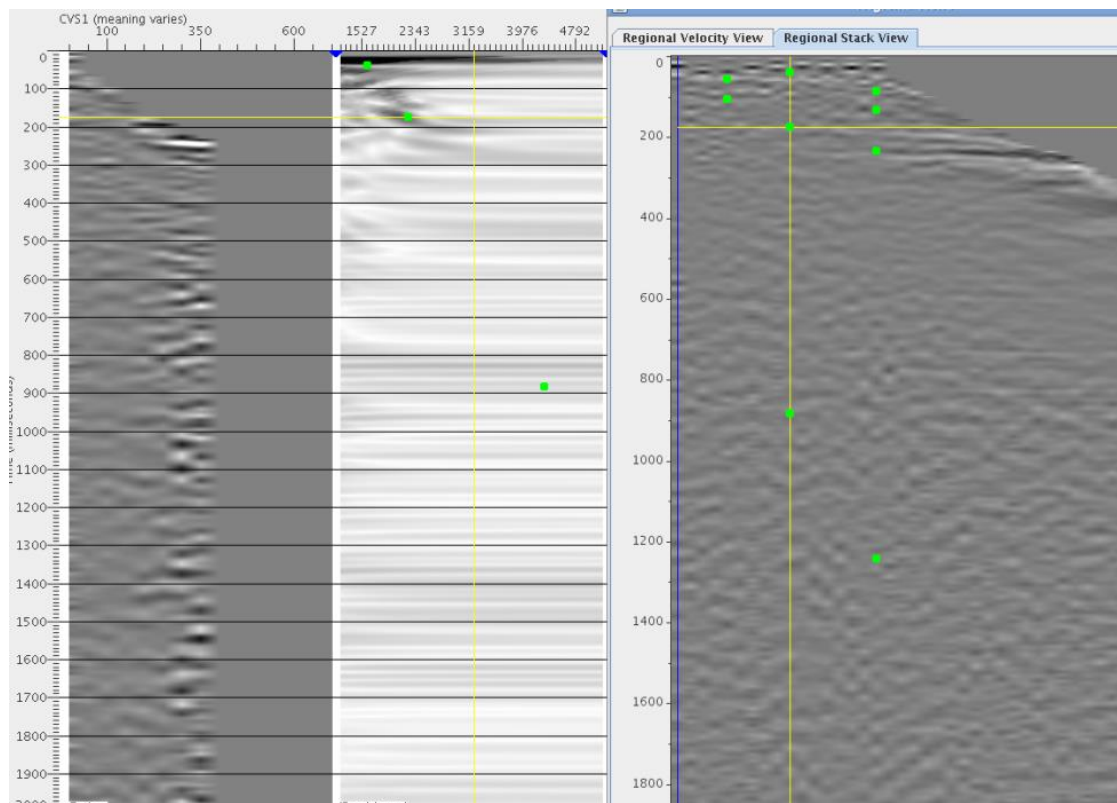


а)

б)

в)

Рисунок 24 – Иллюстрация результатов подавления помех в программном комплексе ProMax для сенсоров АО «Башнефтегеофизика». Сейсмограмма до применения подавляющих процедур (а), после применения (б) и разница (в)

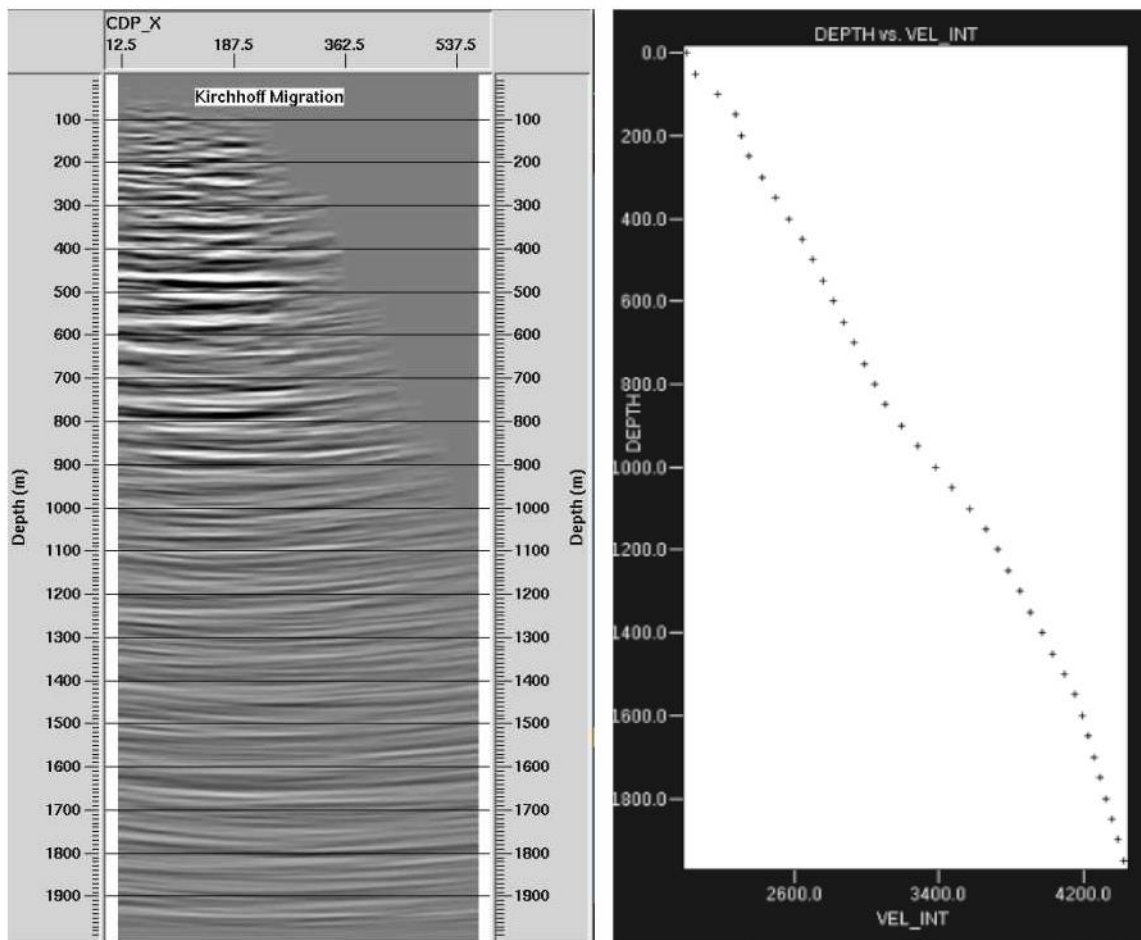


а)

б)

в)

Рисунок 25 – Анализ средних скоростей по скоростным спектрам для сенсоров АО «Башнефтегеофизика». Слева-направо: сейсмограмма ОГТ (а), вертикальный скоростной спектр (б), суммарный разрез с текущим скоростным законом (в)



а)

б)

Рисунок 26 – Глубинная миграция Кирхгофа (а) и оценочная глубинно-скоростная модель, (б) для сенсоров АО «Башнефтегеофизика»

Таким образом, конечным результатом стандартной обработки профиля данных ОГТ в пакете ProMax является глубинная миграция Кирхгофа (рисунок 26а) глубинно-скоростная модель (26б). Согласно последней скорость меняется с 2000м/с на глубине 400 метров до 4200 на глубине 2 км. Миграция визуализирует слабовыраженные отражения на глубинах 200-800 метров. Это объясняется низкой кратностью данных. Максимальная кратность -9. После очистки от помех, выравнивания амплитуд трасс и деконволюции, данные с координатами, спроецированными на линию, были переданы на расчет RTH.

Обработка данных для сенсоров АО «Башнефтегеофизика» методами Scattering Vector-based Seismic Exploration (SVSE)

Расчет методами SVSE для сенсоров АО «Башнефтегеофизика» проводился на сетке 900 метров по латерали и 3000 метров по глубине. Размер ячейки 10х5 метров. Количество отсчетов 90х600.

Первый этап заключается в построении начально-скоростной модели (рисунок 2). На первом шаге взята начальная скорость 3000 м/сек во всём разрезе (рисунок 27) и путем

итерационной корректировки методом RTH Velocity SVSE на 8 шаге получена устойчивая начально-скоростная глубинная модель, которая в дальнейшем использовалась для вычисления других сейсмических атрибутов RTH-Approach (рисунок 28).

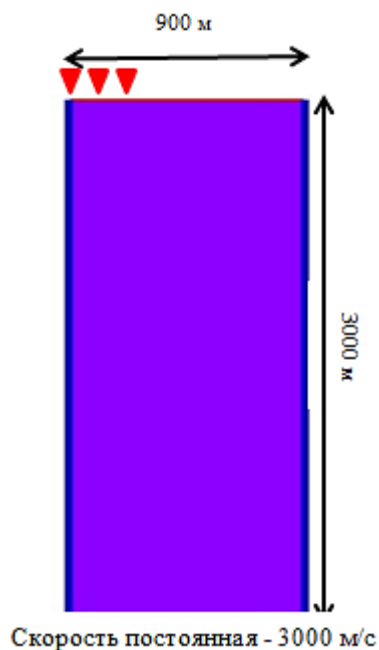


Рисунок 27 – Начально-скоростная модель.
Шаг 1

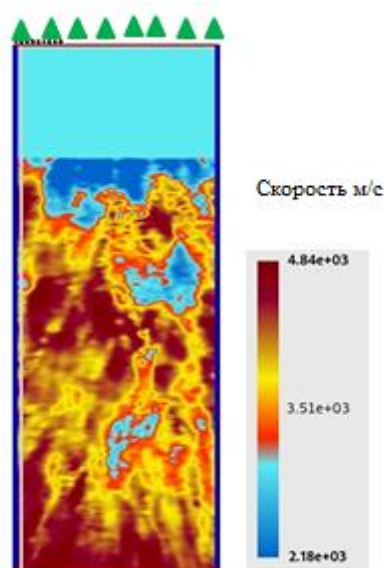


Рисунок 28 – Уточненная начально-скоростная модель. Шаг 8

В эксперименте для сенсоров АО «Башнефтегеофизика» использовалось 9 источников. Расстояние между источниками составляло 25 метров. Первый источник располагался в левой начальной точке области обработки (рисунок 27). Шаг между приемниками составлял также 25 метров (рисунок 28). Приемники АО «Башнефтегеофизика» расположены равномерно по профилю длиной 900 метров. Глубина области исследования 3000 метров. Результаты обработки данных методами SVSE для сенсоров АО «Башнефтегеофизика» представлены на рисунках 29–35.

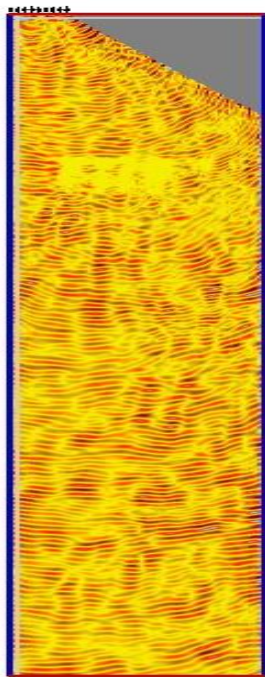


Рисунок 29 – Результат метода Depth Imaging SVSE для сенсоров АО «Башнефтегеофизика»

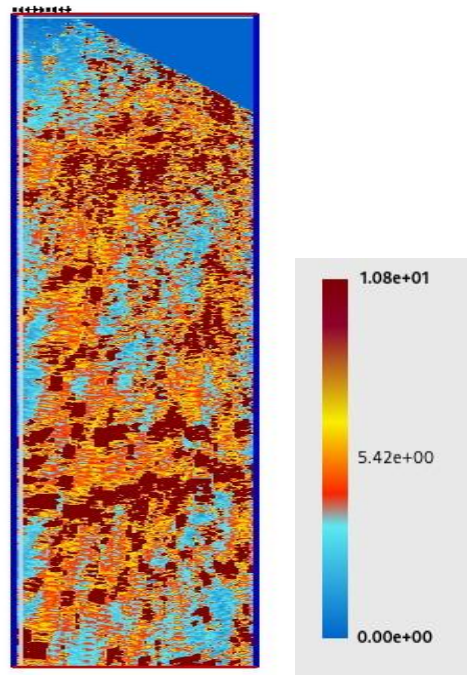


Рисунок 30 – Результат метода AVO Intercept VSE

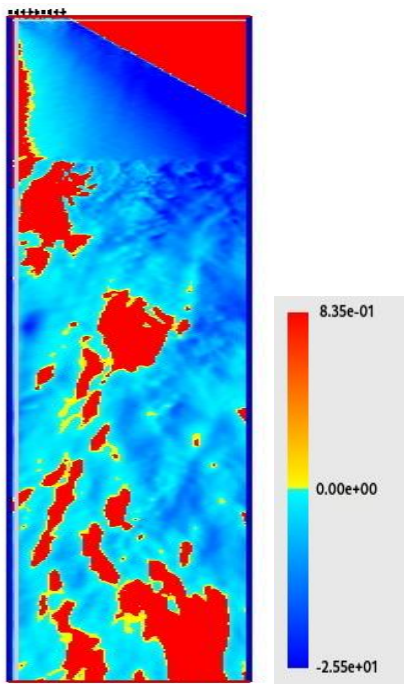


Рисунок 31 – Результат метода Opening Angle SVSE для сенсоров АО «Башнефтегеофизика»б, град.

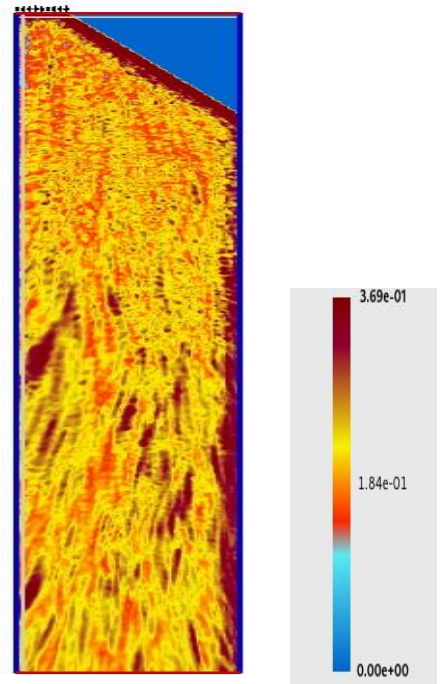


Рисунок 32 – Результат метода Semblance SVSE для сенсоров АО «Башнефтегеофизика»

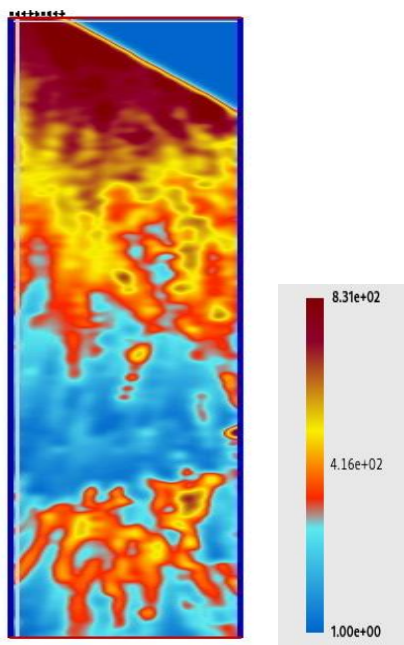


Рисунок 33 – Результат метода ATD SVSE для сенсоров АО «Башнефтегеофизика»

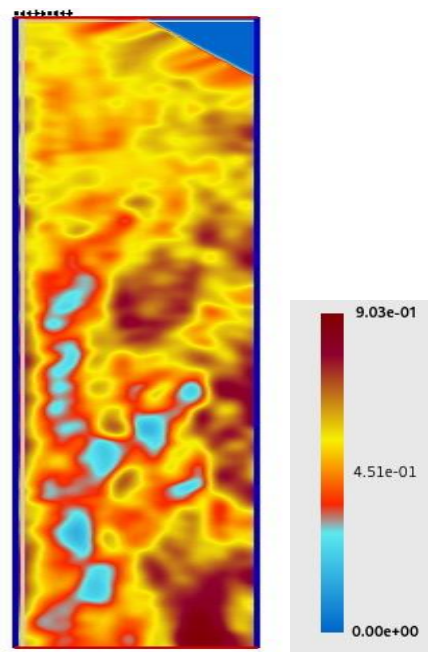


Рисунок 34 – Результат метода Diffraction Reflection Ratio SVSE для сенсоров АО «Башнефтегеофизика»

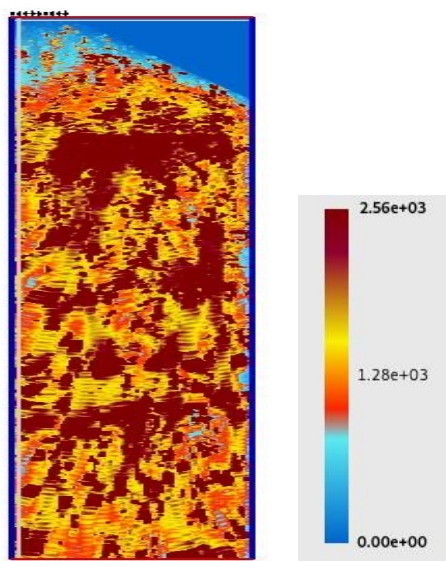


Рисунок 35 – Результат метода Relative Impedance SVSE для сенсоров АО «Башнефтегеофизика»

Очевидно, что результаты методов Scattering Vector-based Seismic Exploration (SVSE) резко отличаются от единственного результата глубинной миграции методом Кирхгофа (рисунок 26а). Аналог этого атрибута в подходе SVSE представлен на рисунке 29. Сравнение этих рисунков показывает более высокую пространственную разрешенность атрибута в подходе SVSE. А вовлечение же результатов других методов SVSE обеспечивает тотальное превосходство векторного подхода SVSE в обработке данных ОГТ перед традиционными миграциями класса RTM или Кирхгофа.

2.2.2. Данные регистрации сенсорами МФТИ ООО «Р-сенсор»

Анализ данных и предварительная обработка

Для обработки были переданы 4 виброграммы, полученные с 4 разных датчиков. На каждой виброграмме записан сигнал с разных позиций вибратора и с разных позиций датчика. Оригинальные координаты источников и приемников из переданных SEG-Y файлов, судя по всему, были записаны с ошибками, поэтому были взяты соответствующие координаты из съемки БНГФ, т.к. позиции источников и приемников были теми же самыми.

В эксперименте, также, как и в п. 2.2.1. использовалось 9 источников. Расстояние между источниками составляло также 25 метров. Первый источник располагался в левой начальной точке области обработки. Шаг между приемниками составлял также 25 метров. Длина же профиля приемников была равна 700 метрам, а не 900, как в п. 2.2.1.. Карты источников и приемников приведены на рисунке 36.

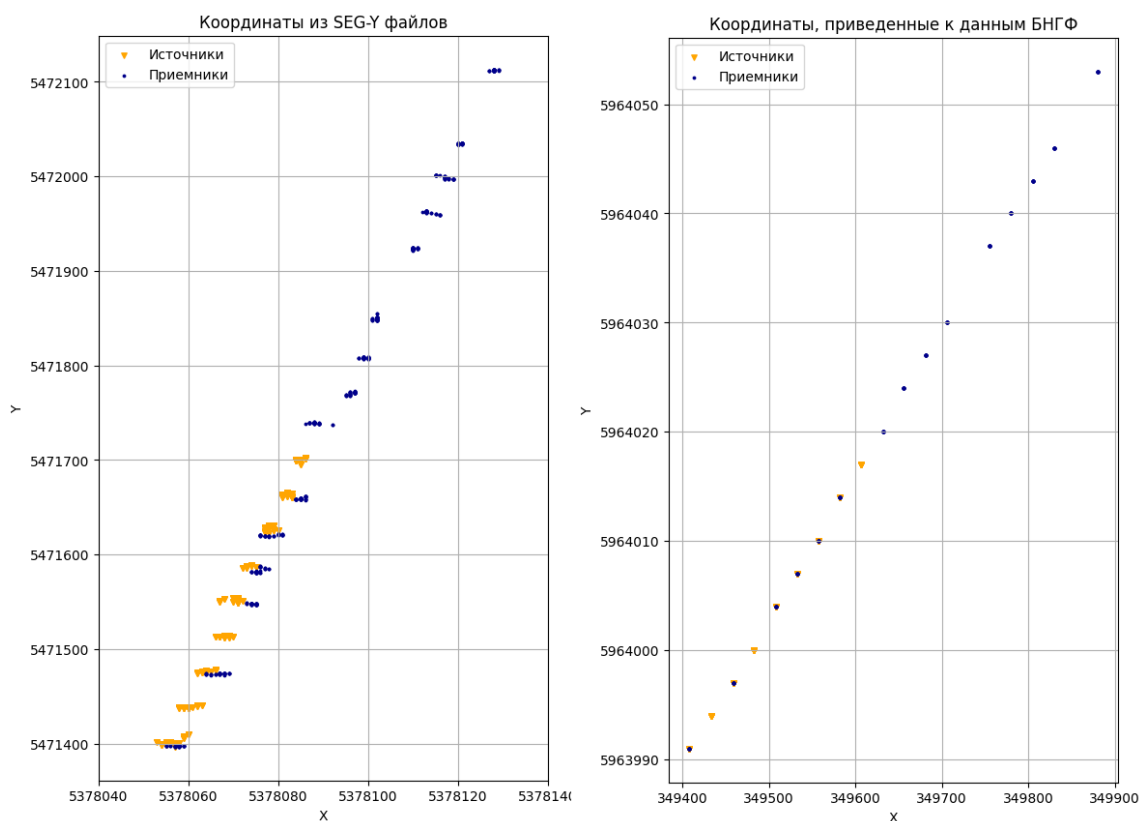
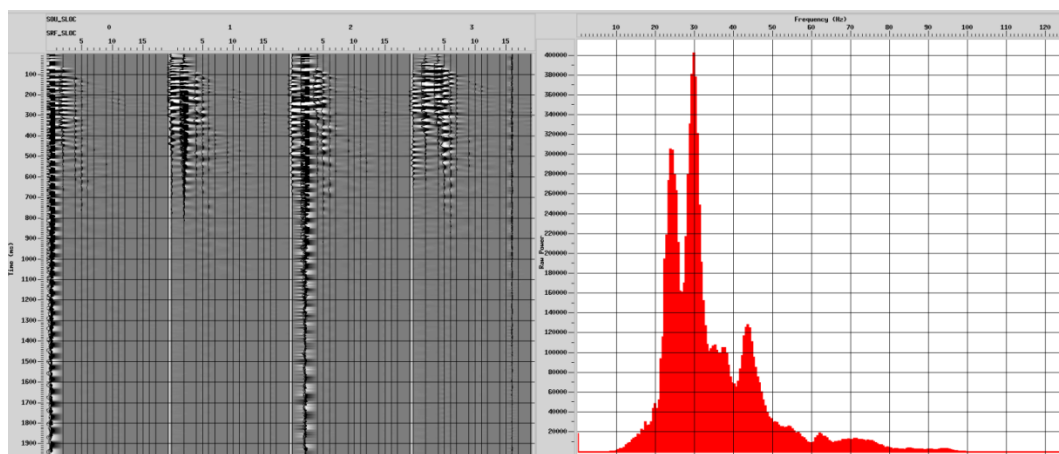


Рисунок 36 – Схема наблюдения

Слип для получения коррелограмм был взят так же из данных БНГФ (п. 2.2.1.). Коррелограммы и их спектр представлены на рисунке 37.

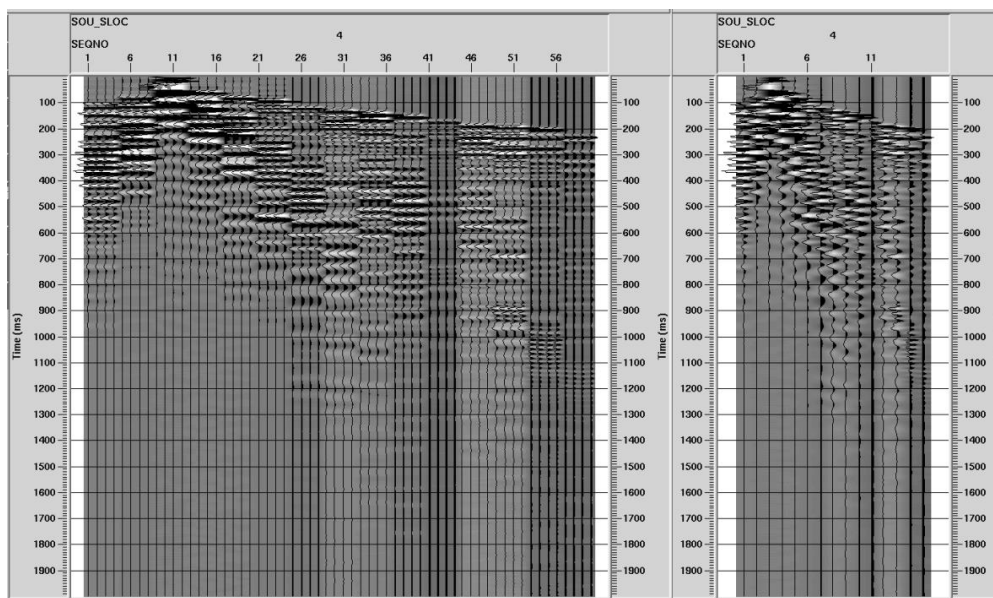


а)

б)

Рисунок 37 – Коррелограммы по данным сенсоров ООО «Р-сенсорс» (а) и их спектр (б)

Для корректной последующей обработки и ослабления случайных помех, накопления на одинаковых позициях источника были просуммированы (рисунок 38).



а

б

Рисунок 38: Коррелограмма по данным сенсоров ООО «Р-сенсорс» от одной позиции источника до суммирования (а) и после суммирования (б)

Далее была проведена экспресс-обработка по методу ОГТ с расчетом средних точек между источником и приемником, бинирования их на сетку с шагом 12.5 м (максимальная кратность 8, преобладающая 7), подавлением помех и деконволюцией, и расчетом глубинной миграции. Отметим, что для данных АО «Башнефтегеофизика» (п. 2.2.1) максимальная кратность равняется 9. Величина кратности съемки и разброс удалений не позволяют для данных сенсоров ООО «Р-сенсорс» сделать сколь либо корректный анализ

скоростей, поэтому скорость была взята из обработки данных БНГФ (п. 2.2.1). Некоторые результаты обработки приведены на рисунках ниже (рисунки 39-41).

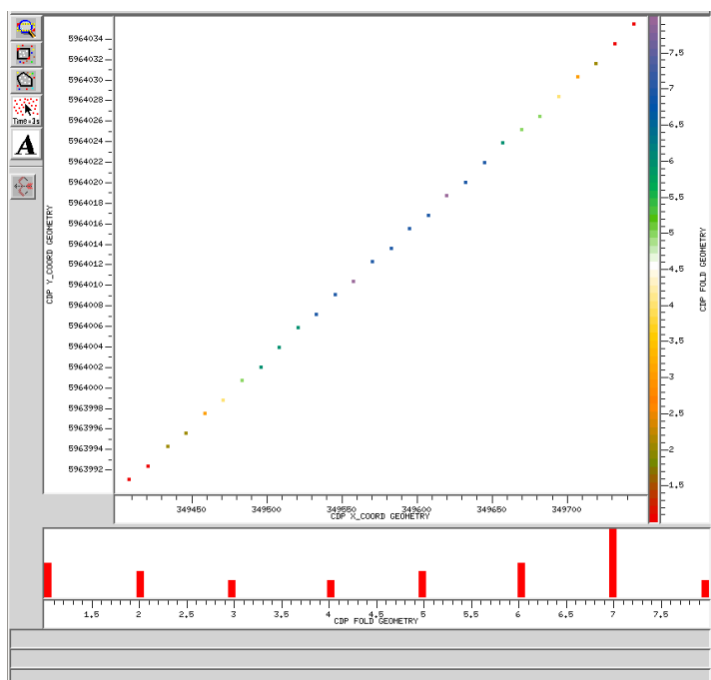
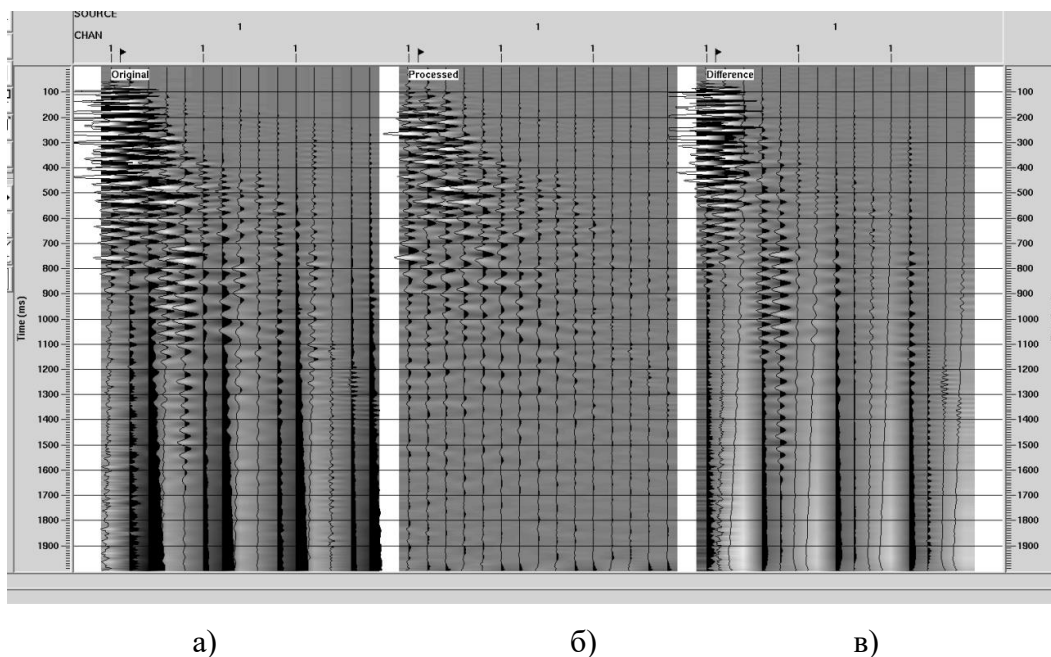


Рисунок 39 – Карта и гистограмма кратности ОГТ для сенсоров ООО «Р-сенсорс»



а)

б)

в)

Рисунок 40 – Иллюстрация результатов подавления помех в программном комплексе ProMax для сенсоров ООО «Р-сенсорс». Сейсмограмма до применения подавляющих процедур (а), после применения (б) и разница (в)

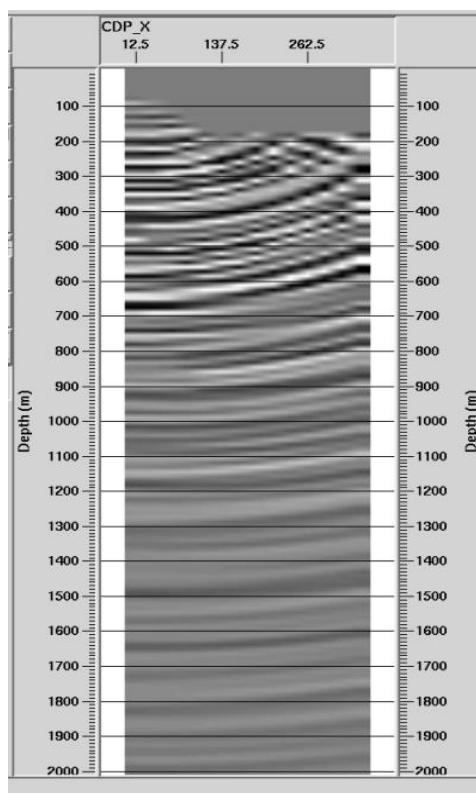


Рисунок 41 – Глубинная миграция Кирхгофа выполненная в программном комплексе ProMax для сенсоров ООО «Р-сенсорс»

Сравнение традиционных миграций Кирхгофа выполненных в программном комплексе ProMax для сенсоров АО «Башнефтегеофизика» (рисунок 26а) для сенсоров ООО «Р-сенсорс» (рисунок 41) показывает более высокое пространственное разрешение миграции для сенсоров АО «Башнефтегеофизика». Это объясняется более широким спектром сигнала на сенсорах АО «Башнефтегеофизика» (рисунок 21б), чем на сенсорах ООО «Р-сенсорс» (рисунок 37б). Технические параметры сенсоров ООО «Р-сенсорс» изначально, имеют гораздо большую полосу регистрации, чем на рис. 37б. Наблюдаемое в данном конкретном эксперименте ухудшение чувствительности сенсоров ООО «Р-сенсорс», по-видимому, связано с плохим контактом с землей при установке датчиков.

После очистки от помех, выравнивания амплитуд трасс и деконволюции, данные с координатами, спроецированными на линию, были переданы на расчет RTH.

Обработка данных для сенсоров ООО «Р-сенсорс» методами Scattering Vector-based Seismic Exploration (SVSE)

Также, как и для данных сенсоров АО «Башнефтегеофизика» расчет методами Scattering Vector-based Seismic Exploration (SVSE) проводился на сетке 900 метров по латерали и 3000 метров по глубине. Размер ячейки 10x5 метров. Количество отсчетов 90x600.

Расчет методами SVSE для сенсоров ООО «Р-сенсорс» проводился на сетке 900 метров по латерали и 3000 метров по глубине. Размер ячейки 10x5 метров. Количество отсчетов 90x600.

Первый этап заключается в построении начально-скоростной модели (рисунок 2). На первом шаге взята начальная скорость 3000 м/сек во всем разрезе (рисунок 42) и путем итерационной корректировки методом RTH Velocity SVSE на 8 шаге получена устойчивая начально-скоростная глубинная модель, которая в дальнейшем использовалась для вычисления других сейсмических атрибутов RTH-Approach (рисунок 43).

В эксперименте для сенсоров ООО «Р-сенсорс» использовалось 9 источников. Расстояние между источниками составляло 25 метров. Первый источник располагался в левой начальной точке области обработки (рисунок 42). Шаг между приемниками составлял также 25 метров (рисунок 43).

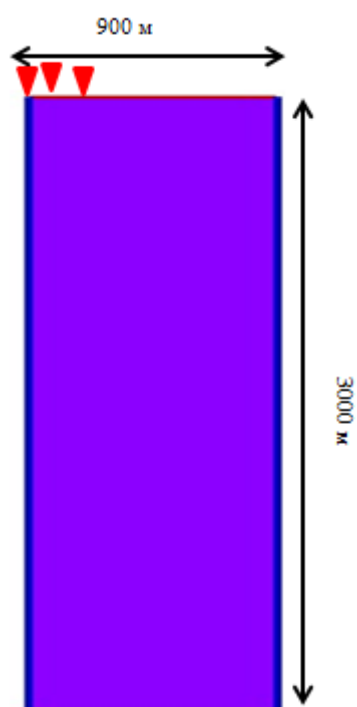


Рисунок 42 – Начально-скоростная модель. Шаг 1. Скорость постоянная – 3000 м/с

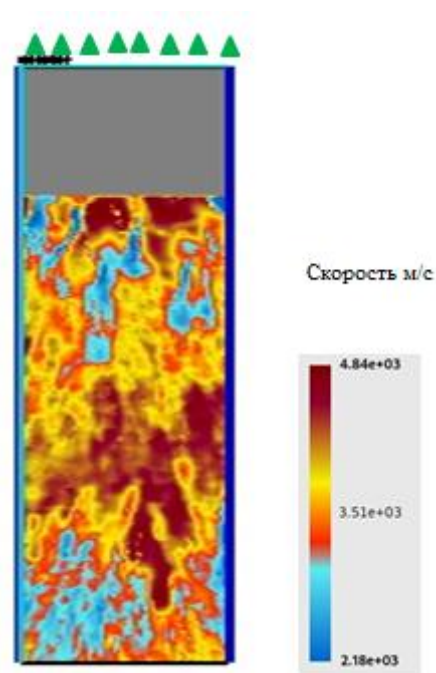


Рисунок 43 – Уточненная начально-скоростная модель. Шаг 8

Приемники ООО «Р-сенсорс» расположены равномерно по профилю длиной 700 метров. Глубина области исследования 3000 метров. Результаты обработки данных методами SVSE для сенсоров ООО «Р-сенсорс» представлены на рисунках 44–50.

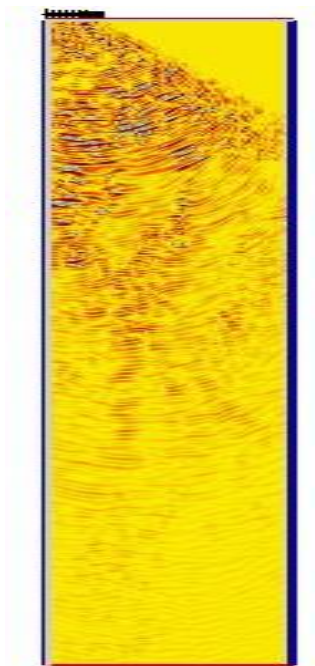


Рисунок 44 – Результат метода Depth Imaging SVSE для сенсоров ООО «Р-сенсорс»

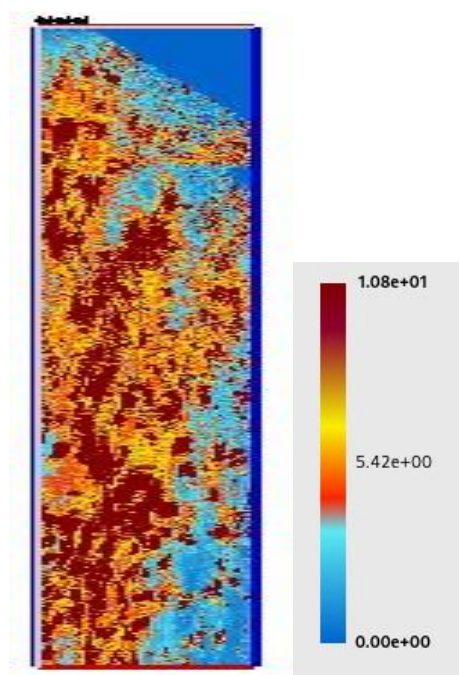


Рисунок 45 – Результат метода AVO Intercept SVSE для сенсоров ООО «Р-сенсорс»

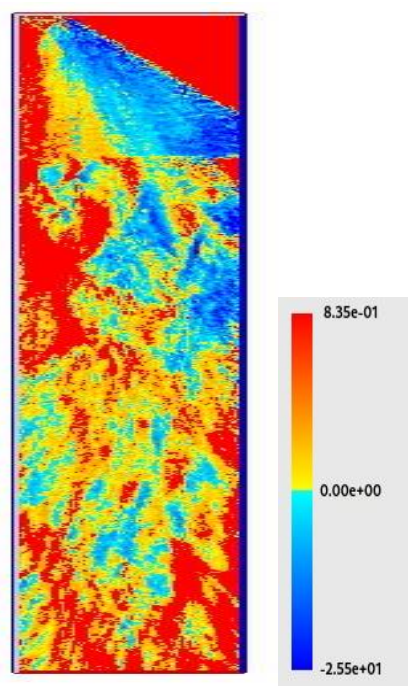


Рисунок 46 – Результат метода Opening Angle SVSE для сенсоров ООО «Р-сенсорс», град.

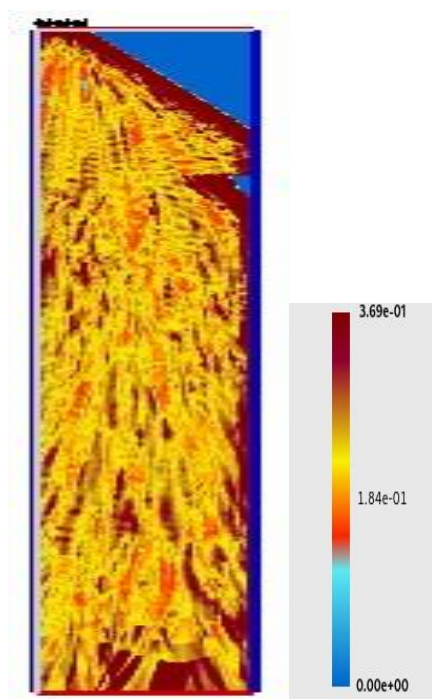


Рисунок 47 – Результат метода Semblance SVSE для сенсоров ООО «Р-сенсорс»

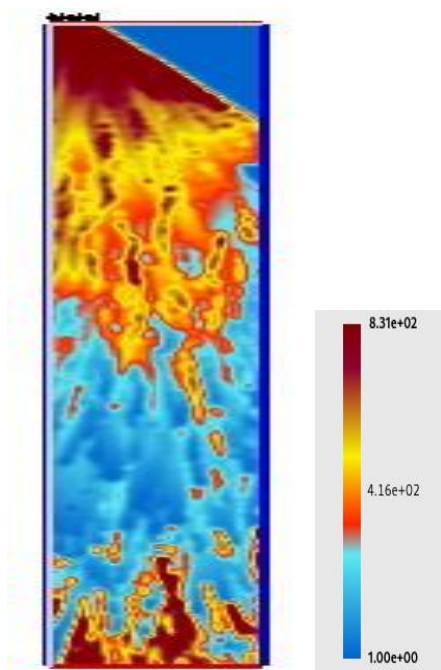


Рисунок 48 – Результат метода ATD SVSE для сенсоров ООО «Р-сенсорс»

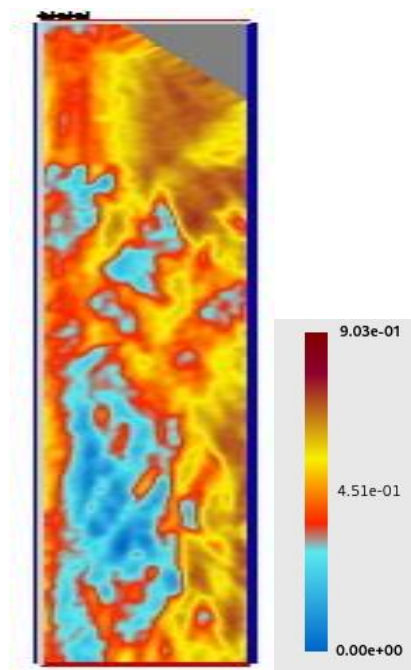


Рисунок 49 – Результат метода Diffraction Reflection Ratio SVSE для сенсоров ООО «Р-сенсорс»

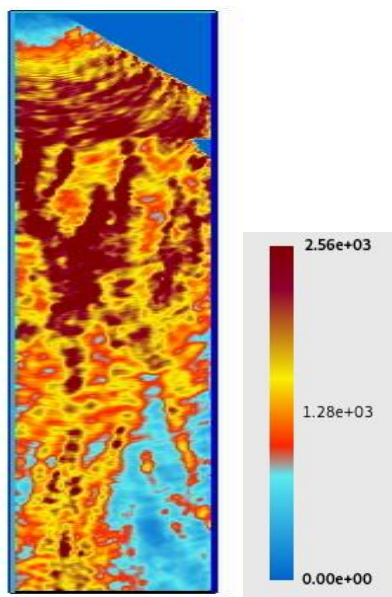


Рисунок 50 – Результат метода Relative Impedance SVSE для сенсоров ООО «Р-сенсорс»

Сравнение результатов Depth Imaging SVSE для сенсоров ООО «Р-сенсорс» (рисунок 44) с аналогичным для сенсоров АО «Башнефтегеофизика» (рисунок 29) говорит, как и для других методов SVSE, в пользу сенсоров на съемке АО «Башнефтегеофизика».

Как было отмечено выше, сравнивая результаты глубинных миграций Кирхгофа для сенсоров ООО «Р-сенсорс» и АО «Башнефтегеофизика», это объясняется более широким

спектром сигнала на сенсорах АО «Башнефтегеофизика» (рисунок 21б), чем на сенсорах ООО «Р-сенсорс» (рисунок 37б). Наблюдаемое в данном конкретном эксперименте ухудшение чувствительности сенсоров ООО «Р-сенсорс», по-видимому, связано с плохим контактом с землей при установке датчиков.

Таким образом, продолжая сравнение классического подхода RTM и подхода RTH (таблица 1) на конкретных результатах обработки сейсмической информации стандартным методом Кирхгофа пакета ProMax и методами Scattering Vector-based Seismic Exploration общего подхода RTH, даже для случая очень низкой кратности данных, можно утверждать, что методы Scattering Vector-based Seismic Exploration существенно превосходят по качеству и разнообразию атрибутов традиционную глубинную миграцию. Новые методы SVSE позволяют оценивать сейсмические атрибуты при средней кратности равной 9, что существенно ниже средних значений кратности, допустимых для промышленной обработки данных ОГТ традиционными пакетами класса ProMax.

Наряду с миграционными глубинными разрезами RTH RTM (Reverse Time Migration) (рис. 29/44) достаточно детально, с точностью до размера пикселя 10x5 метров, новые методы SVSE вычисляются такие сейсмические атрибуты как:

- глубинно-скоростная модель среды Velocity (рисунки 28/43);
- AVO Intercept (рисунки 30/45);
- Opening Angle (рисунки 31/46);
- Semblance (рисунки 32/47);
- ATD (Arrival Time Discrepancy) (рисунки 33/48);
- Diffraction Reflection Ratio (рисунки 34/49) – дифракционная компонента, связанная с несинхронным рассеянием;
- Relative Impedance (рисунки 35/50) – компонента, связанная с синхронным рассеянием.

Наличие этих и других сейсмических атрибутов в подходе RTH позволяет существенно упростить процедуру геологической интерпретации сейсмических данных и дать высокоточный геологический и петрофизический прогноз используя данные скважин и методы искусственного интеллекта [Bugaev A.S., Erokhin G.N., Ryabykh S.A., Smirnov A.S. Prediction Of Fluid–Brine Event Zones By Artificial Intelligence Methods Based On New Generation Rth Seismic Attributes And Drilling Data At The Kovykta Gas Condensate Field, Doklady Earth Sciences. GEOPHYSICS, November 2023. Volume 514, pages 105-113 https://doi.org/10.1007/978-981-19-7685-8_22].

2.3. Пример полевых данных 3D МОГТ, обработанных методами Scattering Vector-Based Seismic Exploration

Представленная в п.1 настоящего отчета методика построения группы методов обработки данных сейсморазведки SVSE применима как для линейных систем наблюдения (2D), так и для площадных систем наблюдения (3D). Отличие состоит в больших объемах вычислений и в больших возможностях интерпретации результатов расчетов. Последнее выражается в возможности построения значений атрибутов вдоль некоторых, как правило, целевых горизонтов.

На рисунке 51 приведена временная миграция Кирхгофа.

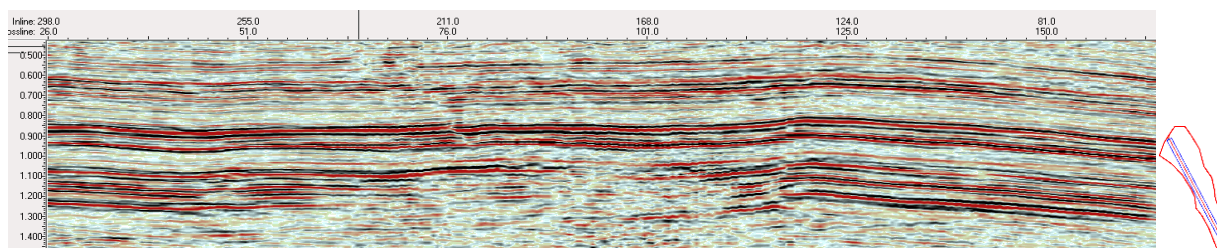


Рисунок 51 – Временная миграция Кирхгофа. Результат обработки в стандартном комплексе ProMax

На рисунках 52-50 представлены результаты обработки данных 3Д сейсмики пятью методами группы SVSE:

- Depth Imaging Scattering Vector-based Seismic Exploration (рисунок 52)
- Relative Impedance Scattering Vector-based Seismic Exploration (рисунок 53)
- RTH Velocity Scattering Vector-based Seismic Exploration (рисунок 54)
- Opening Angle Scattering Vector-based Seismic Exploration (рисунок 55)
- Diffraction Reflection Ratio Scattering Vector-based Seismic Exploration (рисунок 56)

Размер пространственной ячейки здесь всюду 55x11 футов. Размер участка 38200x20900 футов. Толщина слоя 3600 футов.

Представлены результаты обработки одного из немногих в мире «открытых» для тестирования месторождений - Teapot Dome, Wyoming, USA [S. J. Friedmann, V. Stamp Teapot Dome: Site Characterization of a CO₂-Enhanced Oil Recovery Site in Eastern Wyoming. Environmental Geoscience, December 16, 2005, Lawrence Livermore National Laboratory][Cooper, S.P., Hart, B., Goodwin, L.B., Lorenz, J.C., and Milliken, M., 2003, Outcrop and Seismic Analysis of Natural Fractures, Faults and Structure at Teapot Dome, Wyoming, Wyoming Geological Association September 2003 Field Guidebook, 12]. Уникальность этого месторождения состоит в наличие огромного количества открытых данных по сейсмике, гравимике, данным скважин и пр. В примерах тестирования методами SVSE представлены 5 атрибутов со сверхвысоким, недостижимым ранее для этого месторождения, пространственным разрешением по глубине – 11 футов (3.3 метра).

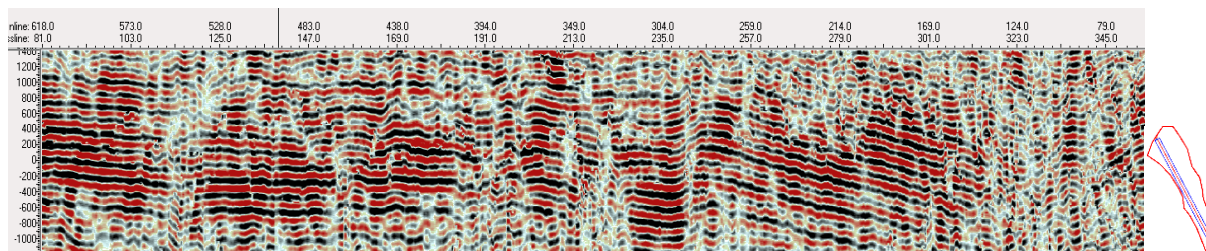


Рисунок 52 – Результат обработки данных Teapot Dome методом Depth Imaging Scattering Vector-based Seismic Exploration. Размер вокселя 55x55x11 ft. Вертикальное сечение глубиной 2400 футов

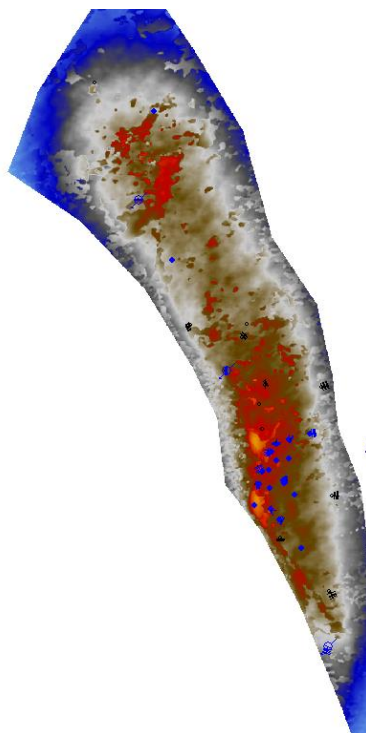


Рисунок 53 – Результат обработки данных Teapot Dome методом Relative Impedance Scattering Vector-based Seismic Exploration. Размер вокселя 55x55x11 ft.. Сечение по целевому продуктивному горизонту «В» толщиной 100 футов. Песчаник. Синие точки – скважины

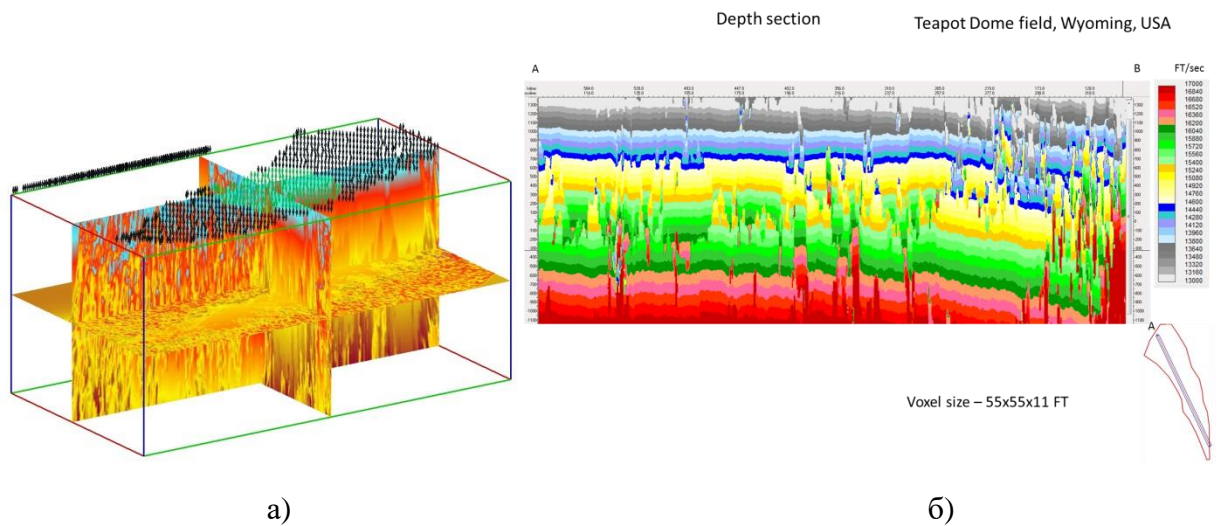


Рисунок 54 – Результат обработки данных Teapot Dome методом RTH Velocity Scattering Vector-based Seismic Exploration. Размер вокселя 55x55x11 ft. 3D куб (а) и вертикальное сечение глубиной 2400 футов (б)

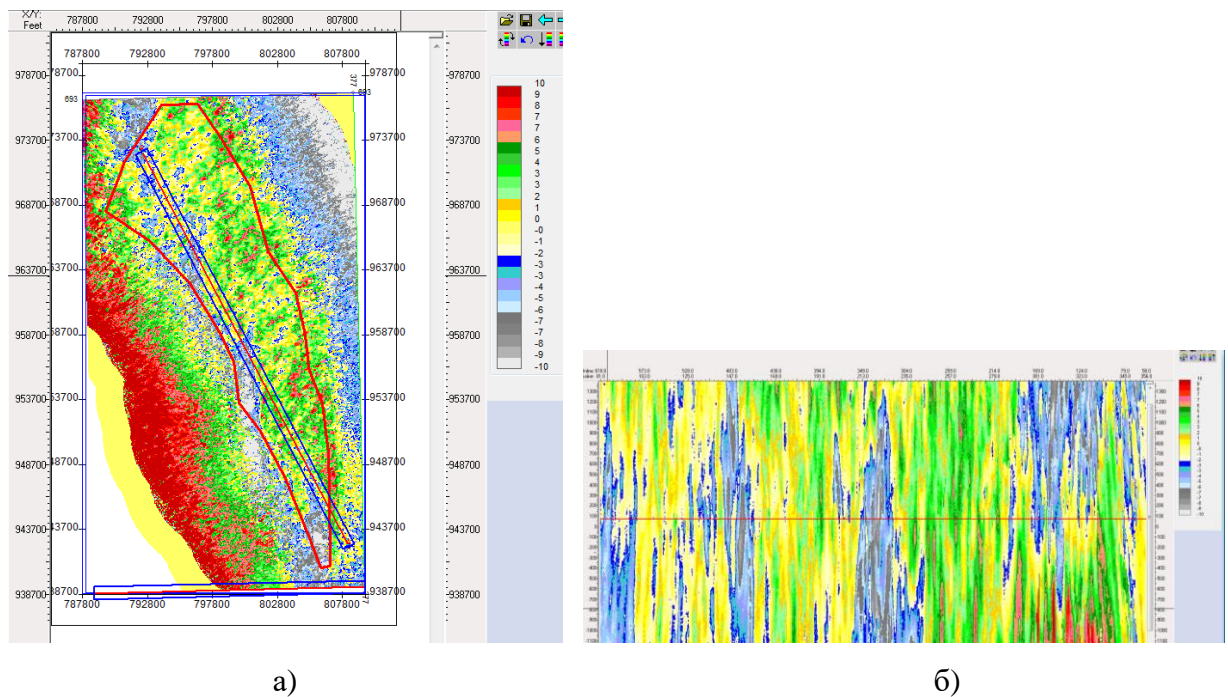


Рисунок 55 – Результат обработки данных Teapot Dome методом Opening Angle Scattering Vector-based Seismic Exploration. Размер вокселя 55x55x11 ft. Сечение по целевому продуктивному горизонту «В» толщиной 100 футов (а) и вертикальное сечение глубиной 2400 футов (б)

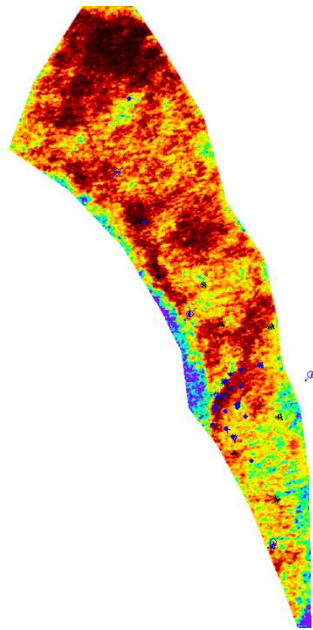


Рисунок 56 – Результат обработки данных Teapot Dome методом Diffraction Reflection Ratio Scattering Vector-based Seismic Exploration. Размер вокселя 55x55x11 ft. Сечение по целевому продуктивному горизонту «В» толщиной 100 футов

В результате проведенных исследований разработаны 5 новых методов построения сейсмических атрибутов для двумерной и трехмерной векторной сейсморазведки с использованием разработанных подходов миграции в обратном времени и угловой декомпозиции волн. Принципиальное отличие разработанных методов векторной миграции от существующих методов глубинной миграции представлено в таблице 1 настоящего отчета. Наиболее существенные преимущества методов векторной декомпозиции (миграции) заключаются в том, что:

- В отличие от обычных методов, где результатом миграционной обработки сейсмических данных является только один атрибут – глубинная миграция, в методах на основе векторной декомпозиции, представленных в отчете, вычисляется линейка (100 и более) сейсмических атрибутов, один из которых идентичен традиционной глубинной миграции;
- Пространственное разрешение всех новых атрибутов существенно выше, чем у обычной глубинной миграции (вплоть до 2 метров);
- Модель сейсмического рассеяния среды, лежащая в основе новых методов, может зависеть от частоты или локального времени, что существенно расширяет возможности исследования геологической среды сейсмическими методами. В обычных методах миграции Кирхгофа такая зависимость невозможна;

– Первым этапом в методах векторной декомпозиции всегда проводится высоко детальная скоростная томография, что отсутствует во всех методах глубинной миграции;

– В новых методах векторной декомпозиции не требуется обычного трудоемкого вычисления статических временных поправок: корректировка за верхнюю часть разреза (ВЧР) в новых методах проводится автоматически;

– Высокоэффективные вычислительные алгоритмы разработанных методов векторной декомпозиции на базе графических ускорителей (GPU) позволяют на порядок сократить время традиционной обработки сейсмических данных, без потери качества.

В отчете представлена апробация разработанных 5 методов векторной сейсморазведки на реальных сейсмических данных 2D/3D, сформированных на основе метода общей глубинной точки (МОГТ), с целью получения сейсмических атрибутов высокого пространственного разрешения.

Представлены сравнительные результаты сейсмической обработки стандартными методами в ПО ProMax, а также предложенными 5-ю методами двух наборов 2D данных малой кратности, зарегистрированных на полигоне АО «Башнефтегеофизики»: с использованием комплектов стандартного сейсмического оборудования АО «Башнефтегеофизика» и с использованием 4-х регистраторов ООО «Р-сенсорс». Проведен сравнительный анализ результатов обработки и предложен план дальнейшего совершенствования технологии установки сейсмических сенсоров с помощью БВС.

Показано преимущество результатов глубинной миграции Depth Imaging Scattering Vector-based Seismic Exploration перед традиционной миграцией Кирхгофа в плане информативности и разрешенности (сравнение на рисунках 11-12; рисунках 14а-14б; рисунках 26а-29; рисунках 41-44; рисунках 51-52).

Приведены примеры применения разработанных 5 методов в варианте 3D к сейсмическим данным месторождения Teapot Dome, США, которые имеют статус свободного распространения. Показана уникальная пространственная разрешенность и информативность новых методов в сравнении с результатами метода Кирхгофа.

Выполненные численные эксперименты позволили построить карты сейсмических атрибутов для 2D и 3D реальных сейсмических данных для различных пространственных расположений и геологических условий. Приведенные примеры показывают высокое качество, информативность и точность построения сейсмических атрибутов, вычисленных на основе предложенных 5 методов обработки традиционных данных сейсморазведки методом общей глубинной точки (ОГТ).

3. ДОРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЧЕТЫРЕХ КОНЕЧНЫХ ПРОТОТИПОВ ВЫСОКОМОБИЛЬНОГО МАЛОГАБАРИТНОГО ЦИФРОВОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО МОДУЛЯ. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЧЕТЫРЕХ ПРОТОТИПОВ ВЫСОКОМОБИЛЬНОГО МАЛОГАБАРИТНОГО ЦИФРОВОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО МОДУЛЯ

В рамках данного проекта была поставлена задача разработки и изготовления пяти автономных сейсмических модулей, предназначенных для использования в составе нодальной системы при совместной работе с БВС. Каждый модуль должен обеспечивать высокоточные измерения сейсмической активности, автономную работу в полевых условиях и возможность беспроводного обмена данными с центральной системой управления. Каждый корпус был оснащён разъёмами для подключения к внешним системам через USB и Wi-Fi, а также площадкой для интеграции с захватом БВС, модифицированным в 2024 году с учетом разработанных решений.

В каждый модуль интегрированы молекулярно-электронные геофоны MTSS-1001, установленные на специализированных кронштейнах, обеспечивающих стабильность работы независимо от ориентации прибора (рисунок 57).

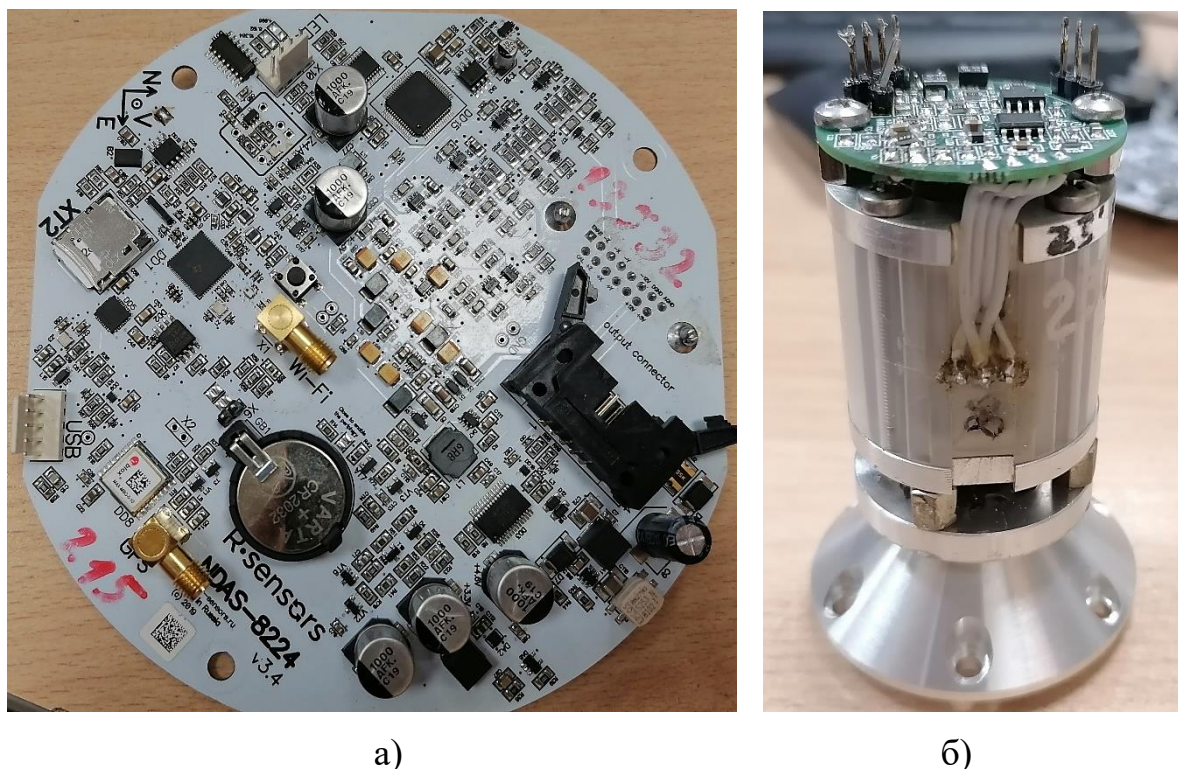


Рисунок 57 – Цифровая плата (а) и молекулярно-электронный геофон (б)

Более того, в цифровую плату встроены трёхкомпонентный акселерометр-магнитометр, позволяющий на этапе обработки учесть погрешности, связанные с некорректной установкой устройства относительно вертикали. Также в геофонах

применяются усилители с низким энергопотреблением (не более 30 мВт) и малым уровнем собственного шума. Вдобавок, имеется возможность расширения частотного диапазона до 0,1 Гц, с помощью корректировки параметров цепей обратной связи и выходного фильтра, что является еще одним преимуществом в сравнении с существующими электродинамическими геофонами, рабочая полоса частот которых ограничена снизу 5 Гц. Таким образом, полученные в данном случае низкочастотные составляющие спектра позволяют осуществлять широкополосную обработку и дополнительно повысить глубину, на которой становится возможным получение геологических данных.

Каждый из трех ортогонально расположенных геофонов подключен к цифровой плате соединительными проводами (рисунок 58).

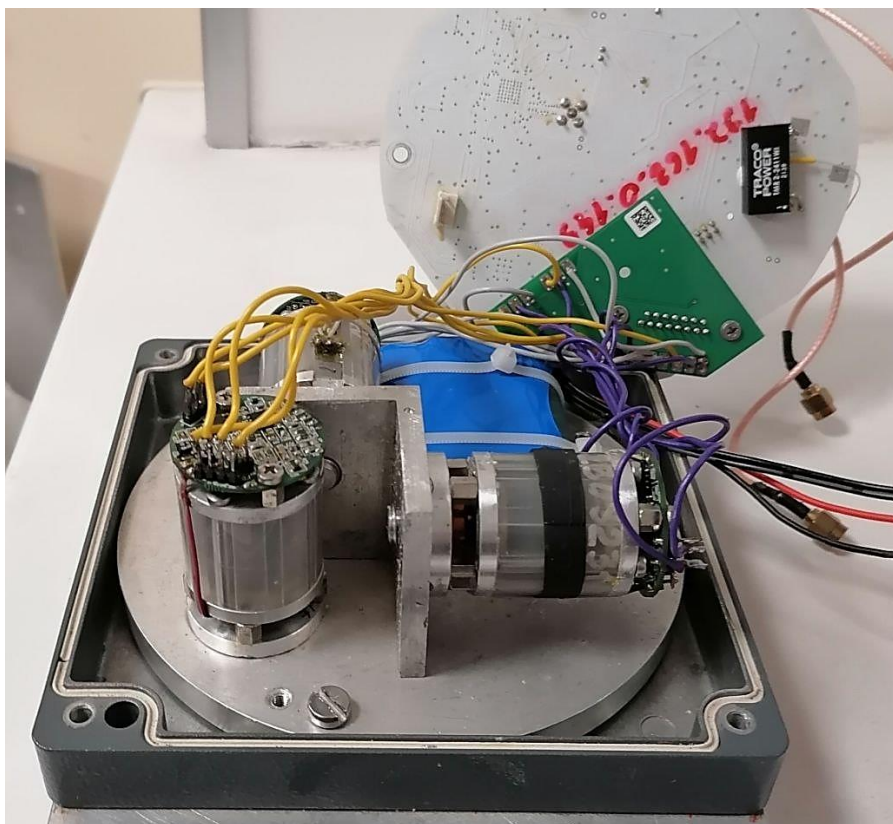


Рисунок 58 – Подключенные к цифровой плате геофоны

Цифровая плата, установленная на металлических межплатных стойках, надежно крепится к основанию прибора (рисунок 59).

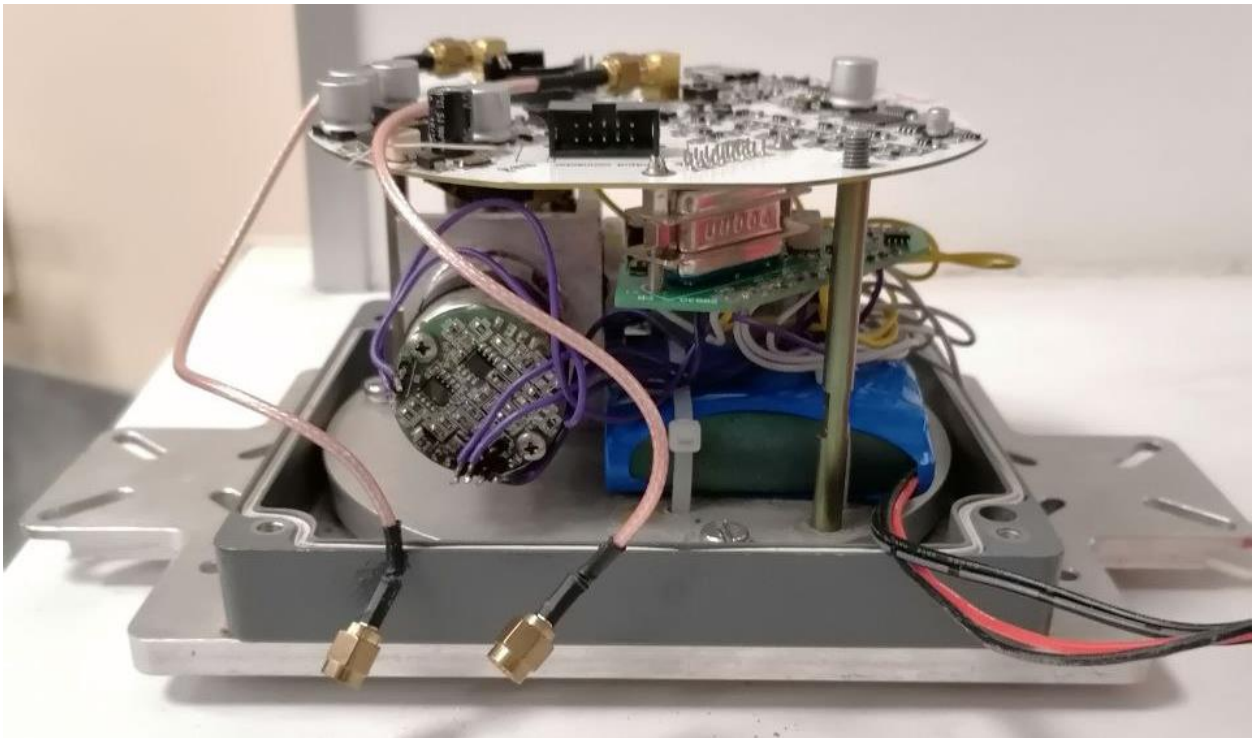


Рисунок 59 – Собранный прибор без защитного корпуса

Кабели USB, модуля GPS и Wi-Fi модуля вкручиваются на соответствующие разъемы на защитном корпусе с целью вывода наружу GPS и Wi-Fi антенны, а также порта USB, обеспечивающего возможность считывать данные с прибора, не прибегая к съему корпуса.



Рисунок 60 – Внешний вид одного из собранных автономных модулей

В результате проведённых работ изготовлены пять полностью функционирующих сейсмических модулей, соответствующих техническому заданию. Каждый модуль продемонстрировал рабочую частотную полосу от 1 до 300 Гц и динамический диапазон больше 130 дБ, устойчивую связь с одноплатным компьютером Raspberry Pi на борту БВС

на расстоянии до 30 метров, возможность автономной работы в течение 48 часов без подзарядки. Разработанные модули готовы к интеграции в экспериментальную систему с БВС. В дальнейшем планируется расширение функциональности программного обеспечения, включая поддержку алгоритмов оптимизации маршрута и автоматического анализа качества данных.

3.1. Разработка методов размещения сейсмических модулей на грунте и оценка качества сейсмического контакта с грунтом

Для проведения эксперимента использовались три идентичных сейсмических нода с целью изучения влияния различных методов установки на качество регистрации сейсмических сигналов. Основная задача заключалась в оценке спектрального отклика датчиков на поданный свип-сигнал и выявлении наиболее эффективного способа их установки для точной регистрации сигналов.

3.1.1. Вертикальная компонента

Для проведения эксперимента использовались три способа установки датчиков:

- Один из датчиков устанавливался с использованием четырех длинных штырей, закрепленных на корпусе. Данная конструкция обеспечивает надежный механический контакт с грунтом и способствует беспрепятственной регистрации сигнала.
- Второй датчик размещался на заранее расчищенном от травы грунте, что обеспечивало прямое, но менее надежное сцепление с поверхностью.
- Третий датчик сбрасывался с высоты 1 метр на травяное покрытие, имитируя изначально задуманный метод развертывания системы при помощи БВС. Этот метод моделировал условие минимального контакта с неподготовленной заранее поверхностью.

Все три испытываемых сейсмических нода располагались на расстоянии меньше метра друг от друга и на удалении 450 метров от вибратора – источника свип-сигнала, вследствие чего можем считать, что все датчики располагались в одной точке и при одинаковых условиях. По записанному отклику на свип-сигнал были построены спектрограммы для каждого прибора (рисунки 61-63).

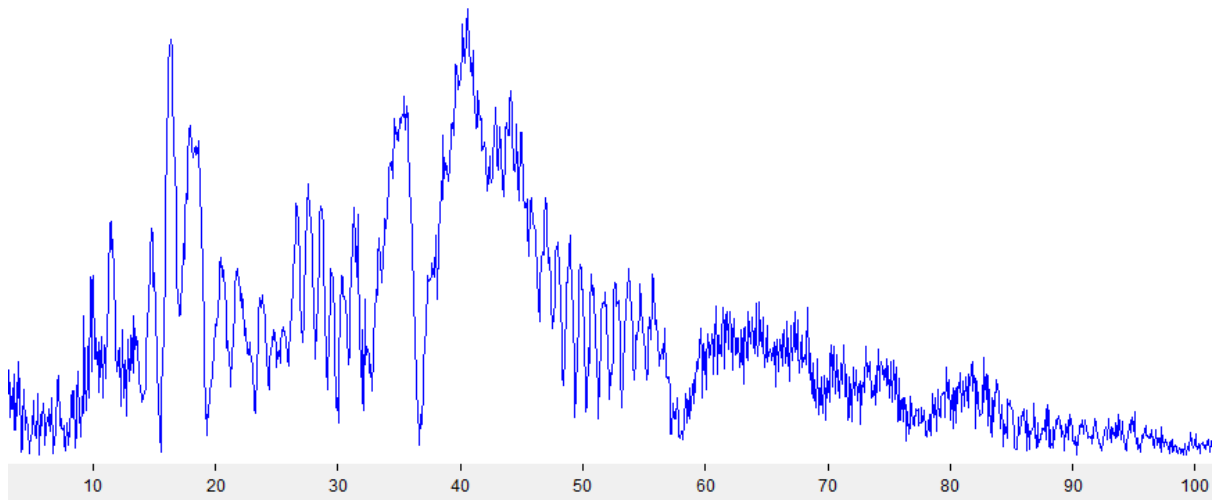


Рисунок 61 – Спектрограмма датчика с установочными штырями

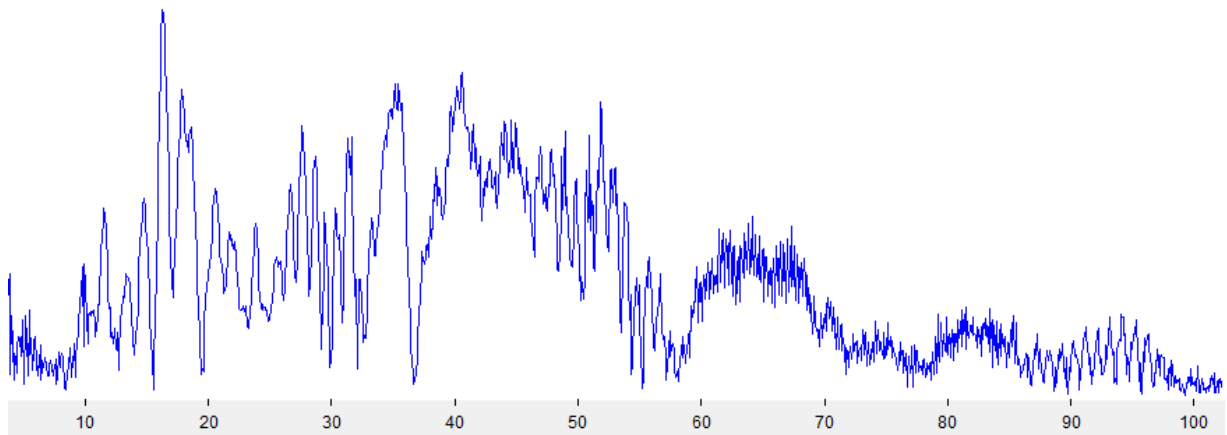


Рисунок 62 – Спектрограмма вертикальной компоненты датчика на расчищенном грунте

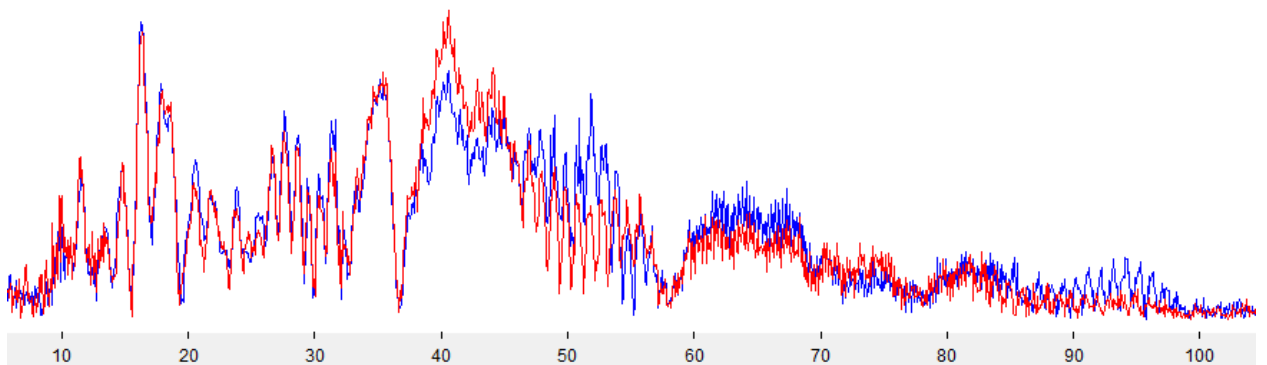


Рисунок 63 – Наложение спектров двух датчиков (размещенного на расчищенном грунте – синий цвет и датчика с установочными штырями – красный цвет)

Спектр датчика с установочными штырями демонстрирует наиболее стабильное и равномерное воспроизведение сигнала в широком диапазоне частот, что свидетельствует о качественной передаче сейсмического сигнала от грунта к датчику благодаря надежному механическому контакту.

Анализ сигнала, полученного с нода, размещенного на расчищенном грунте, показал схожие результаты как по амплитуде сигнала, так и по частотному составу. При наложении спектров двух исследуемых приборов, можно сделать вывод об идентичности полученных данных. При размещении датчиков на «подготовленном» грунте нет необходимости прибегать к использованию установочных штырей.

Третий прибор был сброшен на «неподготовленную», т.е. покрытую травой, высотой около 15 см, почву с небольшой высоты, тем самым имитируя предполагаемый метод размещения при помощи сброса с БВС.

Амплитуда зарегистрированного сигнала осталась прежней в отличии от его частотного состава. Различие явно прослеживается при наложении полученных спектров (рисунок 64).

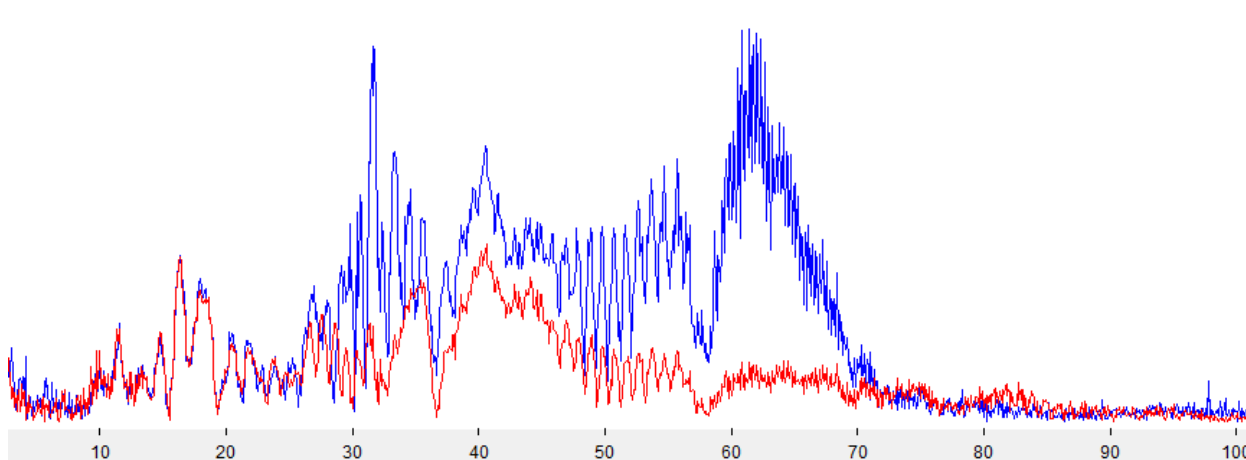


Рисунок 64 – Наложение спектров двух датчиков (сброшенного с высоты 1 метр – синий цвет, датчика со штырями, воткнутыми в землю – красный цвет)

Различие может быть связано с искажением вибраций травяным покровом и недостаточным механическим контактом между нодом и поверхностью. В результате усиливаются сигналы на частотах вблизи некоторой резонансной и ослабляются на частотах выше 70 Гц. Видимо, наблюдаемый резонанс связан с колебанием корпуса датчика на упругом подвесе, сформированном травяным покровом. Широкий спектр резонанса от 30 до 70 Гц говорит о низкой добротности механических колебаний или наличии нескольких резонансных частот в исследуемой области.

3.1.2. Горизонтальные компоненты

Аналогичным образом проведены исследования соответствующих горизонтальных компонент разработанных приборов (рисунки 65-68).

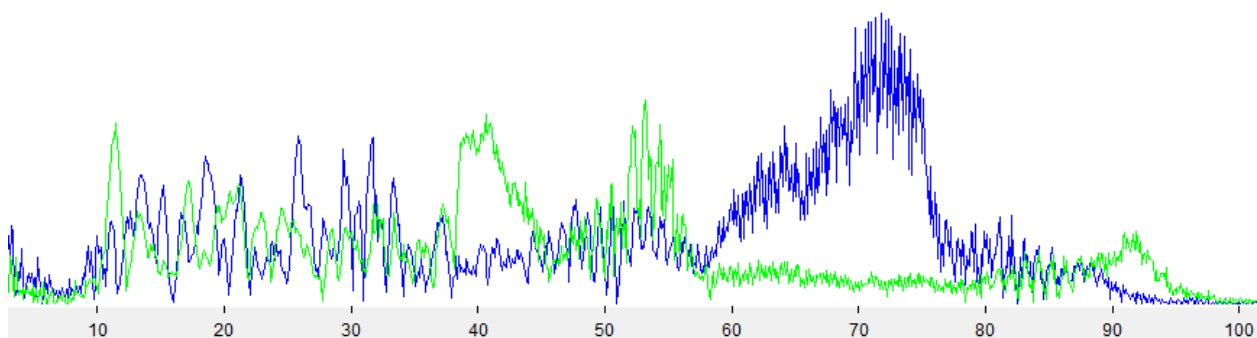


Рисунок 65 – Наложение спектров X-компонент двух датчиков (размещенного на расчищенном грунте – зеленый цвет и датчика с установочными штырями – синий цвет)

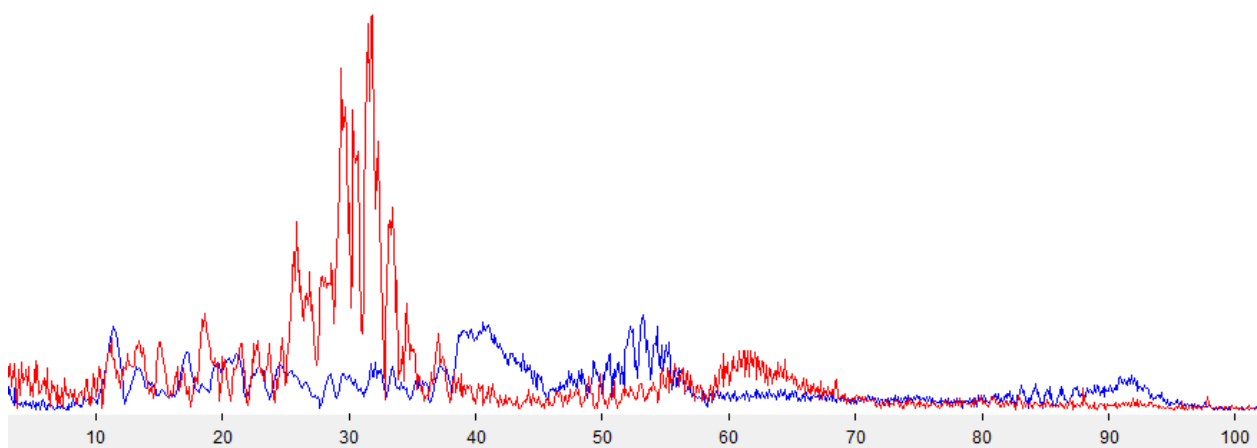


Рисунок 66 – Наложение спектров X-компонент двух датчиков (размещенного на расчищенном грунте – синий цвет и датчика сброшенного с высоты 1 метр – синий цвет)

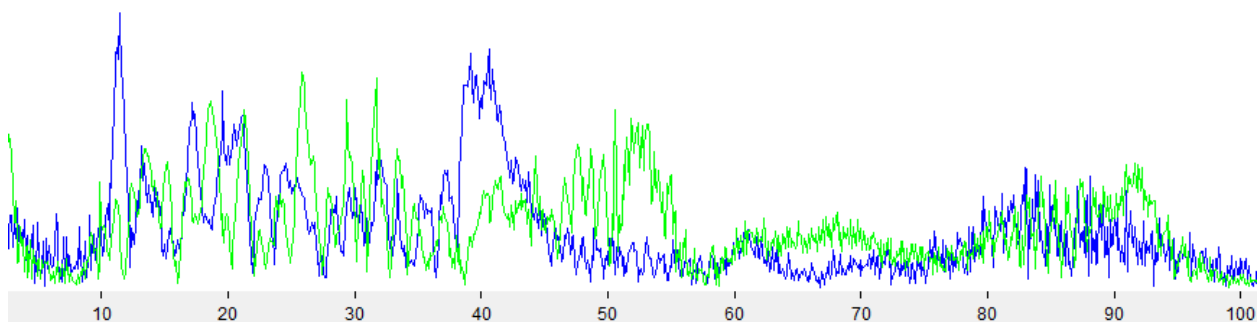


Рисунок 67 – Наложение спектров Y-компонент двух датчиков (размещенного на расчищенном грунте – зеленый цвет и датчика с установочными штырями – синий цвет)

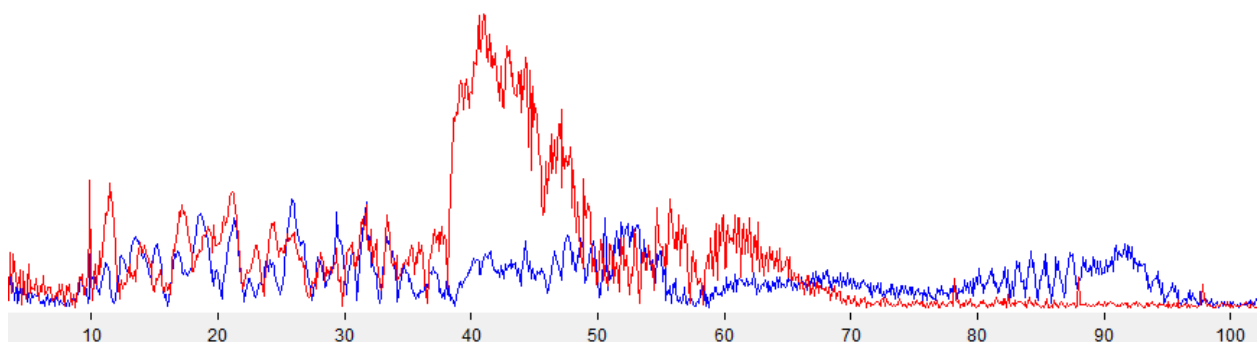


Рисунок 68 – Наложение спектров Y-компонент двух датчиков (размещенного на расчищенном грунте – синий цвет и датчика сброшенного с высоты 1 метр – синий цвет)

Наиболее эффективным методом установки является использование установочных штырей, что обеспечивает максимальную амплитуду и равномерность сигнала в широком частотном диапазоне. Размещение на травяном покрове без подготовки установочной площадки приводит к значительным потерям в передаче сигнала, особенно в высокочастотной области. В случае их отсутствия необходимо минимизировать демпфирующие факторы, такие как травяное покрытие, и обеспечить максимально возможный контакт датчика с грунтом.

3.2. Методы идентификации сейсмических модулей и оптимизации траектории БВС для исключения повторного тестирования

Процесс идентификации сейсмических модулей на основе взаимодействия с одноплатным компьютером, установленным на борту БВС, реализуется через использование индивидуальных сетей Wi-Fi, создаваемых каждым модулем. Каждый автономный сейсмический узел на этапе конфигурации получает уникальный идентификатор, связанный с его серийным номером, который используется в качестве SSID беспроводной сети.

При выполнении миссии одноплатный компьютер (на платформе Raspberry Pi) производит непрерывное сканирование радиочастотного спектра на предмет наличия доступных сетей Wi-Fi. Как только система обнаруживает сеть с идентификатором, соответствующим одному из ранее зарегистрированных модулей, она инициирует процесс подключения. После успешного соединения происходит взаимодействие по специализированному протоколу прикладного уровня, реализованному поверх UDP. Этот протокол обеспечивает запрос текущего состояния модуля, включая данные о его функциональности, состоянии датчиков и накопленных данных. Согласно протоколу так же производится проверка корректности работы модуля путём выполнения тестирования, включающего подачу калибровочного сигнала и последующий анализ отклика.

Программная проверка данных выполняется на основе сравнения ключевых параметров отклика (амплитуды и длительности) с эталонными значениями, допустимые отклонения которых задаются предварительно. Например, амплитуда калибровочного отклика должна составлять $2 \pm 0,1$, а длительность — $0,6 \pm 0,03$. В случае выхода параметров за пределы допустимых значений система фиксирует неисправность и передаёт соответствующий отчёт оператору.

Для исключения повторного тестирования одного и того же сейсмического модуля используется следующий метод: В момент успешного подключения к сети и завершения

тестирования одноплатный компьютер регистрирует серийный номер модуля в локальной базе данных. Это предотвращает повторное подключение к уже обслуженным устройствам. Представленный подход к идентификации и управлению взаимодействием сейсмических модулей позволяет существенно повысить эффективность контроля качества данных в реальном времени и минимизировать риск возникновения ошибок в процессе тестирования.

4. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ И РАЗВЕРТЫВАНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ НОДАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ РАЗРАБОТАННЫХ ЧЕТЫРЕХ ПРОТОТИПОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ И ГРУППЫ БВС ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ ПО ВЕКТОРНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ МЕСТНОСТИ

4.1. Метод размещения сейсмодатчиков на грунте

Предложенный метод базируется на подходе, разработанном в 2023 году, и предназначен для размещения сейсмических датчиков группой БВС с формированием статических воздушных коридоров. Каждый коридор представляется в виде последовательности ориентированных ограничивающих параллелепипедов (ООП), задаваемых на основе координат исходных точек и направления движения БВС. Направление коридора определяется касательным вектором между соседними точками траектории, а ширина и длина ООП обеспечивают гарантированный запас пространства для безопасного пролёта.

Статичные коридоры исключают необходимость динамической корректировки маршрутов, поскольку их конфигурация заранее оптимизирована под существующие условия. Это упрощает планирование полёта, снижает вычислительную нагрузку на построение траекторий движений для группы и повышает надёжность работы группы БВС.

Для обеспечения безопасности полёта в статически определённом коридоре используются два ключевых механизма. Во-первых, модифицированный алгоритм обнаружения статических препятствий по карте высот позволяет проверить, не пересекаются ли внутренние области ООП с рельефом или другими неподвижными объектами. Во-вторых, применяется двухэтапная схема обнаружения коллизий с коридорами других БВС: на широкой фазе свободные октодеревья обеспечивают быстрое отсеивание явно непересекающихся регионов, а на узкой фазе алгоритм Гилберта-Джонсона-Кирти даёт точную проверку потенциальных пересечений.

4.1.1. Обеспечение безопасных воздушных коридоров

Воздушный коридор AC_T траектории \mathcal{T} можно представить как совокупность ООП $C_{M-1,M}$ заданной ширины b и длины $l = \|P_{M-1} - P_M\|_2$, образованных парами точек

$(P_{M-1}, P_M) \in T$, $M = \overline{2..k}$, где k – количество точек траектории, лежащими в центрах противоположных гранях параллелепипеда:

$$AC_T = \prod_{M=2}^k C_{M-1,M}$$

Следовательно, для обеспечения безопасного воздушного коридора при построении траектории БВС в процессе отбора планировщиком пути следующей кандидатской точки P_{next} необходимо:

- Построить ООП $C_{current,next}$, формируемый кандидатской следующей точкой P_{next} и текущей точкой $P_{current}$;
- Проверить наличие пересечений $C_{current,next}$ статических препятствий по карте высот;
- Проверить наличие пересечений $C_{current,next}$ воздушных коридоров остальных БВС в группе.

4.1.2. Построение ограничивающих параллелепипедов

Для однозначного задания $C_{current,next}$ необходимо рассчитать координаты его восьми вершин $V_i, i = \overline{1..8}$. Для этого сперва необходимо рассчитать единичный касательный вектор $\bar{\tau}$, указывающий направление пути от $P_{current}$ до P_{next} :

$$\bar{\tau} = \frac{P_{next} - P_{current}}{\|P_{next} - P_{current}\|_2}$$

Затем необходимо найти два единичных вектора нормали \bar{n}_1 и \bar{n}_2 , взаимно перпендикулярных друг другу и вектору $\bar{\tau}$. Существует бесконечное множество таких векторов в трехмерном пространстве. Направления данных векторов определяют вращение ООП вокруг оси, проходящей через $P_{current}$ и P_{next} .

Для фиксации вращения ООП можно рассчитать \bar{n}_1 как векторное произведение $\bar{\tau}$ с одним из базисных векторов \bar{e}_x , \bar{e}_y или \bar{e}_z , некопланарных $\bar{\tau}$, что гарантированно даст вектор, перпендикулярный $\bar{\tau}$. Геометрически выбор базисного вектора определяет, какой плоскости пространства будут параллельны противоположные грани ООП, центрами которых являются $P_{current}$ и P_{next} . Выберем в качестве базисного вектора \bar{e}_z , тогда соответствующие грани ООП будут параллельны плоскости Oxy . Если \bar{e}_z компланарен $\bar{\tau}$

(геометрически, это означает перпендикулярность $\overline{\tau}$ плоскости Oxy), берем другой вектор, например $\overline{e_x}$.

$$\overline{n_1} = \begin{cases} \overline{\tau} \times \overline{e_z}, & \text{если } |\overline{\tau} \times \overline{e_z}| = 0 \\ \overline{\tau} \times \overline{e_x}, & \text{если } |\overline{\tau} \times \overline{e_z}| \neq 0 \end{cases}$$

Для вычисления $\overline{n_2}$ необходимо взять векторное произведение от $\overline{\tau}$ и $\overline{n_1}$:

$$\overline{n_2} = \overline{\tau} \times \overline{n_1}$$

Тогда для заданной ширины коридора b , формулы координат вершин ООП $C_{current,next}$ следующие:

$$V_1 = P_{current} + \frac{b}{2}\overline{n_1} + \frac{b}{2}\overline{n_2}$$

$$V_2 = P_{current} + \frac{b}{2}\overline{n_1} - \frac{b}{2}\overline{n_2}$$

$$V_3 = P_{current} - \frac{b}{2}\overline{n_1} + \frac{b}{2}\overline{n_2}$$

$$V_4 = P_{current} - \frac{b}{2}\overline{n_1} - \frac{b}{2}\overline{n_2}$$

$$V_5 = P_{next} + \frac{b}{2}\overline{n_1} + \frac{b}{2}\overline{n_2}$$

$$V_6 = P_{next} + \frac{b}{2}\overline{n_1} - \frac{b}{2}\overline{n_2}$$

$$V_7 = P_{next} - \frac{b}{2}\overline{n_1} + \frac{b}{2}\overline{n_2}$$

$$V_8 = P_{next} - \frac{b}{2}\overline{n_1} - \frac{b}{2}\overline{n_2}$$

4.1.3. Обнаружение статических препятствий

Обнаружение статических препятствий в области, ограниченной построенным ООП $C_{current,next}$, основывается на данных о высотах, представленных в форме карты высот $H(x, y)$, путем анализа их значений в каждой точке карты, которую покрывает ортографическая проекция ООП на плоскость Oxy .

Для построения данной области необходимо построить ортографические проекции $V_i = \overline{1..8}$, всех вершин ООП на плоскость Oxy . Для этого достаточно отбросить z -координату. Проекции вершин составляют два пересекающихся прямоугольника с

множествами вершин $\{\hat{V}_1, \hat{V}_2, \hat{V}_5, \hat{V}_6\}$ и $\{\hat{V}_3, \hat{V}_4, \hat{V}_7, \hat{V}_8\}$, причем в случае, когда ООП перпендикулярен Oxy , данные множества равны друг другу. Вместе они образуют ограничивающий ориентированный прямоугольник $C_{current,next}^*$, область покрытия ортографической проекции.

Далее необходимо найти ячейки карты высот, попадающие в область $C_{current,next}^*$ и проверить проекции точек $\bar{p} = (x, y, H(x, y)), (x, y) \in C_{current,next}^*$ на три перпендикулярные грани $\hat{V}_1\hat{V}_2, \hat{V}_1\hat{V}_4, \hat{V}_1\hat{V}_5$, формирующие ООП:

$$(0 < \bar{v} \cdot \bar{i} < \bar{i} \cdot \bar{i}) \wedge (0 < \bar{v} \cdot \bar{j} < \bar{j} \cdot \bar{j}) \wedge (0 < \bar{v} \cdot \bar{k} < \bar{k} \cdot \bar{k})$$

$$\bar{i} = \hat{V}_2 - \hat{V}_1$$

$$\bar{j} = \hat{V}_3 - \hat{V}_1$$

$$\bar{k} = \hat{V}_5 - \hat{V}_1$$

$$\bar{v} = \bar{p} - \hat{V}_1$$

Выражение проверяет, находятся ли все три проекции точки \hat{p}_v на грани внутри соответствующих граней. Если да, то $\bar{p} \in C_{current,next}$, следовательно внутри ООП находится статическое препятствие и он не может быть частью воздушного коридора. Если хотя бы одна из проекций не лежит внутри соответствующих граней, то $\bar{p} \notin C_{current,next}$, поэтому препятствие отсутствует.

Поиск всех ячеек, покрытыми ортографической проекцией ООП, с проверкой коллизий можно сформулировать как задачу о заполнении выпуклого многоугольника [Hearn D. Computer graphics with OpenGL. – Pearson Education India, 2004.], но вместо закраски ячеек, мы проверяем условие

Классическим методом заполнения выпуклого многоугольника является метод заливки линиями [Pavlidis T. Algorithms for graphics and image processing. – Springer Science & Business Media, 2012.]. Метод эффективно заполняет многоугольники, обрабатывая по одной сканирующей строке за раз и минимизируя количество пикселей, которые необходимо раскрасить. Он часто используется в компьютерной графике для отображения заполненных многоугольников.

Алгоритм определения статических препятствий на основе метода заливки линиями приведен на рисунке 69.

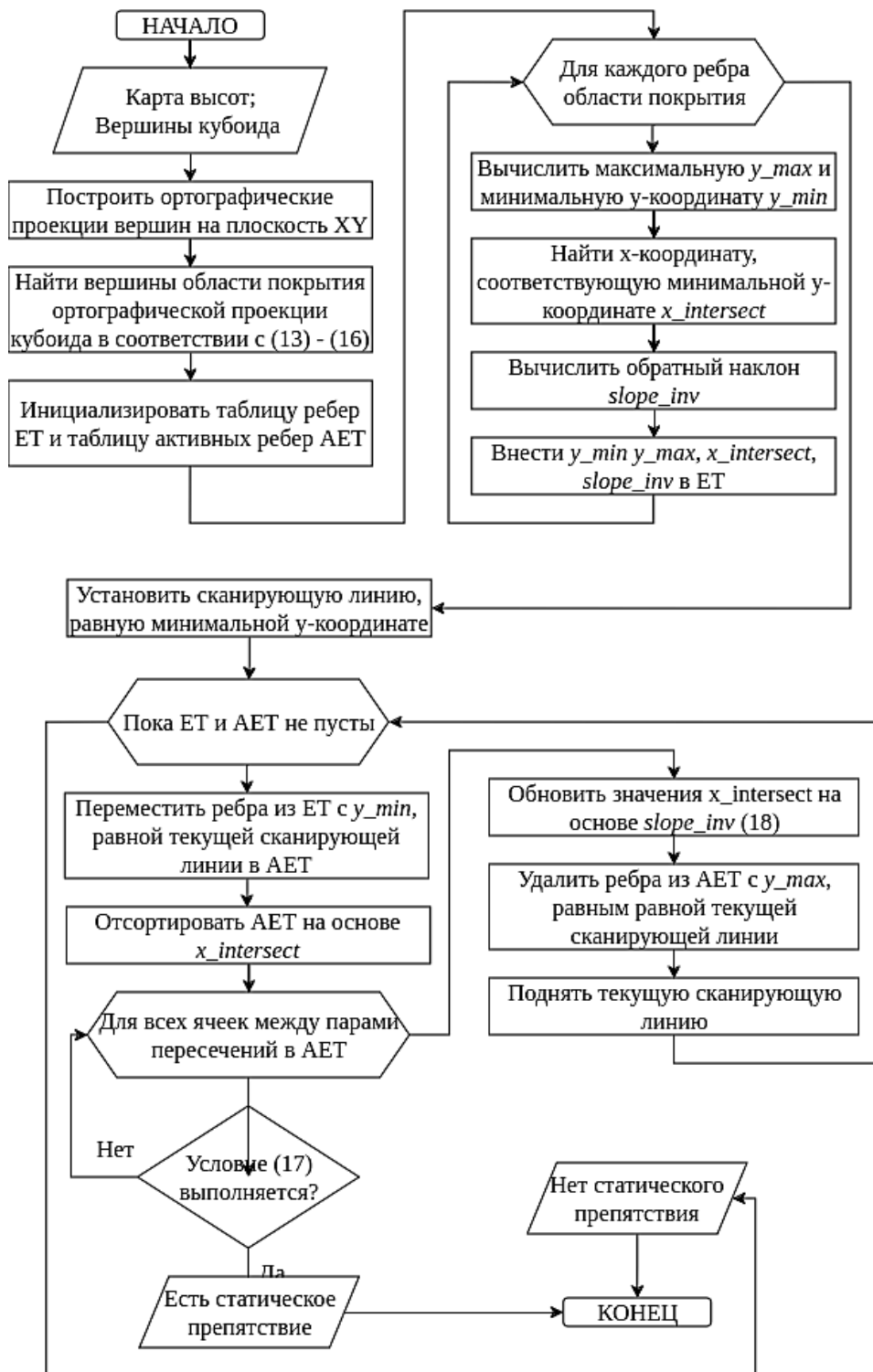


Рисунок 69 – Алгоритм обнаружения статических препятствий

Сначала строится область покрытия ортографической проекции ООП на плоскость Oxy в виде четырехугольника. Далее происходит итерирование по всем ячейкам внутри области с помощью метода заливки линиями.

Создается таблица рёбер, которая содержит информацию обо всех рёбрах многоугольника. Каждое ребро хранит максимальную и минимальную y -координаты x -координату, соответствующую минимальной y -координате, а также угол обратного

наклона для вычисления точек пересечения с текущей сканирующей линией. Затем инициализируется активная таблица рёбер, хранящая текущие активные рёбра, пересекающиеся с текущей сканирующей линией.

На каждом шаге перебираются все рёбра в таблице и перемещаются те из них, у которых минимальная y -координата равна текущей сканирующей линии, в активную таблицу рёбер. Рёбра в активной таблице сортируются по x -координате пересечения с текущей сканерной строкой. Это позволяет определить порядок проверки ячеек между парами пересекающихся рёбер. После сортировки активная таблица рёбер используется для проверки ячеек между парами пересекающихся рёбер. Проверка происходит путем обновления x -координаты пересечения каждого ребра с каждой сканерной строкой. На каждом шаге проверяется, не достигла ли сканирующая линия максимальной y -координаты для каких-либо рёбер в активной таблице. Если да, такие рёбра удаляются из активной таблицы. Процесс повторяется для каждой сканирующей линии до тех пор, пока не будут обработаны все рёбра и активные рёбра.

4.1.4. Обнаружение пересечений с другими коридорами

Чтобы обнаружить пересечения с другими коридорами, необходимо проверить, пересекается ли сформированный ООП $C_{current,next}$ с ООП воздушных коридоров прочих БВС в группе.

Простым решением является наивная проверка каждого ООП других коридоров на наличие коллизии, но это требует значительных вычислительных затрат, особенно при большом пространстве состояний, где количество ООП исчисляется десятками тысяч. Очевидно, нет смысла проверять ООП, расположенные вдали от $C_{current,next}$. В такой ситуации обнаружение коллизий становится двухэтапным процессом [Kockara S. et al. Collision detection: A survey //2007 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. – IEEE, 2007. – С. 4046-4051.]:

Широкая фаза. На этапе широкой фазы задача состоит в том, чтобы найти пары возможно пересекающихся ООП и исключить пары, которые безусловно не пересекаются.

Узкая фаза. На этапе узкой фазы каждый ООП, обнаруженный на широкой фазе, проверяется на предмет столкновения с $C_{current,next}$.

На широкофазном этапе используются такие приемы, как пространственное разбиение [Ganter M. A., Isarankura B. P. Dynamic collision detection using space partitioning. – 1993.], иерархии ограничивающих объемов [Sulaiman H. A., Bade A. Bounding volume hierarchies for collision detection //Computer Graphics. – 2012. – Т. 10. – С. 5772-2386.], а также метод прохода и сортировки [Cohen J. D. et al. I-collide: An interactive and exact collision detection system for large-scale environments //Proceedings of the 1995 symposium on Interactive

3D graphics. – 1995. – С. 189-ff.]. Все они основаны на применении ускоряющих структур данных, позволяющих быстро отсеять гарантированно непересекающиеся объекты.

Основная идея пространственного разбиения заключается в разбиении пространства на более мелкие области без явного использования границ входящих в пространство объектов. Равномерные сетки [Teschner M. et al. Collision detection for deformable objects //Computer graphics forum. – 9600 Garsington Road, Oxford, OX4 2DQ, UK. : Blackwell Publishing Ltd., 2005. – Т. 24. – №. 1. – С. 61-81.], пространственные хэши [Teschner M. et al. Optimized spatial hashing for collision detection of deformable objects //Vmv. – 2003. – Т. 3. – С. 47-54.], октодеревья [Fan W. S. et al. An octree-based proxy for collision detection in large-scale particle systems //Science China Information Sciences. – 2013. – Т. 56. – С. 1-10.] и свободные октодеревья [Ulrich T. Loose octrees //Game programming gems. – 2000. – Т. 1. – С. 434-442.] часто используются для этой цели. Временная сложность обнаружения коллизий для сеток и пространственных хэшей составляет $O(1)$. Однако в случаях неравномерного распределения объектов, временная сложность для пространственных хэшей возрастает до $O(n)$ и становится эквивалентной наивному перебору. Вставка и удаление элементов для сеток и пространственных хэшей осуществляется за $O(1)$. Кроме того, равномерные сетки требуют выделения дополнительной памяти на хранение ячеек пространства, а пространственные хэши – на хранение хэш-таблиц и бакетов, что приводит к существенным затратам для больших пространств состояний. Октодеревья обеспечивают вставку, удаление элементов и поиск коллизий за $O(\log n)$. В тоже время, когда объекты расположены на пересечениях областей, возникает необходимость их хранения в нескольких областях одновременно, что может значимо повысить потребление памяти. Данного недостатка лишены свободные октодеревья за счет использования свободных границ. Эта отличительная особенность свободных октодеревьев также гарантирует вставку и удаление элементов за $O(1)$ и лишает необходимости в балансировке дерева.

Иерархии ограничивающих объемов используются для организации объектов в иерархическую структуру, где каждый узел представлен ограничивающим объемом, охватывающим группу объектов. Примерами таких иерархий являются AABB-деревья [Bergen G. Efficient collision detection of complex deformable models using AABB trees //Journal of graphics tools. – 1997. – Т. 2. – №. 4. – С. 1-13.] и OOB-деревья [Gottschalk S., Lin M. C., Manocha D. OBBTree: A hierarchical structure for rapid interference detection //Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques. – 1996. – С. 171-180.]. Они обеспечивают обнаружение коллизий с вычислительной сложностью $O(\log n)$, нечувствительны к распределению объектов и не потребляют лишнюю память. Но в процессе вставки и удаления элементов иерархия становится все

более несбалансированной, что может существенно замедлить операции поиска. Необходимо выполнять балансировку иерархии, что приводит к лишним вычислительным затратам.

Метод прохода и сортировки заключается в поддержании отсортированных списков конечных точек выравненных по осям ограничивающих параллелепипедов объектов вдоль осей координат. Эти списки сортируются на основе позиции конечных точек вдоль каждой оси. Благодаря поддержке этих отсортированных списков можно эффективно определять возможные перекрывающиеся интервалы вдоль каждой оси, что помогает выявлять потенциальные столкновения. Временная сложность вставки и удаления элементов составляет $O(1)$, для поиска столкновений в общем случае составляет $O(\log n)$. Но, как и для пространственных хэшей, в случае скопления объектов в определенной области, сложность возрастает до $O(n)$ и становится аналогичной наивному перебору. [Ericson C. Real-time collision detection. – Crc Press, 2004.].

Таким образом, использование свободных октодеревьев представляет собой оптимальный выбор для широкой фазы. Они обеспечивают константную сложность при вставке и удалении элементов и логарифмическую сложность при поиске возможных столкновений. Кроме того, они нечувствительны к распределению объектов, не требуют балансировки и не эффективно расходуют память.

Алгоритм широкой фазы представлен на рисунке 70.

Алгоритм широкой фазы рекурсивно обходит свободное октодерево. В начале формируется выравненный по осям ограничивающий параллелепипед AABV для входного ООП. Затем, начиная с корневого узла, проверяется пересечение AABV с границами узла пространства. Если да, значит входной ООП попадает в соответствующую область пространства. Тогда проверяются пересечения AABV с ограничивающими параллелепипедами объектов, хранящихся в данной области, когда таковые имеются. Если есть пересечения, то соответствующие объекты добавляются в выходной список COL. Далее аналогично проверяем дочерние узлы, предварительно добавленные в стек STACK, разбивающие подпространство текущего узла на более мелкие части до полного обхода дерева.

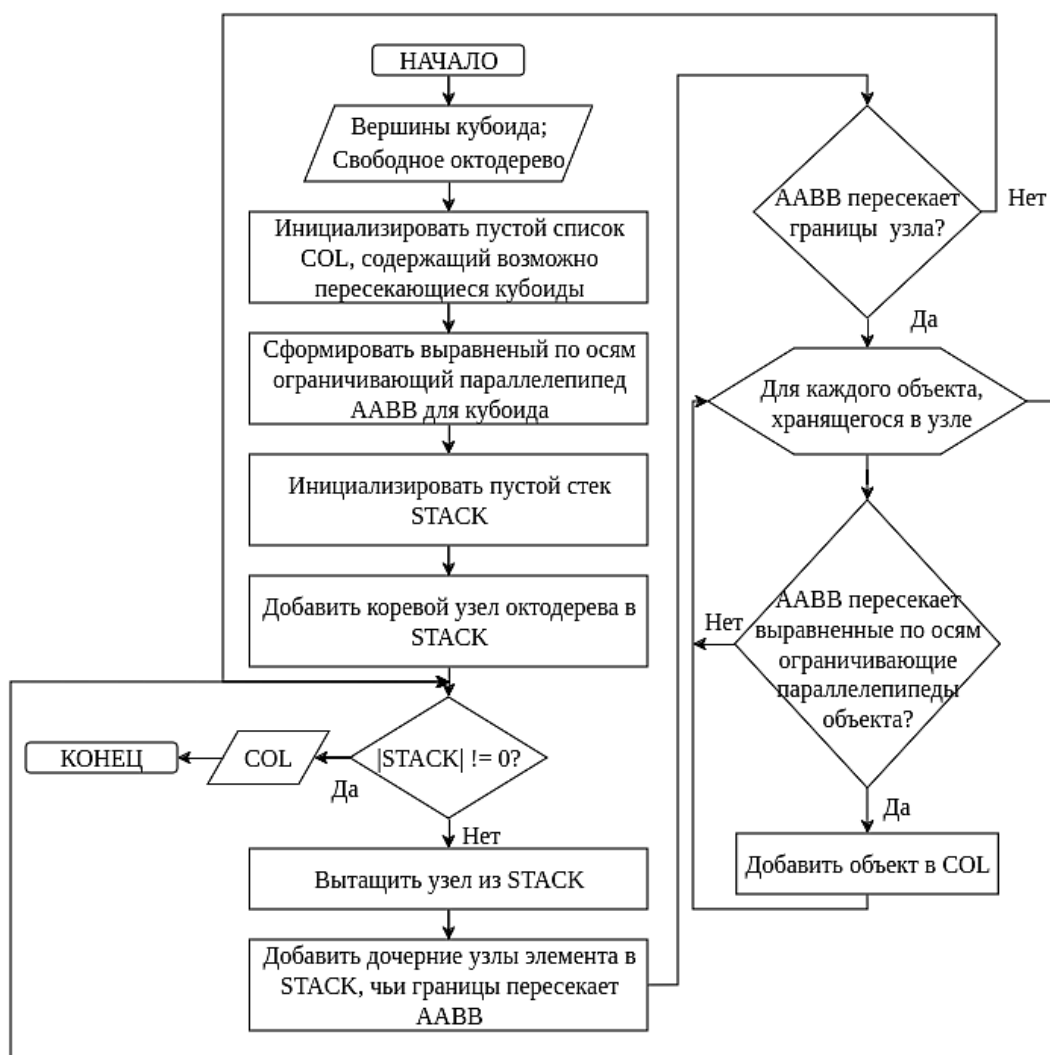


Рисунок 70 – Алгоритм широкой фазы

После отсеивания безусловно непересекающихся пар свободными октодеревьями, мы переходим в узкую фазу, в которой необходимо проверить оставшиеся возможно пересекающиеся пары точным алгоритмом. Для точного определения пересечений широко используются два основных алгоритма: алгоритм на основе теоремы о разделяющей оси (SAT) [Eberly D. 3D game engine design: a practical approach to real-time computer graphics. – CRC Press, 2006.] и алгоритм Алгоритм Гилберта-Джонсона-Кирти (GJK) [Gilbert E. G., Johnson D. W., Keerthi S. S. A fast procedure for computing the distance between complex objects in three-dimensional space //IEEE Journal on Robotics and Automation. – 1988. – Т. 4. – №. 2. – С. 193-203.].

Алгоритм SAT основан на принципе того, что если существует разделяющая ось между двумя выпуклыми объектами, то они не пересекаются. Он выполняет проверку наличия таких разделяющих осей, которые могут быть представлены в виде нормалей к граням объектов или их комбинаций. В 2D-пространстве этот метод довольно эффективен, поскольку в этом случае достаточно двух осей, чтобы разделить объекты и определить их

пересечение. Однако в 3D более сложная геометрия, в которой учитывается поворот и масштабирование, что приводит к тому, что количество возможных осей резко возрастает, требуя больше вычислительных ресурсов и времени для проверки всех возможных осей на наличие разделения.

Алгоритм GJK создает симплекс и проверяет, находится ли начало координат внутри него, указывая на столкновение между фигурами. Он итеративно обновляет симплекс, используя вспомогательные функции, уточняя его до тех пор, пока не будет обнаружено столкновение или не будут выполнены условия завершения. Если начало координат находится внутри симплекса, столкновение подтверждается, в противном случае столкновение не обнаруживается.

GJK предпочтителен для узкой фазы благодаря своей простоте и эффективности.

4.1.5. Интеграция коридоров в алгоритм планирования

Для интеграции воздушных коридоров в процесс планирования маршрутов в данной системе используется адаптированная версия алгоритма *ADRT-Connect**, используемого в работе 2023 года.

Основные изменения в алгоритм включают модификацию процедуры проверки коллизий. Теперь в процессе планирования траектории каждый маршрут проверяется на пересечения с ограничивающими параллелепипедами воздушных коридоров, формируемых траекториями других БВС. Добавлена процедура обнаружения потенциальных перекрытий с существующими воздушными коридорами, что позволяет избежать конфликтов между агентами и гарантировать безопасное использование пространства.

На основе результатов, полученных в 2023 году, предложен улучшенный метод размещения сейсмических датчиков на грунте группой БВС, ключевым аспектом которого является формирование безопасных воздушных коридоров с использованием ориентированных ограничивающих параллелепипедов для каждого сегмента траектории БВС с целью обеспечения безопасных и контролируемых маршрутов. Разработан алгоритм формирования воздушных коридоров. Ранее разработанный алгоритм обнаружения пересечений со статическими препятствиями местности адаптирован к специфике коридоров, а также предложена двухэтапная оптимизационная схема обнаружения коллизий с коридорами других БВС. Полученные результаты позволяют повысить надежность навигации БВС и минимизируют вычислительные затраты на построение траекторий движения.

4.2. Метод построения тепловой карты распространения сигнала Wi-Fi с использованием группы БВС

Метод построения тепловой карты группой БВС включает разбиение карты высот на ячейки, которые затем группируются в кластеры с помощью алгоритма K-means. Каждому кластеру назначается один БВС, который оптимизирует маршрут между центрами ячеек, решая задачу коммивояжера, и выполняет облет, разбивая каждую ячейку на подячейки. Собранные данные записываются в локальные матрицы БВС и объединяются в глобальную карту, где значения на границах кластеров усредняются, а пропущенные точки интерполируются.

Пусть дана карта высот $H(x,y)$, описывающая рельеф территории, N - количество БВС, точки размещения передатчиков Wi-Fi с заданными параметрами: мощность передатчика P_t , коэффициент усиления антенны передатчика G_t и приемника G_r , частота сигнала f , минимально допустимая мощность сигнала P_r .

Необходимо:

1. Разбить карту на ячейки, каждая из которых представляет квадрат покрытия сигнала с заданным размером s .
2. Сформировать N кластеров ячеек, чтобы минимизировать расстояния между ячейками внутри кластера.
3. Назначить каждому БВС свой кластер.
4. Построить маршруты для каждого БВС для полного покрытия его кластера.
5. Сформировать итоговую тепловую карту на основе собранных данных.

Первым этапом метода является расчет размера ячеек s , который определяется характеристиками сигнала передатчика и высотой полета БВС.

После определения размера ячеек территория делится на равномерную сетку. Центры каждой ячейки (x_i, y_i) формируют множество точек, которые передаются в алгоритм кластеризации K-means. Алгоритм K-means предназначен для разбиения множества точек на N кластеров, где N – количество доступных БВС.

Каждый кластер назначается одному из БВС. Для каждого кластера строится маршрут, соединяющий центры всех ячеек.

Во время выполнения задачи каждый БВС облетает свой кластер, проводя измерения мощности сигнала $P(x,y)$ в каждой ячейке. Полученные данные записываются в двумерную матрицу $M(i,j)$, где каждый элемент соответствует измеренной мощности сигнала в определенной точке. По завершении облета данные от всех БВС объединяются, формируя итоговую тепловую карту сигнала, которая представляет собой визуализацию распределения мощности сигнала на исследуемой территории.

4.2.1. Разбиение карты высот на ячейки

Разбиение карты на ячейки начинается с расчета размера каждой ячейки s , который определяется характеристиками сигнала, высотой полета и физическими параметрами передатчика и приемника. Размер ячейки рассчитывается по следующей формуле:

$$s = \frac{2 * \sqrt{\frac{P_{\text{перед}} * Gr * \lambda^2}{16 * \pi^2 * P_{\text{прием}}} - H_{\text{max}}^2}}{\sqrt{2}}$$

где $P_{\text{перед}}$ – мощность передатчика, Gt и Gr – коэффициенты усиления антенн передатчика и приемника соответственно, $\lambda = fc$ – длина волны сигнала, определяемая через скорость света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с и частоту сигнала f . Величина P_r обозначает минимально допустимую мощность сигнала, а H_{max} – максимальная высота полета БВС.

После определения s вся исследуемая территория, представленная картой высот $H(x, y)$, делится на равномерную сетку квадратных ячеек размером $s \times s$. Координаты центров каждой ячейки вычисляются по следующей формуле:

$$x_i = x_{\text{min}} + i * s, y_j = y_{\text{min}} + j * s$$

где x_{min} и y_{min} – минимальные координаты области, а i и j – индексы ячеек по горизонтали и вертикали соответственно. Максимальное число ячеек вдоль осей X и Y определяется как:

$$N_x = \lceil \frac{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}}{s} \rceil, N_y = \lceil \frac{y_{\text{max}} - y_{\text{min}}}{s} \rceil,$$

где x_{max} и y_{max} – максимальные координаты исследуемой области, а $\lceil \cdot \rceil$ обозначает округление вверх до ближайшего целого числа.

4.2.2. Формирование кластеров

Для группировки ячеек используется алгоритм кластеризации K-means, который позволяет разделить множество точек на компактные группы, минимизируя расстояния между точками внутри каждого кластера.

После разбиения карты на ячейки каждая ячейка с координатами (x_i, y_j) становится точкой в двумерном пространстве. Эти точки являются входными данными для алгоритма K-means. Процесс формирования кластеров начинается с инициализации, где случайным образом выбираются начальные центроиды для каждого из N кластеров. N задается

количеством доступных БВС, так как каждому кластеру в дальнейшем будет назначен отдельный БВС.

После инициализации каждая ячейка (x_i, y_j) назначается тому кластеру, центроид которого находится к ней на минимальном расстоянии. Расстояние между ячейкой и центроидом вычисляется как евклидова метрика:

$$d((x_i, y_i), C_k) = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2}$$

где C_k – множество точек, принадлежащих кластеру k , а $|C_k|$ – количество точек в этом множестве.

Процесс назначения точек кластерам и пересчета центроидов повторяется до тех пор, пока центроиды не перестанут изменяться, или изменения будут меньше заданного порога.

Каждый сформированный кластер представляет собой компактную группу ячеек, которую впоследствии можно назначить одному из БВС.

4.2.3. Назначение БВС кластерам

Назначение БВС выполняется по простому правилу: каждому кластеру C_k соответствует один БВС A_k . Таким образом, каждая группа ячеек, сформированная на этапе кластеризации, обрабатывается своим уникальным БВС. Так как количество БВС равно количеству кластеров, каждый БВС обрабатывает исключительно свой кластер. Между БВСами отсутствуют пересечения зон ответственности, что упрощает координацию их работы.

4.2.4. Построение маршрутов

Для детального покрытия ячеек кластера маршрут БВС строится с учетом двухуровневой стратегии: сначала БВС перемещается между центрами ячеек кластера, а затем выполняет детальный облет каждой ячейки, которая разбивается на подячейки меньшего размера. Этот подход обеспечивает эффективное покрытие всей зоны ответственности БВС и получение данных с требуемой пространственной точностью.

Первым этапом является построение маршрута между ячейками кластера. Каждая ячейка (x_i, y_i) представляется узлом графа, где веса рёбер между узлами равны евклидовому расстоянию между центрами ячеек:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

Для минимизации общего расстояния, которое должен пройти БВС, задача формулируется как задача коммивояжера. Оптимальный маршрут определяется как последовательность посещения ячеек, минимизирующая суммарное расстояние:

$$R = \operatorname{argmin} \sum_{k=1}^N d_{r_k r_{k+1}}$$

где r_k – индекс k -й ячейки в маршруте, а N – общее количество ячеек в кластере. Для решения задачи используются приближенные методы, такие как жадный алгоритм или алгоритм ближайшего соседа, которые обеспечивают построение маршрута с приемлемым качеством и вычислительной сложностью. После расчета маршрута БВС перемещается между центрами ячеек кластера в соответствии с определенной последовательностью.

На втором этапе, после прибытия БВС в центр конкретной ячейки, эта ячейка разбивается на подячейки для выполнения более детального облета. Разбиение осуществляется на сетку с шагом s' , где $s' < s$, чтобы обеспечить более высокую пространственную точность. Центры подячеек вычисляются по формуле:

$$x_{i',j'} = x_{min,i} + (i' + 0.5) * s', y_{i',j'} = y_{min,i} + (i' + 0.5) * s'$$

где s – размер исходной ячейки, а s' – размер подячейки.

После разбиения БВС строит маршрут для облета всех подячеек. Для этого применяется алгоритм возвратно-поступательного движения. БВС движется змейкой по рядам или столбцам подячеек, что обеспечивает полное покрытие с минимальными дополнительными маневрами.

4.2.5. Формирование итоговой тепловой карты

После завершения облета каждым БВС своего кластера данные, собранные в локальные матрицы $M_k(i, j)$, объединяются в глобальную тепловую карту $M_{global}(i, j)$, представляющую собой распределение мощности сигнала по всей территории. Процесс объединения начинается с инициализации глобальной матрицы M_{global} , размеры которой соответствуют всей исследуемой области. Для каждой ячейки (x, y) , измеренной БВС k , значение из его локальной матрицы $M_k(x, y)$ записывается в соответствующую ячейку глобальной матрицы.

Если ячейка (x, y) была измерена несколькими БВСами, значения сигналов $P_k(x, y)$, записанные каждым из них, усредняются. Итоговое значение мощности сигнала для такой ячейки вычисляется как среднее арифметическое всех измеренных значений:

$$M_{global}(x, y) = \frac{\sum M_k(x, y)}{|K(x, y)|}$$

где $K(x, y)$ – множество БВС, которые провели измерения в ячейке (x, y) , $|K(x, y)|$ – количество таких БВС. Этот подход позволяет исключить возможные аномалии и улучшить точность измерений на границах кластеров.

Если по каким-либо причинам ячейка (x, y) осталась без измерений, её значение интерполируется на основе данных из соседних ячеек. Для этого применяется метод билинейной интерполяции, при котором значение рассчитывается как взвешенное среднее от значений соседних точек:

$$M_{global}(x, y) = \frac{\sum w_{ij} * M_{global}(x, y)}{\sum w_{ij}}$$

где $N(x, y)$ – множество соседних ячеек, для которых известны измерения, а w_{ij} – веса, зависящие от расстояния между ячейкой (x, y) и её соседом (i, j) .

После объединения всех локальных данных в матрицу M_{global} значения могут быть нормализованы:

$$M_{global}(x, y) = \frac{M_{global}(x, y) - M_{min}}{M_{max} - M_{min}}$$

где M_{min} и M_{max} – минимальное и максимальное значения мощности сигнала на всей территории.

В отчете за 2023 год был разработан алгоритм построения тепловой карты распространения сигнала Wi-Fi с использованием одного БВС. За 2024 год был разработан полноценный метод, который позволяет использовать ранее полученные результаты с применением группы БВС и обеспечивает оптимальное распределение зон покрытия с помощью кластеризации K-means, точное и полное покрытие территорий благодаря двухуровневой стратегии маршрутов, а также повышенную точность карты за счет усреднения данных на границах кластеров и интерполяции пропущенных точек.

4.3. Метод идентификации датчиков при взаимодействии с БВС

Предлагается использовать фрактальный AgUco-маркер, состоящий из вложенных квадратных маркеров с уникальной битовой идентификацией для точного определения позы. Его обнаружение включает сегментацию изображения, фильтрацию контуров и коррекцию перспективы. Калибровка камеры выполняется с использованием шахматного паттерна и алгоритма Левенберга-Марквардта для минимизации ошибок.

4.3.1. Подробное описание

Фрактальный маркер F должен определяться как набор из m квадратных маркеров (f_1, f_2, \dots, f_m) , размещенных один в другом рекурсивным образом. Каждый квадратный маркер f^i должен состоять из внешней черной рамки, области, зарезервированной для битовой идентификации, и белой области, окружающей внутренний маркер f^{i+1} . Каждый маркер f^i может иметь различное количество бит для области идентификации в зависимости от длины стороны области идентификации $n(f^i)$. Чем больше внутренних маркеров используется, тем больше должен быть рабочий диапазон фрактального маркера. Внутренние биты фрактального маркера должны генерироваться случайным образом с использованием распределения Бернулли.

4.3.2. Генерация маркера

Сгенерированный маркер должен считаться допустимым, если расстояние Хэмминга в его трех возможных вращениях больше нуля:

$$H\left(\text{bits}(f^i), \text{bits}\left(R_j(f^i)\right)\right) > 0 \forall j \in \left\{\frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}\right\}$$

где H – расстояние Хэмминга между двумя маркерами; R_j – функция, которая формирует поворот матрицы маркера f^i по часовой стрелке на j градусов.

Если условие не выполняется, то маркер f^i должен считаться недопустимым, и процесс случайного выбора битов должен повторяться до тех пор, пока не будет получен допустимый маркер f^i .

Фрактальный маркер F считается допустимым, когда все внутренние маркеры f^i допустимы. Используется конфигурация с пятью уровнями вложений: $n(f^1) = 11$; $n(f^2) = 13$; $n(f^3) = 12$; $n(f^4) = 10$ и $n(f^5) = 6$.



Рисунок 71 – Паттерн фрактального маркера

4.3.3. Детектирование маркера

Первый шаг процесса должен заключаться в попытке обнаружить маркеры f^i , которые составляют фрактальный маркер. Для этого должны выполняться следующие шаги: сегментация изображения, извлечение и фильтрация контуров, извлечение кода маркера. Фрактальный маркер должен состоять из нескольких квадратных маркеров с черной рамкой, окруженной белым пространством, что облегчает его обнаружение.

Метод обнаружения должен использовать локальный адаптивный порог, который обеспечивает надежное обнаружение адаптивное к различным условиям освещения. Извлечение контуров каждого внутреннего маркера должно выполняться с помощью алгоритма Сузуки и Абе. Этот алгоритм предоставляет набор контуров, многие из которых соответствуют нежелательным объектам. Процесс фильтрации должен осуществляться с использованием алгоритма Дугласа-Пекера, который выбирает только те контуры, которые наиболее подобны многоугольникам.

Следующий шаг должен заключаться в анализе внутренней области оставшихся контуров для определения, какие из них являются допустимыми маркерами. На первом этапе должна удаляться перспективная проекция (используя гомографическое преобразование), а затем должен примениться метод для пороговой обработки. Полученное изображение должно делиться на регулярную сетку, где каждый элемент получает значение 0 или 1 в зависимости от значений большинства пикселей. Должно быть сравнение кандидата на маркер с набором допустимых маркеров. Должно проводиться четыре возможных сравнения каждого кандидата, соответствующие четырем возможным ориентациям. В результате этого процесса должен получиться начальный набор углов внешних маркеров S' , принадлежащих внешним черным границам. Из них должно быть получено начальное местоположение маркера.

После получения начальной оценки положения маркера из уменьшенного набора углов S' , должны быть найдены все видимые углы и использовать их для дальнейшего

уточнения положения. Сначала все маркеры в $C(F)$ должны проецироваться на изображение камеры. Затем их местоположение должно уточниться до субпиксельной точности.

Обозначим $I = (I_0, I_1, \dots, I_p)$ как пирамиду изображений, где I_0 – это оригинальное изображение, которое масштабируется с коэффициентом два. Для каждого маркера должно выбираться начальное изображение в пирамиде $I_j \in I$ для уточнения следующим образом:

$$I_j = \operatorname{argmin}_{I_i \in I} |P(f) - \tau(f)|$$

где $P(f)$ – проецируемая площадь маркера f на изображении I_i ; $\tau(f)$ – оптимальная длина маркера для уточнения. Для уточнения углов должно быть минимум s_{min} пикселей между ними. Таким образом, $\tau(f) = s_{min} \times s(f)$.

Для учета возможностей перекрытия должны анализироваться несколько условий для каждого угла во время процесса уточнения. Должно анализироваться, имеет ли область вокруг угла низкий контраст. Поскольку процесс происходит с черно-белыми маркерами, угол должен быть в области с высоким контрастом. Если разница между самыми яркими и самыми темными пикселями в области угла меньше τ_c , угол должен считаться перекрытым и должен исключиться из процесса.

Должны исключиться углы, которые испытывают большие смещения в процессе уточнения. Обозначим местоположение маркера $\theta \in R^6$ тремя компонентами вращения $r = (r_x, r_y, r_z)$ и трансляции $t = (t_x, t_y, t_z)$: $\theta = (r, t), r, t \in R^3$. Точка $p \in R^3$ должна проецироваться на плоскость камеры в пиксель $u \in R^2$.

Внутренние параметры камеры должны быть известны. Проекция должна быть представлена функцией:

$$u = \Psi(\delta, \theta, p),$$

где $\delta = (f_x, f_y, c_x, c_y, k_1, \dots, k_n)$ обозначает внутренние параметры камеры, включающие фокусные расстояния (f_x, f_y) , оптический центр (c_x, c_y) и параметры искажения (k_1, \dots, k_n) .

Оценка местоположения маркера должна являться задачей минимизации ошибки повторной проекции наблюдаемых углов маркера:

$$\theta = \operatorname{argmin}_{\theta} \sum (\Psi(\delta, \theta, p) - O(p))^2$$

где $O(p) \in R^2$ – это наблюдаемое положение угла $p \in D$ на изображении камеры. Набор углов D может содержать любые углы. Когда все точки лежат в одной плоскости, то задача должна быть решена с помощью таких методов, как оценка позы на основе бесконечно малой плоскости (IPPE). Внутренние параметры камеры должны быть определены по результатам калибровки камеры.

4.3.4. Калибровка камеры

Для калибровки камеры используется изображение с паттерном шахматной доски, напечатанное на листе бумаги формата А4. Размер квадратов на шахматной доске должен быть известен и одинаковым для всех клеток, чтобы обеспечить точность вычислений. Лист с изображением должен быть прикреплён к твёрдой и плоской поверхности, чтобы избежать деформаций, которые могут повлиять на результаты калибровки.

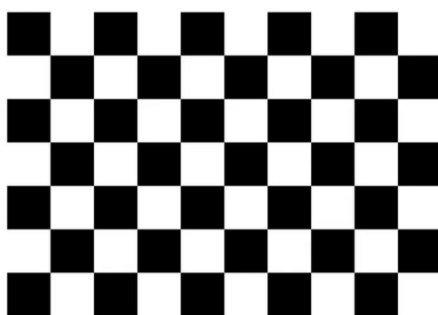


Рисунок 72 – Паттерн шахматной доски

Процесс калибровки предполагает создание не менее 20 изображений, снятых на калибруемой камере. Эти изображения должны быть сделаны с разных расстояний и под разными углами, чтобы обеспечить разнообразие данных, необходимых для точной оценки параметров камеры.

На первом этапе калибровки вычисляются начальные внутренние параметры камеры, такие как фокусное расстояние и координаты оптического центра. Эти параметры могут быть либо определены непосредственно из изображения, либо считаны из заранее известных входных данных. В начальных условиях коэффициенты искажения объектива устанавливаются равными нулю. Также оценивается начальная поза камеры относительно шахматной доски, при этом делается предположение, что внутренние параметры камеры уже известны.

Для уточнения параметров камеры используется глобальный алгоритм оптимизации Левенберга-Марквардта. Этот метод минимизирует ошибку перепроецирования, которая представляет собой сумму квадратов расстояний между наблюдаемыми характерными точками шахматной доски и их теоретическими проекциями. Проекции рассчитываются на основе текущих оценок параметров камеры и её позы.

Предложен метод идентификации датчиков при взаимодействии с БВС, отличающийся использованием фрактальных ArUco-маркеров с уникальной вложенной структурой, что позволяет значительно повысить точность определения позы и обеспечить устойчивое детектирование в сложных условиях.

4.4. Метод оптимизации траектории перемещения БВС для исключения повторного тестирования датчиков

Данный метод оптимизирует траектории перемещения БВС, исключая повторное тестирование датчиков. На первом этапе формируется битовая маска доступности на основе карты высот, которая используется для обнуления недоступных участков на тепловой карте. Затем определяются региональные максимумы тепловой карты с учётом уровня шума и минимальной площади областей. Процедуры объединения и фильтрации максимумов позволяют уточнить цели.

Для определения региональных максимумов на тепловой карте создаётся битовая маска $M(x, y)$, которая определяет региональные максимумы. Региональные максимумы представляют собой связные компоненты пикселей с постоянным значением интенсивности, окружённые пикселями с более низким значением. Формально, пиксель (x, y) считается принадлежащим региональному максимуму, если выполнено условие:

$$I(x, y) \geq I(x', y'), \forall (x', y') \in N(x, y)$$

где $I(x, y)$ – интенсивность пикселя в точке (x, y) , а $N(x, y)$ – множество соседних пикселей (например, в 8-связной окрестности).

Для нахождения региональных максимумов используется алгоритм морфологической трансформации для чёрно-белых изображений, описанный в (Soille, 1999).

Первый этап алгоритма заключается в нахождении локальных максимумов с помощью обработки изображения, используя фильтр максимума в окрестности 3×3 . После применения фильтра максимума F_{max} , определяется промежуточное изображение $I_{max}(x, y)$:

$$I_{max}(x, y) = \max_{(x', y') \in N(x, y)} I(x', y')$$

Затем сравнивается исходное изображение $I(x, y)$ с $I_{max}(x, y)$. Локальные максимумы определяются как пиксели, для которых:

$$I(x, y) = I_{max}(x, y)$$

Множество таких точек образует маску локальных максимумов $M(x, y)$. Поскольку локальных максимумов обычно слишком много, необходимо их объединить и сократить, используя определённую метрику – устойчивость к шуму. Если максимумы находятся близко друг к другу, то они объединяются или удаляются в соответствии со следующим принципом.

Начиная с самой яркой максимальной точки и по мере уменьшения интенсивности, выполняются следующие шаги:

1. Обозначение уровней шума: пусть δ — допустимый уровень шума. Для каждого максимума $I_{max}(x_m, y_m)$, соседние пиксели (x, y) , для которых:

$$I_{max}(x, y) \geq I(x_m, y_m) - \delta$$

сканируются и добавляются в область текущего максимума.

2. Объединение соседних пиков: если соседний пиксель (x', y') имеет значение $I(x', y') > I(x_m, y_m)$, то текущий максимум игнорируется.

3. Формирование областей: для всех пикселей (x, y) из области, удовлетворяющих условию $I(x_m, y_m) - \delta \leq I(x, y) \leq I(x_m, y_m)$, выполняется метка как принадлежащих к региону максимума.

4. Оптимальный пик: в пределах одной области выбирается пиксель, минимизирующий расстояние до центра области, чтобы считать его окончательным максимумом:

$$(x^*, y^*) = \operatorname{argmin}_{(x,y)} \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2},$$

где (x_c, y_c) – координаты центра области.

5. Исключение шумовых пиков: если площадь области, связанной с максимумом, меньше заданного порога A_{min} , максимум считается шумовым и удаляется.

В результате, все пиксели, соответствующие найденным максимумам, образуют битовую маску (x_c, y_c) , где $M_{final}(x, y) = 1$, если пиксель принадлежит финальному региону максимума, и $M_{final}(x, y) = 0$ в противном случае.

Когда битовая маска накладывается на координаты, то получается следующая картина

В отчёте за 2023 год был представлен подход, включающий использование битовой маски для исключения недоступных участков и определение целей БВС на основе анализа региональных максимумов тепловой карты. За текущий отчётный период метод был усовершенствован за счёт математической формализации алгоритма, введения параметров для учёта шума и минимального размера областей, а также оптимизации процедур объединения и фильтрации максимумов. Эти изменения позволили повысить эффективность планирования движения и исключить повторное тестирование.

4.5. Метод определения оптимального положения мультироторного БВС в воздушном пространстве для сбора данных с наземных датчиков

Предлагаемый метод базируется на воксельной карте зоны, в которой предполагается осуществлять сбор данных на БВС с наземных датчиков. Путём анализа данной карты определяется оптимальное положение БВС в воздухе. Критериями оптимальности в данном случае является мощность сигнала и среднеквадратичное отклонение мощности сигнала.

4.5.1. Построение и градуировка рассматриваемой области

Описываемый метод базируется на следующих критериях:

- Максимизация мощности принятого сигнала от каждого датчика.
- Минимизация отклонения по мощности принятого сигнала от среднего значения для каждого датчика.

Исходя из данных критериев, для определения оптимального положения БВС следует найти сектор в пространстве, внутри которого будет достигаться максимизация среднего значения для мощностей принимаемого сигнала $P_{\text{прм.ср}}$ при минимизации среднеквадратичного отклонения от среднего значения $RMSE_{P,\text{ср}}$.

Для реализации данной задачи следует выбрать область на плоскости между передатчиками. Для этого следует ориентировать её по сторонам света, принимая крайние северные/южные/западные/восточные датчики в качестве граничных точек, по которым следует построить прямоугольную область как представ.

Далее на основе получившегося прямоугольника необходимо построить параллелепипед с длиной сторон по оси Z равной оптимальной высоте для сбора данных с наземных датчиков H_{max} .

Следует градуировать длины рёбер параллелепипеда, поделив каждую ось x - y - z на сектора, размер которых соответствует точности измерения положения. При делении округление следует проводить в большую сторону до ближайшего целого числа. Таким образом можно описать расчёт длин рёбер, выраженных в количестве секторов:

$$N_x = \lceil \frac{l_x}{s_x} \rceil, N_y = \lceil \frac{l_y}{s_y} \rceil, N_z = \lceil \frac{l_z}{s_z} \rceil,$$

где N_x, N_y, N_z – количество делений на рёбрах, параллельных координатным осям x, y, z соответственно; l_x, l_y, l_z – длины рёбер, параллельных координатным осям x, y, z соответственно; s_x, s_y, s_z – точность измерения положения вдоль координатных осей x, y, z соответственно; $\lceil \cdot \rceil$ обозначает округление вверх до ближайшего целого числа;

Далее следует поделить рассматриваемую область на трёхмерные сектора, соединив противоположащие деления на ребрах прямыми. Итоговым результатом всех построений будет являться поделенная на трехмерные ячейки область.

Данное пространство можно представить в качестве трехмерной матрицы, где отдельный сектор имеет 3 координаты, представленные в виде номера ячейки относительно начала координат по x, y, z :

$$S_{num} = [x, y, z]$$

где S_{num} – это местоположение сектора; $A[x, y, z]$ – соответствующие этому положению координаты матрицы.

4.5.2. Метод поиска оптимального положения.

Для работы метода в рассматриваемой системе необходимо соблюсти следующие условия:

1. Необходимо заранее знать реальную размерность рассматриваемых секторов и области в целом. А именно длины всех сторон области, длины всех сторон для сектора.
2. Необходимо знать мощность передатчика $P_{прм}$, коэффициенты усиления антенны передатчика $G_{прд}$ и приёмника $G_{прм}$, длину волны принимаемого радиосигнала λ , частоту принимаемого радиосигнала f (методы их определения описаны в предыдущем разделе).
3. Выбрать определённые углы секторов, для проведения от данных точек последующих измерений расстояний по теореме Пифагора. Выбирать следует исходя из желательной минимизации статической ошибки при определении расстояний от датчиков до БВС.

Рассматриваемый метод состоит из следующих этапов:

1. Используя алгоритм перебора, программа должна пройти по всем включенным в пространство выше линии H_{min} секторам (рисунок 72). Во время прохода по данным элементам алгоритм должен выполнять следующие действия:

- 1.1. Определять по теореме Пифагора расстояние от угла сектора с предполагаемым БВС до угла сектора с датчиком, используя данные о размерностях областей и секторов. Если один из катетов представляет собой диагональ, проходящую через ряд секторов на плоскости, то его длина рассчитывается отдельно как длина гипотенузы в прямоугольном треугольнике, образованном ей и рёбрами ближайших секторов, принадлежащих той же плоскости.
- 1.2. От полученного расстояния проводить расчёт мощности $P_{\text{прм}}$ принимаемого сигнала от каждого датчика согласно следующему выражению:

$$P_{\text{прм}}(\text{дБм}) = P_{\text{прд}}(\text{дБм}) + G_{\text{прд}}(\text{дБ}) + G_{\text{прм}}(\text{дБ}) + 20\lg(\lambda) - 20\lg(4\pi) - 20\lg(r).$$

где $P_{\text{прм}}(\text{дБм})$ – мощность передатчика, выраженная в дБм. Рассчитывается она от мощности передатчика в ваттах по выражению:

$$P_{\text{прд}}(\text{дБм}) = 10\lg(P_{\text{прд}}(\text{Вт})/0.001).$$

где $G_{\text{прд}}$ и $G_{\text{прм}}$ – коэффициенты усиления антенны передатчика и приёмника; λ – длина волны радиосигнала, выраженная в метрах

- 1.3. Определять среднее значение мощностей принимаемых сигналов $P_{\text{прм.ср}}$.
- 1.4. Присваивать выбранному сектору ранг согласно среднему значению мощности. В данном случае сектора с большим средним должны иметь больший ранг. Максимальное значение ранга – количество всех секторов в рассматриваемой области.
- 1.5. Определять среднеквадратичное отклонение для мощностей принимаемых сигналов согласно следующему выражению:

$$RMSE_{P,\text{ср}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (P_n - P_{\text{прм.ср}})^2},$$

где N – общее количество датчиков; P_n – мощность сигнала, принятого с датчика.

- 1.6. Присваивать выбранному сектору ранг согласно среднеквадратичному отклонению. В данном случае сектора с меньшим $RMSE_{P,\text{ср}}$ должны иметь

больший ранг. Максимальное значение ранга – количество всех секторов в рассматриваемой области.

1.7. Присвоить выбранному сектору общий ранг путём суммирования значений в рангах для среднего и среднеквадратичного отклонения.

1.8. Корректировать положения остальных секторов в ранговой таблице с каждой новой итерацией.

2. После завершения обхода секторов метод должен определить элемент с наибольшим общим рангом, а также сформировать ранговую таблицу.

Во многих исследовательских работах рассматриваемая в данной разделе оптимизационная задача решается эмпирическим путём. Рассмотренный в данной же работе метод базируется на модели распространения сигнала и подразумевает под собой сугубо теоретический подход, что уменьшает в свою очередь временные затраты при его применении. Метод позволяет решать узконаправленную задачу определения оптимальной точки зависания ограничиться использованием программных средств, не задействуя технические средства (БВС, датчики) для формирования базы знаний.

Также следует подчеркнуть, что подход на основе воксельной градуировки трехмерного пространства является новым решением в задаче формирования тепловой карты, так как зачастую, как например описано в работе, рассматривается только двумерная область. Анализ же тепловой карты, основанный на системе рангов, позволяет учитывать несколько переменных значений для решения оптимизационной задачи, что тоже имеет смысл определить как новизну предлагаемой методики, так как обычно анализ области производится по одному критерию.

5. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ, НАПРАВЛЕННЫЕ НА РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СЕГМЕНТАЦИИ ИССЛЕДУЕМОЙ МЕСТНОСТИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ЗОН, ПРИГОДНЫХ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

Выполнение сегментации поверхностей, пригодных для установки сейсмических модулей становится особенно актуальным в условиях недостатка или не актуальности другой информации (например, данных ГИС) о подстилающих поверхностях на местности. При этом, ввиду широкой доступности спутниковых снимков в широком диапазоне электромагнитного излучения (мультиспектральных снимков), включая видимое, инфракрасное, ультрафиолетовое и т.д., целесообразно использовать для сегментации именно их. Дополнительные полосы спектра электромагнитного излучения могут содержать дополнительную информацию, отсутствующую в видимом спектре, что в

конечном итоге может поспособствовать повышению эффективности сегментации подстилающей поверхности.

В рамках настоящей работы была разработана модель глубокого обучения, сегментации поверхностей, пригодных для установки сейсмических модулей на основе обработки мультиспектральных спутниковых снимков с шириной спектра от 2190 до 443 нм (всего 13 спектральных каналов). Разработанная модель отличается применением подхода переноса обучения, в ходе которого для сегментации используется нейронная сеть, предварительно обученная на большой репрезентативной базе изображений, а также использованием специализированного блока адаптации мультиспектрального изображения к нейронной сети, обученной на трехканальных RGB изображениях. Разработанная модель приведена на рисунке 73.

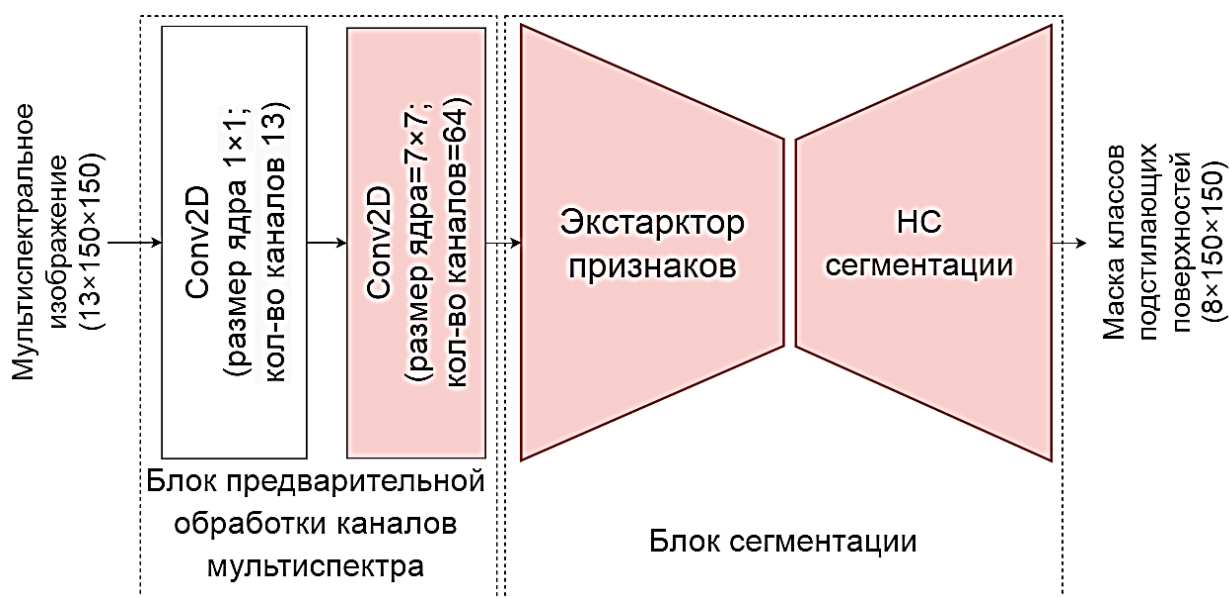


Рисунок 73 – Модель глубокого обучения, выполняющая сегментацию зон подстилающих поверхностей, пригодных для установки сейсмических модулей

Мультиспектральное изображение поступает на вход блока предварительной обработки. Этот блок состоит из одного сверточного слоя с размером фильтра, равным 1×1 . Фильтры такого размера служат для обработки одного и того же пикселя различных каналов. Результатом этого слоя является новое изображение, где выполнена агрегация наиболее значимой информации, содержащейся в одном и том же пикселе разных каналов. Далее следует адаптированный под мультиспектральные данные первый слой предварительно обученной сегментационной нейросетевой модели. Выделение этого слоя, принадлежащего уже экстрактору признаков сегментационной нейронной сети, в блок предварительной обработки каналов мультиспектра обусловлено тем, что данный слой по своей сути выполняет адаптацию каналов мультиспектра к весам остальной сегментационной нейронной сети. Сама адаптация выполняется посредством модификации первого слоя

нейронной сети-экстрактора признаков таким образом, чтобы количество входных каналов этого слоя соответствовало количеству каналов мультиспектрального изображения. При этом, чтобы было возможным использовать веса первого слоя, отражающие низкоуровневые признаки на RGB изображениях, на которых обучалась нейронная сеть-экстрактор признаков, выполняется усреднение весов, соответствующих каналам изображения:

$$\overline{w_{i,j}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N w_{i,j}^k$$

где i и j – индексы строк и столбцов, k – индекс канала тензора весов входного сверточного слоя нейронной сети-экстрактора признаков, N – количество каналов сверточного слоя. Полученные усредненные веса дублируются для каждого отдельного канала мультиспектрального изображения. В результате данной операции дескрипторы низкоуровневых признаков изображений, полученные на основе обучения на большой репрезентативной базе изображений, возможно использовать для обработки не только трехканальных RGB изображений, но и многоканальных (13 каналов в нашем случае) мультиспектральных изображений спутниковых снимков подстилающих поверхностей.

Далее выполняется обработка выделенных карт признаков специализированной нейронной сетью, выполняющей итоговую сегментацию классов подстилающих поверхностей, пригодных для установки сейсмических модулей, формируя выходную маску, размер которой равен размеру входного мультиспектрального изображения. В рамках данной модели используется подход переноса обучения: для итоговой сегментации берется нейронная сеть, которая была предварительно обучена на большой репрезентативной базе изображений. Одной из основных особенностей модели является возможность использования широкого спектра различных нейросетевых моделей сегментации, что обеспечивается адаптацией мультиспектрального изображения в блоке предварительной обработки. Кроме того, предлагаемая модель позволит не вносить существенных модификаций в архитектуру сегментационной нейронной сети, что в итоге позволяет лучше использовать предварительно обученные нейронные сети, у которых в ходе обучения выстраиваются связи между последовательными слоями.

5.1. Экспериментальное исследование

В рамках настоящей работы было выполнено экспериментальное исследование предлагаемой модели в задаче семантической сегментации поверхностей, пригодных для

установки сейсмических модулей. В ходе эксперимента было выполнено сравнение эффективности сегментации классов подстилающих поверхностей посредством разработанной модели нейронной сети, выполняющей обработку мультиспектральных изображений (рисунок 1), с моделями нейронных сетей, которые обрабатывают RGB изображения. В качестве блока сегментации, изображенного на рисунке 1, были рассмотрены несколько распространенных сверточных нейросетевых архитектур: FCN (Fully Convolutional Network) [Long J., Shelhamer E., Darrell T. Fully convolutional networks for semantic segmentation //Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2015. – С. 3431-3440.], DeepLabV3 [Chen L. C. Rethinking atrous convolution for semantic image segmentation //arXiv preprint arXiv:1706.05587. – 2017.], UNET [Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation //Medical image computing and computer-assisted intervention–MICCAI 2015: 18th international conference, Munich, Germany, October 5-9, 2015, proceedings, part III 18. – Springer International Publishing, 2015. – С. 234-241.] и UNET++ [Zhou Z. et al. Unet++: A nested u-net architecture for medical image segmentation //Deep Learning in Medical Image Analysis and Multimodal Learning for Clinical Decision Support: 4th International Workshop, DLMIA 2018, and 8th International Workshop, ML-CDS 2018, Held in Conjunction with MICCAI 2018, Granada, Spain, September 20, 2018, Proceedings 4. – Springer International Publishing, 2018. – С. 3-11.]. В качестве экстрактора признаков во всех рассматриваемых моделях была использована нейронная сеть ResNet с 50 слоями [He K. et al. Deep residual learning for image recognition //Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2016. – С. 770-778.], предварительно обученной на репрезентативной базе изображений ImageNet [Deng J. et al. Imagenet: A large-scale hierarchical image database //2009 IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – Ieee, 2009. – С. 248-255.] задаче классификации визуальных объектов. Нейросетевые модели, выполняющие сегментацию на основании обработки RGB изображений, отличаются от разработанной мультиспектральной модели отсутствием блока предварительной обработки каналов мультиспектрального изображения.

Обучение выполнялось базе данных спутниковых снимков, размеченной специфической задаче поиска подходящих поверхностей для установки сейсмических модулей [М.У. Uzdiaev, М.А. Astapova, А.Л. Ronzhin, А.И. Saveliev, V.М. Agafonov, G.N. Erokhin, V.A. Nenashev A methodology for automated labelling a geospatial image dataset of applicable locations for installing a wireless nodal seismic system. Computer Optics 20XX; XX(X): XXX-YYY. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-<article ID> (в печати)]. Отличительной особенностью этой базы данных является методика классификации поверхностей, в основе

которой лежит онтологическая модель подстилающих поверхностей [Астапова М.А., Уздяев М.Ю., Агафонов, Брыксин. Онтологоориентированная методика зонирования местности и размещения сейсмических модулей робототехническими средствами //Труды 34й Международной научно-технической конференции «Экстремальная Робототехника», 23-24 ноября 2023 г. – Санкт-Петербург: Изд-во: ЦНИИ РТК, 2023. – С. 282-289. DOI: 10.31776/ConfER.34.2023], отражающая свойства пригодности поверхностей для установки сейсмических модулей. В онтологической модели классы поверхностей и свойства пригодности были выведены на основании обобщения мнений экспертов. В результате был получен следующий перечень классов:

1. Пригодные для установки поверхности:
 - Мелкая поросль (просеки, кустарники);
 - Грунт (песок, земля, скальные поверхности);
 - Болота (торфяники, топи);
 - Лес.
2. Не пригодные для установки поверхности:
 - Застройка (промышленная, городская, сельская);
 - Сельскохозяйственные угодья (поля, засеянные различными культурами, луга для выпаса скота);
 - Транспортная инфраструктура (грунтовые, асфальтированные дороги, железная дорога);
 - Водные поверхности.

Другой важной особенностью этой базы данных является автоматизированный характер разметки, в ходе которой информация об участках подстилающей поверхности (векторная подложка и типы поверхности) бралась из открытой базы векторных данных OpenStreetMap [<https://www.openstreetmap.org>] При этом, в ходе разметки, классы поверхностей векторной подложки OpenStreetMap отображались в систему классов пригодных поверхностей для установки сейсмических модулей. Сама выборка содержит мультиспектральные изображения (13 спектральных каналов) с шириной спектра от 2190 нм до 443 нм из базы данных Sentinel 2 L2A [<https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>] с пространственным разрешением от 10 до 60 м/пиксель.

Для составления обучающей выборки автоматизированная разметка части снимков была подвергнута дополнительной верификации, в ходе которой было выполнено устранение ошибок и неточностей автоматизированной разметки: пересечений классов, принадлежащих одной и той же поверхности, заполнение пропусков в разметке, коррекция неправильно присвоенных классов поверхностям, коррекция координат областей

векторной подложки. В результате были отобраны 539 изображений, размером 150×150 пикселей. Статистика данной выборки приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Статистика выборки

	Пригодные для установки поверхности				Непригодные для установки поверхности			
	Мелкая поросль	Грунт	Болота	Лес	Застройка	Сельхоз. угодья	Транспорт	Вода
Количество пикселей	$1,4 \times 10^6$	$5,3 \times 10^4$	$8,3 \times 10^5$	$5,4 \times 10^6$	$1,6 \times 10^6$	$1,3 \times 10^6$	$2,9 \times 10^5$	$3,1 \times 10^5$
Доля общей площади, %	12,2	0,4	7,4	48,4	14,4	11,6	2,6	2,7

Выборка была предварительно рандомизирована и разбита на обучающую (392 изображения) и тестовую (147 изображений) части. Обучение выполнялось посредством модифицированного алгоритма градиентного спуска Adam [Kingma D. P., Ba J. Adam: A method for stochastic optimization //arXiv preprint arXiv:1412.6980. – 2014.]; в качестве функции потерь использовалась перекрестная энтропия:

$$L(\mathbf{y}, \hat{\mathbf{y}}) = - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K y_{ij} \log \hat{y}_{ij}$$

где y_{ij} – значение пикселя эталонной маски классов поверхностей, \hat{y}_{ij} – значение пикселя маски классов поверхностей, сгенерированного нейронной сетью, N – количество строк, K – количество столбцов изображения маски классов подстилающих поверхностей.

В качестве основной метрики оценки эффективности сегментации поверхностей было использовано отношение площади пересечения эталонной и сгенерированной нейронной сетью масок классов подстилающих поверхностей к площади их объединения (Intersection over Union – IoU):

$$IoU = \frac{|S_t \cap S_g|}{|S_t \cup S_g|} = \frac{TP}{TP + FP + FN}$$

где S_t – площадь эталонной маски, S_g – площадь маски, сгенерированной нейронной сетью, TP – количество истинноположительно распознанных пикселей поверхности, FP – количество ложноположительно распознанных пикселей поверхности, FN – количество

ложноотрицательно распознанных пикселей маски классов подстилающей поверхности на снимке. Результаты экспериментального исследования сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты экспериментального исследования нейросетевой модели сегментации пригодных поверхностей для установки сейсмических модулей

	FCN		DeepLab V3		UNET		UNET++	
	RGB	Мульти-спектр	RGB	Мульти-спектр	RGB	Мульти-спектр	RGB	Мульти-спектр
Средн.	0,486	0,495	0,478	0,487	0,481	0,487	0,477	0,496
Средн. пригодные поверхности	0,444	0,466	0,446	0,434	0,414	0,427	0,413	0,452
Средн. непригодные поверхности	0,528	0,524	0,510	0,540	0,549	0,548	0,541	0,540
Застройка	0,748	0,757	0,756	0,758	0,769	0,763	0,759	0,751
Грунт	0,199	0,353	0,220	0,210	0,221	0,206	0,196	0,200
Мелкая поросль	0,279	0,239	0,245	0,217	0,282	0,245	0,262	0,284
Болота	0,486	0,454	0,512	0,493	0,341	0,441	0,383	0,514
Лес	0,813	0,816	0,808	0,816	0,810	0,815	0,809	0,811
Сельхоз. угодья	0,592	0,547	0,553	0,593	0,596	0,581	0,595	0,588
Транспорт	0,142	0,131	0,115	0,146	0,172	0,182	0,187	0,171
Вода	0,629	0,664	0,617	0,664	0,658	0,665	0,622	0,649

5.2. Обсуждение результатов

Экспериментальное исследование показало, что лучших средних результатов сегментации поверхностей, пригодных для установки сейсмических модулей достигла предложенная нейросетевая модель обработки мультиспектральных данных, в которой сегментацию выполняет нейронная сеть архитектуры UNET++ (IoU=0.496). Кроме того, применение мультиспектра с предварительной обработкой для всех моделей обеспечивает лучшие средние результаты сегментации по всем классам по сравнению с результатами моделей, обрабатывающих RGB изображения подстилающих поверхностей. При сегментации пригодных и не пригодных поверхностей (объединение отдельных классов поверхностей в группы пригодных и не пригодных приведено в таблице 2) лучшие результаты для пригодных поверхностей (IoU=0.466) показала модель сегментации мультиспектральных снимков на основе архитектуры FCN. Однако, для не пригодных поверхностей лучшие результаты показала модель UNET, выполняющая обработку RGB изображений. При этом разница с результатами модели UNET, выполняющей мультиспектральную обработку, составила (0.001). Что касается результатов сегментации отдельных классов поверхностей, то ожидаемо, что лучшие результаты были достигнуты для наиболее распространенных классов в выборке (классы «лес», «застройка») как для

нейронных сетей, обрабатывающих RGB, так и для нейронных сетей мультиспектральной обработки. С другой стороны, наименее распространенные классы (классы «транспорт», «грунт») показали самые низкие результаты сегментации. Также следует отметить относительно высокие результаты сегментации класса «вода», который имеет не высокое распространение в выборке. Это может быть объяснено тем, что вода контрастирует относительно других поверхностей. Также следует отметить, что сегментация класса «сельскохозяйственные угодья» также показала относительно высокие результаты. Однако, относительно распространенный класс «мелкая поросль», включающая в себя кустарники, просеки, заросли показал низкие результаты сегментации. Это может быть обусловлено тем, что данный тип поверхностей с одной стороны близок к классу «сельскохозяйственные угодья», а с другой стороны – близостью к классу поверхности «лес». То же самое можно сказать и про класс «болота», который схож с классом «лес». В общем и целом, можно сделать вывод, что применение обработки мультиспектра позволяет в среднем увеличить эффективность сегментации классов пригодных поверхностей для установки сейсмических модулей. Однако, вместе с этим, при анализе результатов сегментации отдельных классов наблюдается снижение эффективности сегментации относительно нейронных сетей, выполняющих обработку RGB изображений.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о необходимости комбинирования рассмотренных моделей глубоких нейронных сетей для выполнения сегментации отдельных классов поверхностей: так для сегментации классов «грунт» и «лес» необходимо использовать модель FCN, выполняющую обработку мультиспектра. Для сегментации классов «застройка» и «сельскохозяйственные угодья» необходимо использовать UNET, выполняющую обработку RGB. Для сегментации классов «транспорт» и «вода» необходимо использовать UNET, выполняющую обработку мультиспектра. Для сегментации классов «мелкая поросль» и «болота» необходимо использовать модель UNET++, выполняющую обработку мультиспектра. Схема комбинирования нейросетевых моделей изображена на рисунке 74.

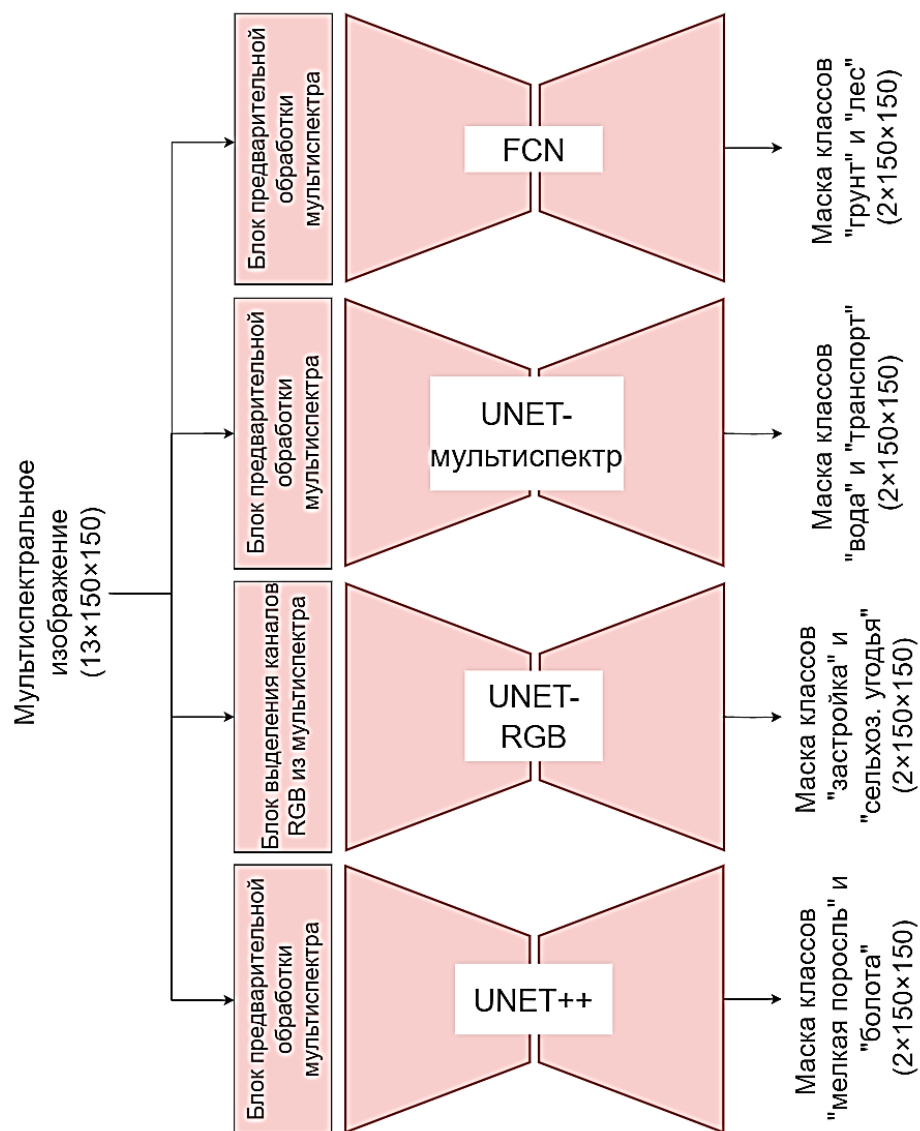


Рисунок 74 – Способ комбинирования различных нейросетевых моделей для сегментации поверхностей

При выполнении такого комбинирования достигаются лучшие результаты сегментации отдельных классов поверхностей, приведенные в таблице 3. Помимо этого, предложенная система комбинирования глубоких нейросетевых моделей позволяет достичь значений метрики IoU в 0,522 при сегментации всех классов поверхностей в среднем, что превосходит лучший результат, достигнутый моделью UNET++, обрабатывающей мультиспектр, и равный 0.496. IoU при сегментации комбинированной системой нейронных сетей пригодных для установки сейсмических модулей классов поверхностей составила 0,491, что превосходит лучший результат, достигнутый FCN, обрабатывающей мультиспектр, и равный 0,446. IoU при сегментации комбинированной системой нейронных сетей непригодных для установки сейсмических модулей классов поверхностей составила 0,553, что превосходит результат, достигнутый моделью UNET, выполняющей обработку RGB, равный 0,549.

6. РЕАЛИЗАЦИЯ ВОЗДУШНОЙ МАНИПУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ ДАТЧИКОВ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

В ходе выполнения проекта в 2024 году была произведена разработка обновлённого варианта конструкции устройства захвата и транспортировочного крепления датчика с учетом ограничений, выявленных в ходе проекта. Кроме того, были рассмотрены принципы построения аппаратного обеспечения системы управления устройством захвата и его интеграции с конструкцией и оборудованием БВС, описаны алгоритмы функционирования модуля управления захватом, а также проведен ряд экспериментов с целью подтверждения эффективности и работоспособности предлагаемых решений.

6.1 Разработка обновленной версии устройства захвата датчика сейсмической активности

В предварительном исследовании [Nguyen, V. Saveliev, A., Ronzhin A.: Mathematical Modelling of Control and Simultaneous Stabilization of 3-DOF Aerial Manipulation System. International Conference on Interactive Collaborative Robotics. Lecture Notes in Computer Science, Vol 12336. Springer, Cham. pp. 253-264. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60337-3_25] решалась задача проектирования захвата для БВС, в том числе выявлен ряд дополнительных требований к системе управления и оборудованию захвата. В отличие от стационарных манипуляторов, функционирующих на стабильной наземной поверхности, на трехкомпонентную воздушную манипуляционную систему: БВС, захват, объект – оказывает влияние гораздо большее число негативных факторов. Когда манипулятор захватывает объекты, изменяются динамические характеристики БВС, ввиду изменения его центра масс. Аналогичным образом, дополнительное влияние на динамику может оказывать контактная сила, возникающая при взаимодействии с объектами. Незначительные отклонения в позиционировании БВС при посадке над сейсмодатчиком неизбежны и должны компенсироваться за счёт конструктивных особенностей разрабатываемого захвата и специальных транспортировочных креплений сейсмодатчика. В случае невозможности посадки захват объекта производится в режиме зависания БВС и тогда неизбежны постоянные небольшие отклонения захвата в процессе стыковки с объектом и дополнительный расход энергии. Если же геометрические характеристики БВС с захватом позволяют приземлиться непосредственно над объектом, то после посадки осуществляется захват объекта. Неточности в позиционировании БВС могут привести к смещению объекта в горизонтальной плоскости в процессе захвата, что стоит учитывать, если объект имеет фиксирующие его опорные элементы.

Для воздушных систем критическим фактором является масса дополнительного оборудования, так как это сказывается на длительности нахождения БВС в воздухе. Поэтому при разработке конструкции захвата необходимо минимизировать массу устройства при сохранении заданных функциональных возможностей.

После захвата объекта увеличивается масса всей системы и ее парусность, что необходимо учитывать при движении, в том числе с точки зрения геометрической проходимости. Наиболее сложным этапом при транспортировке является посадка, что связано с вариативностью характеристик поверхности, на которую осуществляется приземление. В зависимости от задач может производиться сброс или установка объекта на поверхность. Точность сброса объекта зависит от точности позиционирования самого БВС, его высоты, скорости ветра и других характеристик. Предварительные экспериментальные исследования со сбросом сейсмодатчиков показали недостаточную точность [Ерашов А.А., Аникин Д.А., Черских Е.О., Савельев А.И., Брыскин В.М., Агафонов Б.М. Алгоритмы оценивания параметров неоднородной поверхности и управления беспилотным летательным аппаратом при установке сейсмического датчика // ТРУДЫ МФТИ. Труды Московского физико-технического института (национального исследовательского университета). 2023. Т. 15. № 4 (60). С. 14-30.], поэтому рассматривается вариант установки датчика с посадкой БВС на поверхность. При выборе допустимого места посадки из рассмотрения исключаются области, содержащие водные объекты, болота, лесные массивы, урбанизированные территории, проверяется отсутствие отдельных деревьев, кустарников, высокой травы и других негативных природно-хозяйственных объектов, затем оценивается наклон поверхности. При расстановке большого числа объектов анализ территории с определением возможных мест посадки производится предварительно на основе картографирования путем фотограмметрической обработки изображений аэрофотосъёмки или лазерного сканирования посредством лидаров.

Обобщенное описание принципа эксплуатации разрабатываемого устройства захвата следующее. Перед посадкой выполняется определение и идентификация сейсмодатчика. Если сейсмодатчик идентифицирован выполняется процесс посадки. В процессе посадки, на основе данных с камеры технического зрения осуществляется позиционирование БВС относительно сейсмодатчика [Dmitry Anikin, Artem Ryabinov, Anton Saveliev, and Alexander Semenov. 2023. Autonomous Landing Algorithm for UAV on a Mobile Robotic Platform with a Fractal Marker. In Interactive Collaborative Robotics: 8th International Conference, ICR 2023, Baku, Azerbaijan, October 25–29, 2023, Proceedings. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 357–368. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43111-1_32]. В случае успешной посадки сейсмодатчик попадает в зону функционирования устройства

захвата. После успешного захвата сейсмодатчик фиксируется захватным устройством, и БВС может покинуть зону забора датчика. Процесс разгрузки БВС в общем аналогичен забору груза, с той разницей, что в месте посадки устройство захвата раскрывается и БВС покидает место установки сейсмодатчика.

Помимо геометрических параметров объекта транспортировки, доступного места для установки на БВС и силы схвата при проектировании захватного устройства необходимо учитывать потенциальную точность посадки БВС над сейсмодатчиком и специфику земной поверхности, ее неровности, опорные характеристики. Габаритные размеры первого прототипа БВС для монтажа и демонтажа сейсмодатчика представлены на рисунке 75:

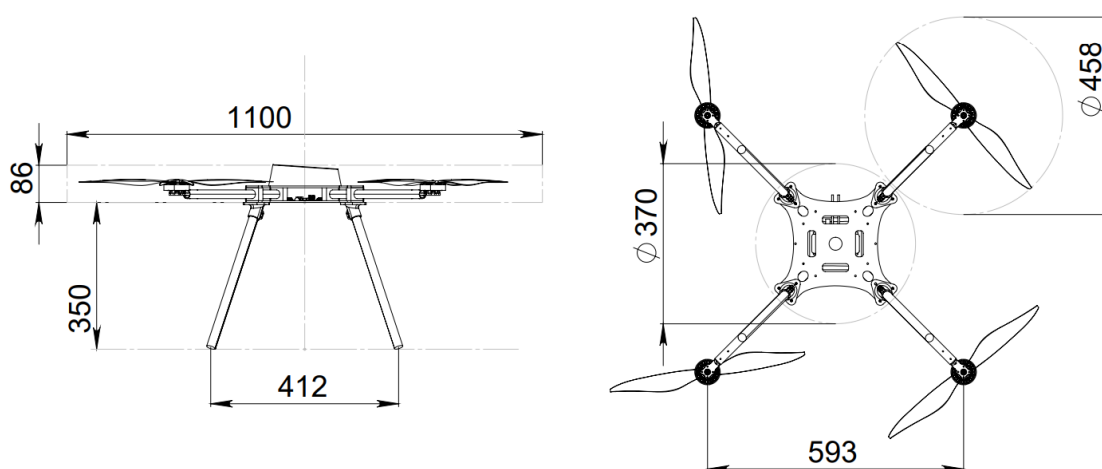


Рисунок 75 – Размеры БВС для установки устройства захвата сейсмодатчика

Анализ существующих решений в данной области, а также некоторые практические эксперименты показали, что наиболее подходящей для реализации устройства захвата является кинематическая схема с поступательным движением губок схвата, представленная на рисунке 76:

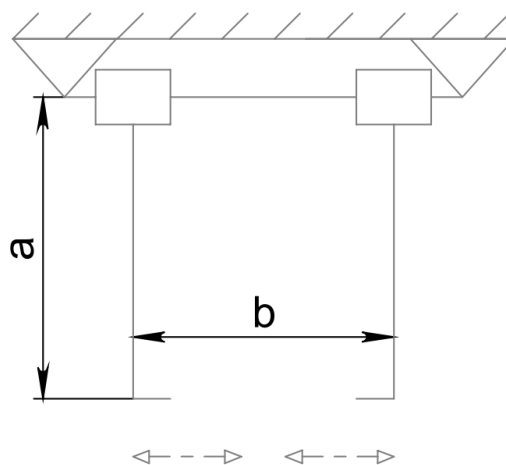


Рисунок 76 – Кинематическая схема захвата с поступательным движением губок схвата

Каждая губка представленного захвата перемещается ползуном, реализующим поступательное движение. Устройство захвата имеет два состояния: открытое и закрытое. Открытое состояние подразумевает максимально расстояние между губками схвата и используется при посадке БВС для демонтажа сейсмодатчика. После посадки БВС над датчиком устройство захвата активируется и меняет свое состояние. Максимальная высота захвата не изменяется при смене состояний и равна размеру a . Перемещение губок схвата ограничено исключительно размером линейной направляющей, длину которой в общем случае можно принять равной размеру b .

На рисунке 77 представлены модели устройства захвата, БВС и сейсмодатчика с разработанным транспортировочным креплением.



Рисунок 77 – Модель устройства захвата, датчика сейсмической активности и БВС

Исходя из результатов предыдущих исследований в области автономной посадки примем, что отклонение БВС в плоскости по осям X и Y в конечной точке посадки находится в пределах 50 мм от целевой точки. Следовательно, расположение датчика относительно центра БВС может находиться в окружности диаметром 100 мм. Захват и фиксация датчика (рисунок 78 – 4) осуществляется через переходную деталь (1) транспортировочного крепления, выполненную в форме цилиндра со скруглениями высотой 16 мм и диаметром 40 мм. Переходная деталь закреплена через цилиндрическую проставку (2) к пластине крепления датчика (3).

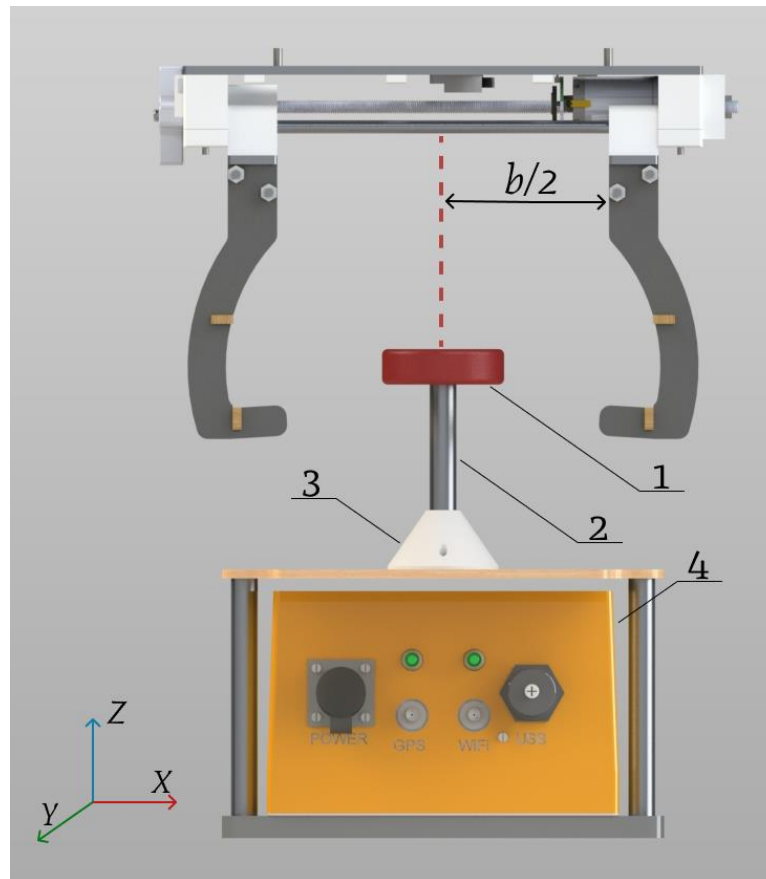


Рисунок 78 – Транспортное крепление датчика сейсмической активности и захват

Исходя из размеров переходной детали, точности посадки и геометрических размеров БВС были выбраны параметры устройства захвата, а именно ход ползунов ($b/2$), который составляет 70 мм и ширина губок схвата 260 мм. Таким образом отклонение центра сейсмодатчика от центра БВС по одной из осей может достигать 110 мм, что существенно увеличивает вероятность успешного захвата.

Встречное движение губок схвата реализовано с использованием двух передач винт-гайка. Вращение винтов осуществляет электропривод с двигателем постоянного тока. Устройство захвата имеет два датчика конечного положения определяющих состояние захвата. Управление и контроль состояния захвата осуществляет соответствующий модуль. Система управления (СУ) БВС в упрощенном виде с устройством захвата имеет следующую структуру (рисунок 79):

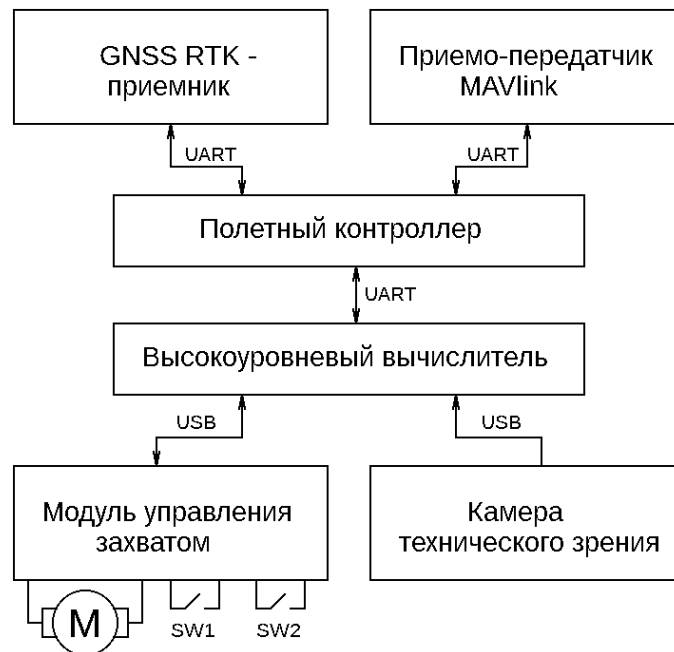


Рисунок 79 – Упрощенная структурная схема системы управления БВС с устройством захвата сейсмодатчика

Команды модулю управления захвата поступают от высокоуровневого вычислителя. Выполнение полетной миссии до момента посадки реализуется полетным контроллером, а высокая точность позиционирования над точкой установки сейсмодатчика, при глобальной навигации, достигается за счет использования технологии GNSS RTK (Global Navigation Satellite System with Real Time Kinematic). В процессе посадки управляющие команды для полетного контроллера БВС формирует высокоуровневый вычислитель на основе информации, полученной при обработке данных с камеры технического зрения [6]. После завершения процесса посадки высокоуровневый вычислитель передает управляющие команды модулю управления захватом. Общий алгоритм функционирования модуля управления захватом следующий (рисунок 80).

При наличии питания модуль управления захватом ожидает команды от высокоуровневого вычислителя БВС. В случае поступления команды «закрыть захват», модуль активирует вращение электропривода по часовой стрелке и циклично проверяет состояние датчика конечного положения закрытия (SW1) и значение тока привода – I . В случае если какие-то физические препятствия мешают закрытию захвата или сила, воздействующая на губки захвата, превысит допустимую, то значение тока привода превысит максимально допустимое I_{max} и привод будет остановлен, а вычислителю будет отправлено «Сообщение 2». Когда сигнал с SW1 примет значение равно 1, привод захвата будет остановлен, а вычислителю направлено сообщение об успешном закрытии захвата - «Сообщение 1». Алгоритм открытия захвата по команде от высокоуровневого вычислителя

аналогичен, с той разницей, что вращение привода захвата осуществляется против часовой стрелки, и проверяется состояние датчика конечного положения открытия (SW2).

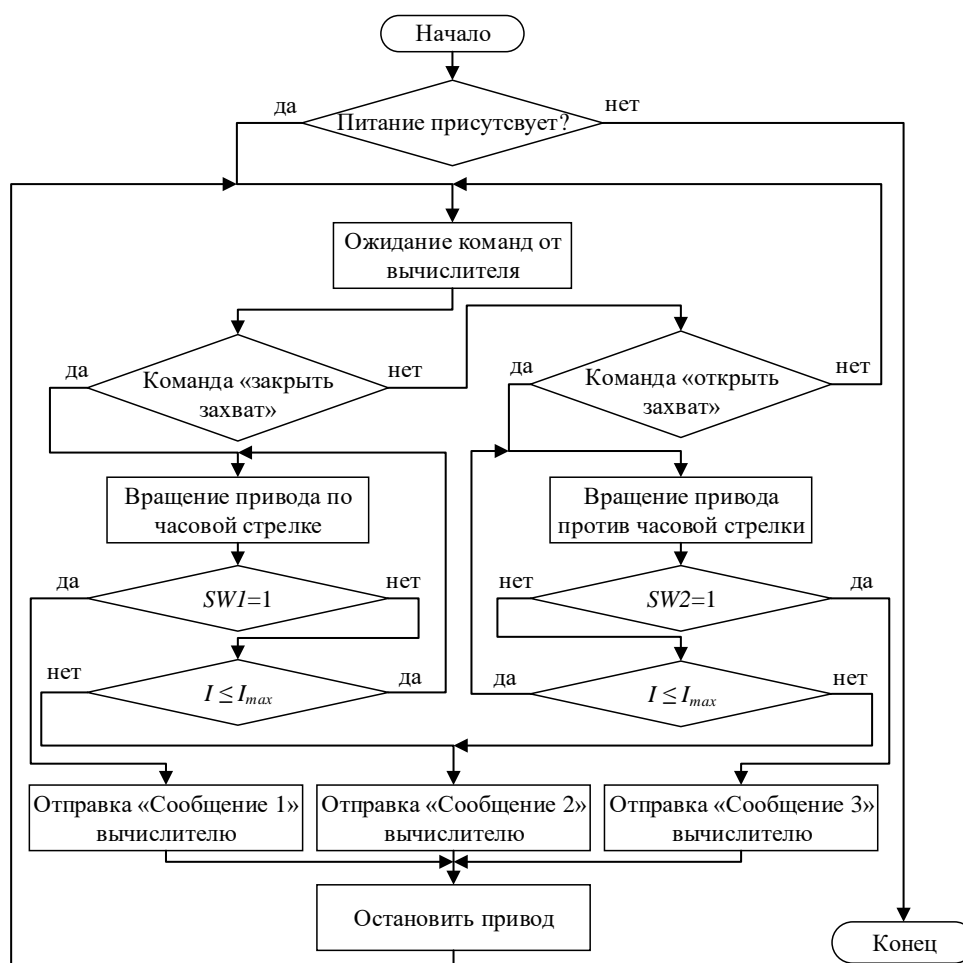


Рисунок 80 – Общий алгоритм функционирования модуля управления захватом

6.2 Результаты экспериментов

Представленная модель устройства захвата была реализована в виде прототипа и установлена на первый прототип БВС (рисунок 81). Масса прототипа устройства захвата составила 1020 г, а сейсмодатчика с транспортировочным креплением 2760 г.

Наиболее сложной с технической точки зрения задачей является сбор датчика сейсмической активности с места эксплуатации. При захвате датчика присутствуют отклонения от целевой точки при посадке, ввиду чего при работе устройства захвата может происходить взаимное перемещение датчика и БВС. Для подтверждения работоспособности и эффективности разработанных решений был проведен ряд экспериментов, в которых осуществлялся сбор датчика в автоматизированном режиме.



Рисунок 81 – БВС с устройством захвата и датчик сейсмической активности с транспортировочным креплением

Порядок проведения экспериментов был следующий. Исходным положением БВС была точка в пространстве над датчиком на высоте 5 м от подстилающей поверхности, на которой установлен датчик. Далее осуществлялась посадка в автоматизированном режиме. После окончания посадки захват переводится в закрытое состояние. Демонтаж датчика считается успешным если переходная деталь (рисунок 4 – 1) оказалась между губками устройства захвата. Результаты эксперимента сбора датчика сейсмической активности представлены в таблице 1.

Таблица 4 – Результаты эксперимента сбора датчика сейсмической активности без внешних воздействий на БВС

№	Смещение по оси X, мм	Смещение по оси Y, мм	Смещение по оси Z, мм	Захват датчика
1	-31	+62	+11	Да
2	+43	+16	+24	Да
3	+50	-95	-5	Нет
4	-27	-17	+10	Да
5	-32	+63	+8	Да
6	+22	-112	0	Да
7	+49	-100	-10	Нет
8	-29	+115	+3	Нет
9	-44	+19	-7	Да
10	-10	-70	+2	Да
11	+17	+88	+20	Да
12	-36	+22	0	Да
13	-47	-66	+4	Да
14	+30	-11	+12	Да
15	-13	+46	-2	Да

При отсутствии внешних воздействий в процессе посадки БВС сбор сейсмодатчика происходит успешно 80% случаев. Захват невозможен в том случае, если смещения БВС при посадке относительно сейсмодатчика превышают допустимые значения, которые закладывались при проектировании устройства захвата. В реальных условиях эксплуатации в этом случае необходимо повторить процесс посадки БВС заново.

Время смены состояния захвата - t без нагрузки составляет 8 с. Под сменой состояния подразумевается перемещения губок захвата из одного крайнего положения в другое. Если транспортировочное крепление датчика сейсмической активности смещено относительно центра захвата по оси X , при смене состояния захвата происходит взаимное перемещение датчика и БВС. В этом случае возрастает момент привода и снижается скорость линейного перемещения губок, что увеличивает время смены состояния захвата (рисунок 82).

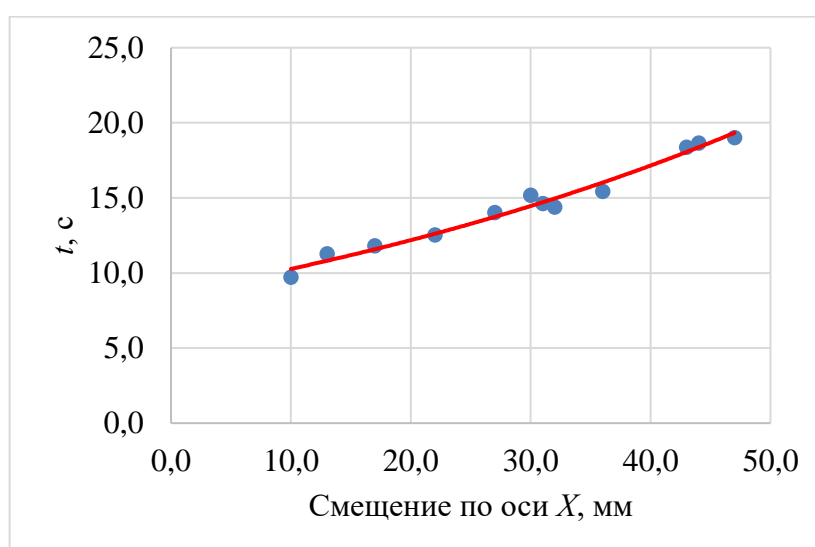


Рисунок 82 – Зависимость времени смены состояния захвата от смещения между БВС и транспортировочным креплением датчика

На рисунке 82 обозначены точки, через которые проведена аппроксимирующая кривая, показывающая зависимость времени смены состояния захвата от смещения по оси X от целевой точки при посадке. Смещения, для которых проведены замеры времени соответствуют представленным в таблице 4. Максимальное время захвата составило 19 с при смещении 47 мм.

Для эксперимента №6 (таблица 4) в котором захват датчика состоялся успешно, а смещение от целевой точки по оси X составляло 22 мм, получена зависимость тока электропривода от времени (рисунок 83), при смене состояния захвата.

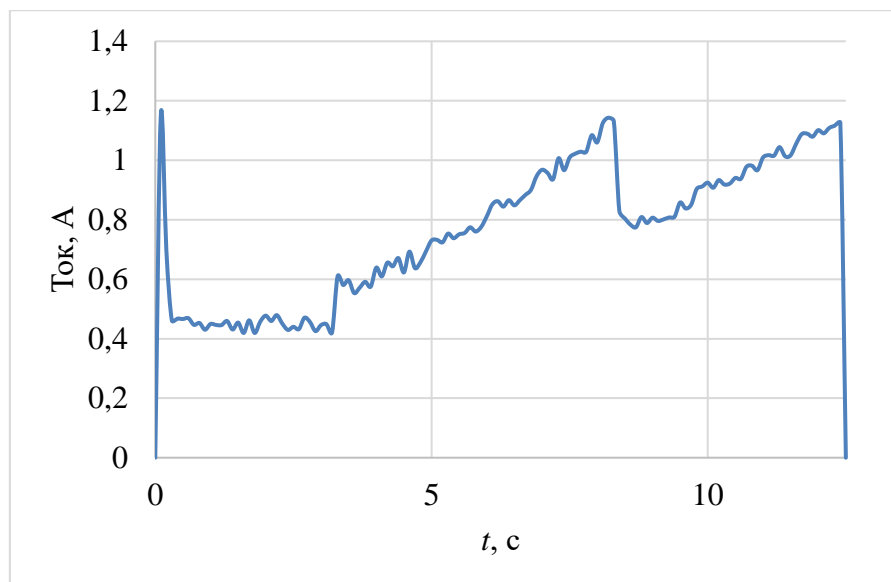


Рисунок 83 – Зависимость тока электропривода от времени при захвате датчика со смещением от центра БВС

Мощность привода захвата составляет 10 Вт, а максимальный ток потребления электропривода не превышает значения 1,2 А. Среднее значение тока холостого перемещения губок схвата составляет 0,45 А. В момент времени $t = 3,3$ с от начала процесса смены состояния захвата происходит касание губок схвата с переходной деталью транспортировочного крепления датчика сейсмической активности, что выражается в скачкообразном увеличении тока. Далее начинается постепенная упругая деформация губки схвата с наклоном сейсмодатчика относительно поверхности установки. В момент времени $t=8,4$ с происходит взаимное перемещение БВС и датчика, после чего процесс наклона и упругой деформации губки схвата повторяется, до достижения губкой конечного положения закрытого состояния.

7. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОТОТИПА БВС, ОТВЕЧАЮЩЕГО ТРЕБОВАНИЯМ И ОГРАНИЧЕНИЯМ, ВЫЯВЛЕННЫМ В ХОДЕ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА. ПРОВЕДЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ЛАБОРАТОРНОГО И ПОЛЕВОГО ТЕСТИРОВАНИЯ РАЗРАБОТАННОГО ПРОТОТИПА

В ходе проекта выявлены следующие требования и ограничения, предъявляемые к новому прототипу БВС:

- Полезная нагрузка – не менее 5 кг (сейсмодатчик с устройством захвата);
- Полетное время с полезной нагрузкой – не менее 15 минут;
- Дальность работы бортовой системы связи и телеметрии – не менее 8 км в условиях прямой видимости;

- Повышенная стабильность в сложных погодных условиях (стабильное удержание точки при боковом ветре не более 12 м/с);
- Интеграция высокоуровневого вычислителя в систему управления для осуществления посадки и считывания данных с сейсмических датчиков;
- Интеграция цифровой камеры для системы автоматизированной посадки, расположенной на двухосевом гиросtabilизирующем подвесе.

7.1 Выбор конфигурации БВС

Исходя из требований, представленных к БВС, для нового прототипа была использована схема гексакоптера с тянущим расположением винтомоторной группы (ВМГ). Выбор схемы обусловлен повышенной устойчивостью и грузоподъемностью гексакоптера по сравнению с квадрокоптером, что необходимо для выполнения задач с увеличенной полезной нагрузкой и обеспечения надежности при отказе одного из двигателей.

Для оптимального распределения масс и минимизации влияния вибраций, аккумуляторная батарея (АКБ) расположена в нижнем отсеке аппарата, что понижает центр тяжести и повышает устойчивость БВС. При этом высокоточное оборудование, включая датчики, будет размещено в верхнем отсеке, что позволит изолировать его от потенциальных помех, создаваемых электромагнитным излучением и вибрациями АКБ. Такое распределение компонентов также упрощает доступ к основным элементам системы при техническом обслуживании.

7.2 Подбор ВМГ

В соответствии с требованиями проекта был проведён выбор винтомоторной группы, способной обеспечить устойчивость аппарата и выполнение ключевых задач. Для оценки рассматривались комбинации мотор-пропеллер, которые могли соответствовать следующим параметрам: взлётная масса около 15 кг, включающая полезную нагрузку 5 кг и аккумулятор 6S ёмкостью 32 000 мА·ч (вес — 4 кг), из чего следует необходимая тяга на один двигатель 2,5 кг при конфигурации гексакоптера.

Для первичного анализа использовалась математическое программное обеспечение, что позволило предварительно рассчитать параметры полёта, включая энергоэффективность и совместимость компонентов. После этого были проведены испытания на стенде, где особое внимание было уделено выбранном исходя из расчетных характеристик мотору T-Motor Antigravity MN5008 KV340.

Испытания показали, что при тяге 2,5 кг и использовании пропеллеров диаметром 18 дюймов токопотребление одного мотора составило в среднем 5,1 А. Суммарное потребление шести моторов при таком режиме работы составит 30,6 А, что позволит обеспечить расчетное время полёта около 23 минут при ёмкости аккумулятора 32 000 мАч.

Учитывая соответствие требованиям проекта, включая устойчивость к внешним воздействиям и продолжительность полёта, мотор T-Motor Antigravity MN5008 KV340 был выбран в качестве основного для текущей конфигурации гексакоптера.

7.3 Проектирование элементов БВС

В рамках проектирования корпусных элементов конструкции принято решение использовать складную конструкцию БВС для удобства транспортировки и хранения. Конфигурация гексакоптера позволяет реализовать складные «боковые» лучи, которые складываются к двум «диаметральным» лучам. Для фиксации лучей в разложенном положении используется надёжное винтовое соединение, обеспечивающее прочность и устойчивость конструкции во время полёта.

Конструкция аппарата состоит из трёх основных отсеков:

- Верхний отсек предназначен для размещения высокоточных электронных компонентов, включая одноплатный компьютер Raspberry Pi 5, датчики, GPS-модуль и другие навигационные элементы.
- Средний отсек - в нём расположены элементы силовой электроники, включая плату распределения питания, а также размещён механизм складывания лучей.
- Нижний отсек включает аккумуляторный блок (АКБ) и крепления для полезной нагрузки. В нижнем отсеке также расположены элементы шасси для обеспечения стабильности при посадке.

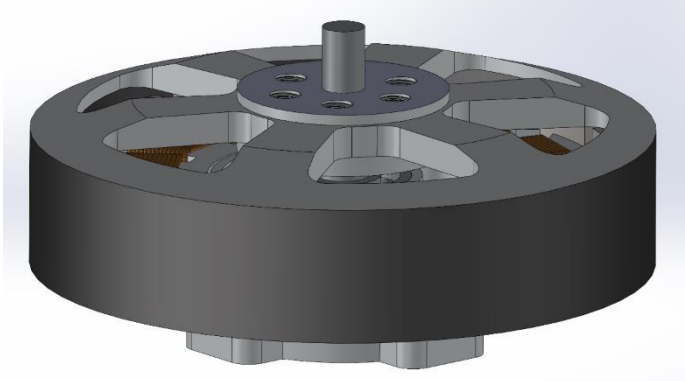

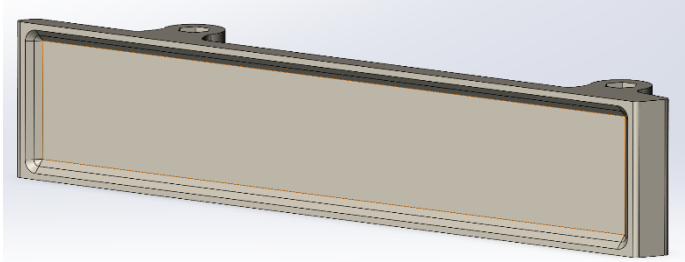
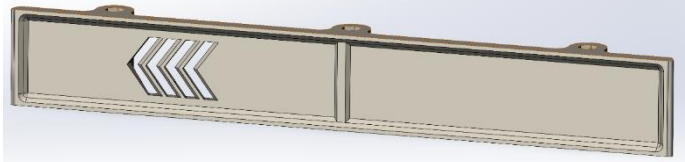
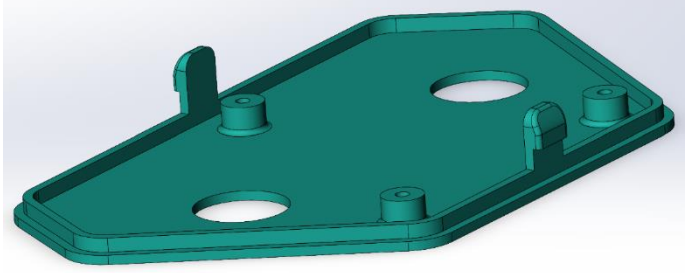

Отсеки соединяются между собой алюминиевыми шестигранными стойками, которые обеспечивают высокую жёсткость конструкции при минимальном весе, а также простоту сборки и обслуживания. Лучи гексакоптера крепятся винтами М4, в то время как остальные элементы конструкции используют винты М3, что упрощает унификацию крепёжных элементов.

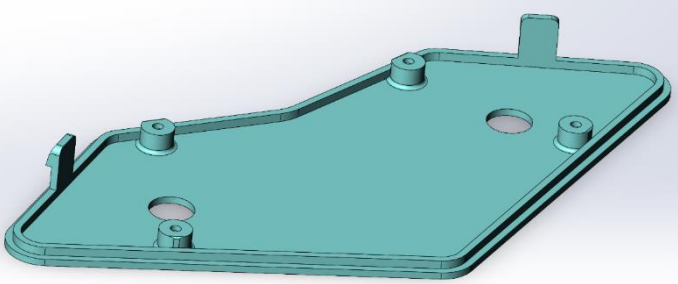
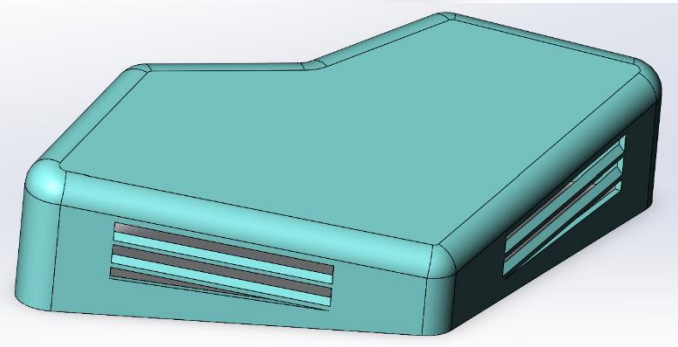
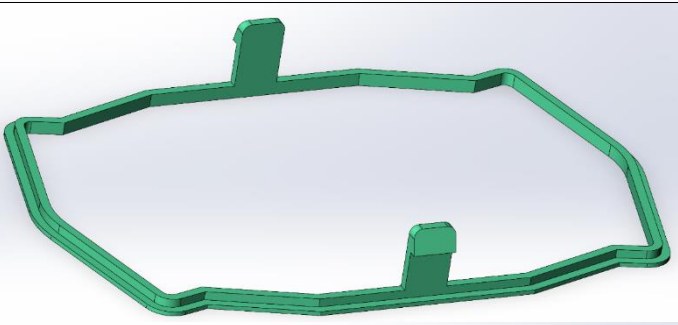
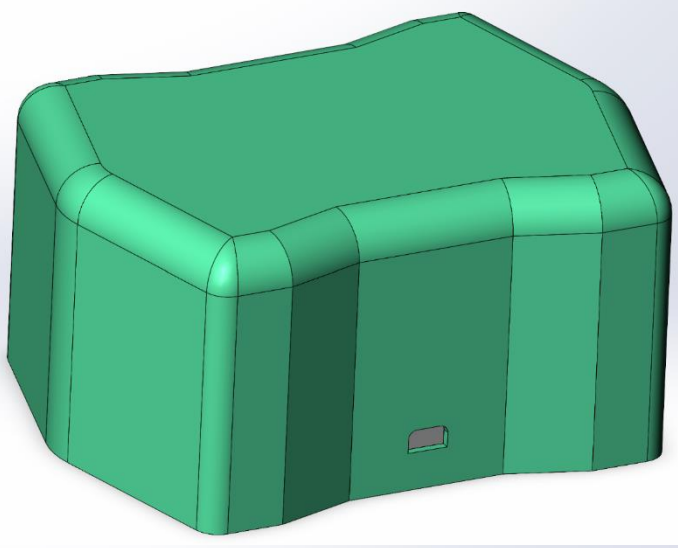
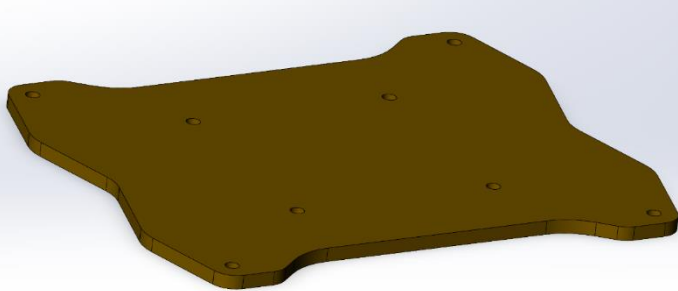
Для повышения жёсткости корпуса в конструкции дополнительно используются боковые пластиковые элементы, которые укрепляют соединения и защищают внутренние компоненты от механических повреждений.

Все элементы конструкции были спроектированы и смоделированы в САД-системах с учётом массогабаритных характеристик и требований к крепёжным узлам. Это включало моделирование двигателей, пропеллеров, внешних модулей (модуля телеметрии, модуля

радиоприёмника), навесного оборудования, а также основных компонентов силовой и управляющей электроники (таблица 5).

Таблица 5 – Элементы конструкции БВС

Наименование	Модель
Мотор	
Пропеллер	
Фронтальная панель	
Боковая панель	
Контейнер электроники боковой часть 1	
Контейнер электроники боковой часть 2	

<p>Контейнер электроники фронтальный часть 1</p>	
<p>Контейнер электроники фронтальный часть 2</p>	
<p>Контейнер электроники центральный часть 1</p>	
<p>Контейнер электроники центральный часть 2</p>	
<p>Пластина переходная для электроники центральная</p>	

Механизм складывания реализован путем осевого вращения луча и ответной поджимной частью. Скользящие элементы механизма выполнены из комбинации капролона и алюминия. За счет расположения оси вращения перед осью фиксации плечо фиксации механизма значительно больше, чем при обратном исполнении (расположении оси вращения за осью фиксации). При обратном же исполнении увеличивается нагрузка на ось фиксации, что увеличило бы требования к ее прочности, что в свою очередь привело бы к увеличению массы элементов. Простота фиксации обеспечивается болтовым соединением, что упраздняет механизмы и уменьшает массу элементов фиксации.

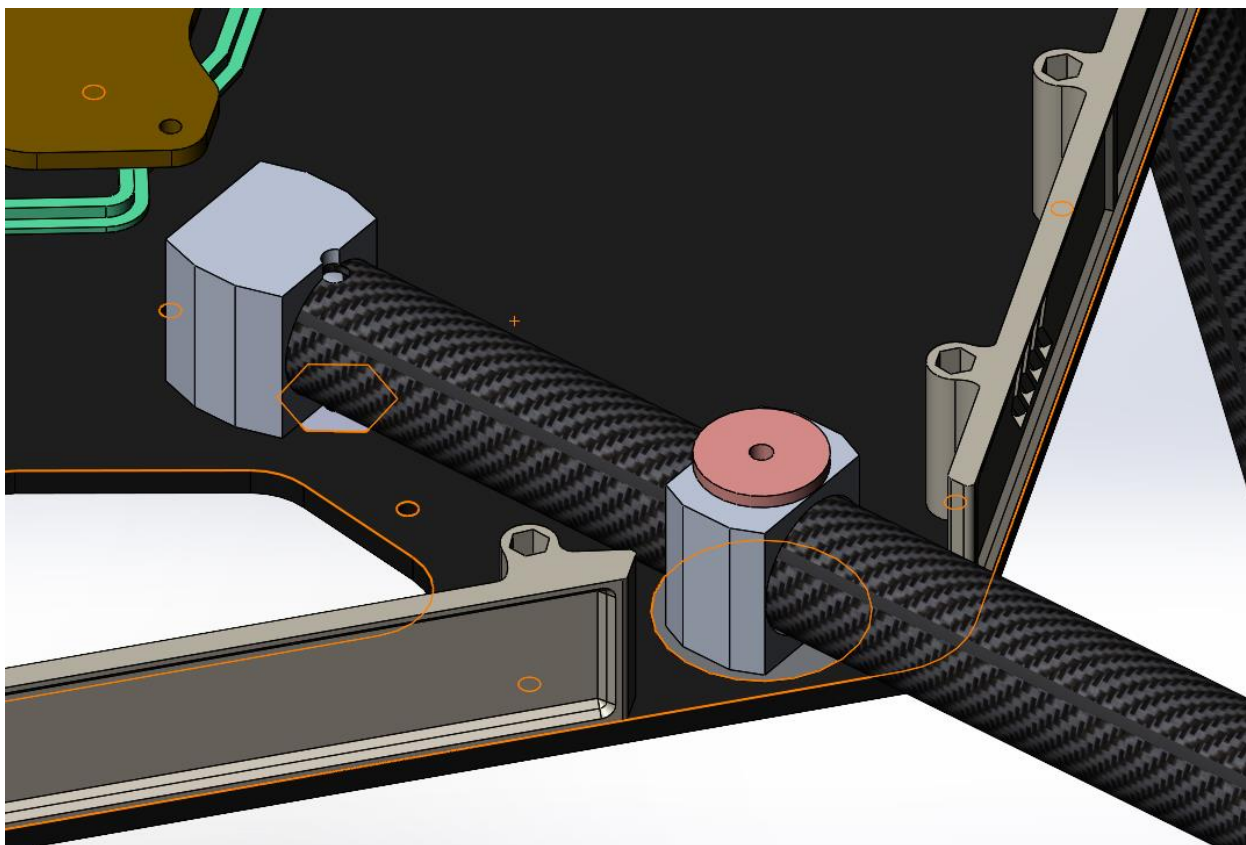


Рисунок 84 – Элементы БВС

Лучи изготавливаются из углепластиковых трубок методом намотки. Пластины изготавливаются из углепластика методом вакуумной инфузии. Пластиковые элементы конструкции изготовлены методом 3D-печати из ABS-пластика.

7.4 Проектирование двухосевого гиросtabilизирующего подвеса для камеры

В ходе реализации проекта, были выявлены серьезные ограничения, накладываемые на камеру и ее систему крепления. При осуществлении полета, при использовании статичного крепления камеры на корпус БВС как в предыдущем прототипе, изображение с камеры сильно размыто и искажено из-за вибраций, возникающих в процессе полета БВС,

а жесткая фиксация направления камеры с корпусом БВС вызывает отклонение маркера от целевой точки при любом наклоне БВС, что препятствует осуществлению точной посадки из-за возникновения некорректной обратной связи в алгоритмах посадки. Для предотвращения этого, принято решение: во-первых, использовать камеру с оптической стабилизацией изображения, во-вторых, спроектировать и изготовить для данной камеры виброразвязанный двухосевой (крен и тангаж) гиросtabilизирующий подвес, который обеспечит фиксированное направление камеры вертикально вниз вне зависимости от наклона БВС.

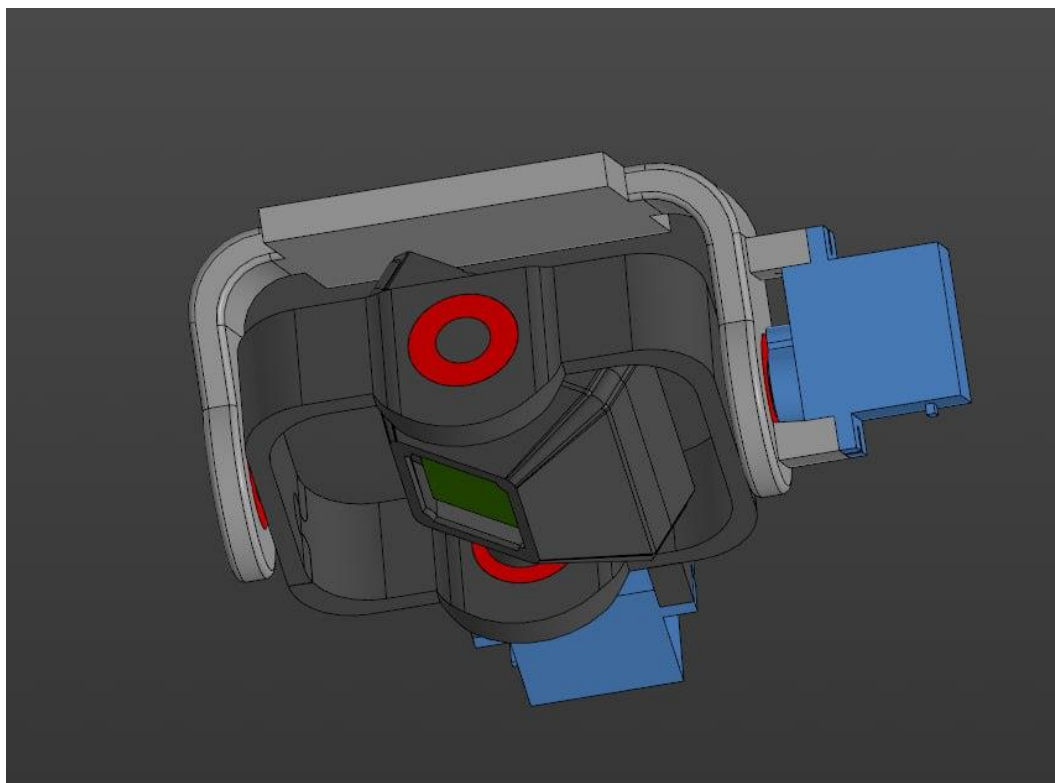


Рисунок 85 – Модель виброразвязанного двухосевого гиросtabilизирующего подвеса

Корпус стабилизирующего двухосевого подвеса выполнен с использованием 3D-печати из пластика ABS. В качестве приводов наклона были выбраны легковесные сервоприводы модели SG90. Для обеспечения плавного хода на осях впрессованы металлические подшипники. Сигнал о необходимом наклоне камеры и управления поступает непосредственно с полётного контроллера БВС.

При проектировании модели для минимизации веса и габаритов учитывались максимальные рабочие углы крена и тангажа БВС (30 градусов). После изготовления нескольких тестовых образцов были ликвидированы неочевидные слабые места корпуса подвеса.

Таким образом изображение было стабилизировано суммой инструментов:

- Виброразвязывающая пластина, отделяющая подвес и БВС.

- Система гиостабилизации за счёт сервоприводов.
- Гашение остаточных вибраций с помощью матричной стабилизации внутри модуля камеры



Рисунок 86 – Виброразвязанный двухосевой гиостабилизирующий подвес

7.5 Проектирование и анализ рамы БВС-носителя

Проектирование рамы для БВС сопряжено с задачей выбора оптимальных материалов и компоновки конструктивных элементов. В результате анализа конфигурации ВМГ было установлено, что конструкция требует использования шести моторов размерностью 5008 с 18-дюймовыми пропеллерами. Основные параметры геометрии рамы определяются требованиями к размещению ВМГ:

- Ограничение площади роторов: Площади несущих роторов не должны пересекаться при любом положении двигателей.
- Минимальное расстояние между винтами: Расстояние между краями лопастей соседних роторов должно составлять не менее 5% от диаметра пропеллера.
- Симметричное расположение: Симметрия относительно центра масс улучшает отклик управления и упрощает стабилизацию полётного контроллера.

Геометрия рамы была смоделирована в САД-системе с учётом габаритов компонентов, таких как ВМГ, аккумулятор, платы управления и полезная нагрузка. На основании практического опыта проектирования предыдущих БВС были выбраны следующие материалы:

– Лучевая конструкция: Углепластиковые трубки, изготовленные методом намотки, избегая экструзионных технологий из-за их меньшей прочности и надёжности.

– Пластины рамы: Углепластиковые пластины из углеткани плотностью 600 г/м² с эпоксидным связующим Larit, что обеспечивает высокую прочность и низкий вес.

Для проведения симуляций в CAD-системе был создан эталонный материал углеволокна с эпоксидной пропиткой, основанный на экспериментально доступных данных, включая моделирование стеклования.

7.5.1 Этап 1: Анализ нагрузки на лучи

На первом этапе конструкция рамы была декомпозирована на основные элементы для упрощения анализа. Лучи исследовались в сборе, с фиксацией концов в точках крепления к центральной раме. На площадь моторной площадки каждого луча прикладывалось давление, эквивалентное максимальной статической тяге двигателя.

В ходе симуляций (рисунок 87) была определена оптимальная толщина и диаметр углепластиковых трубок, обеспечивающие необходимую прочность при минимальном весе: диаметр 20мм, толщина 1мм.

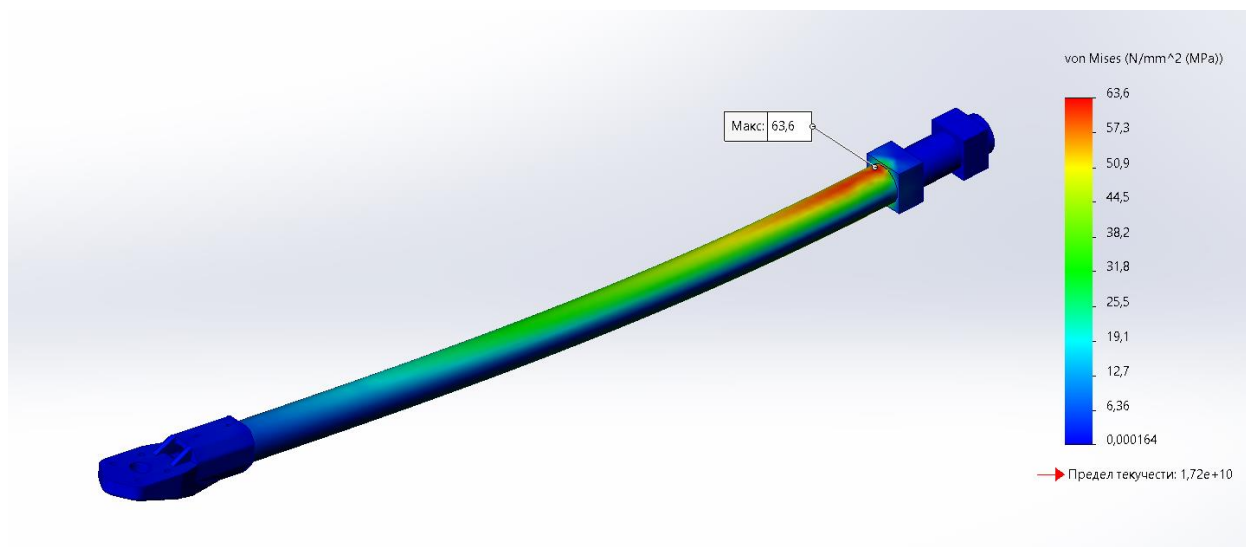


Рисунок 87 – Анализ нагрузки на лучи

7.5.2 Этап 2: Анализ общей прочности конструкции

На следующем этапе проведён анализ общей силовой модели рамы. Испытания включали проверку прочности центральной и промежуточных пластин при полной нагрузке: каждая моторная площадка испытывала тяговую нагрузку, равную максимальной тяге двигателя, с фиксацией рамы в центре масс.

По результатам симуляций (рисунок 88), в ходе которых итеративно испытывались нагрузки на различные вариации облегченных пластин, были оптимизированы:

- Толщина пластин: Обеспечивающая необходимую жёсткость при их минимальной массе. Толщина пластин составила 4 мм.
- Форма пластин и отверстий для облегчения: Снижение веса без ущерба для прочности конструкции.

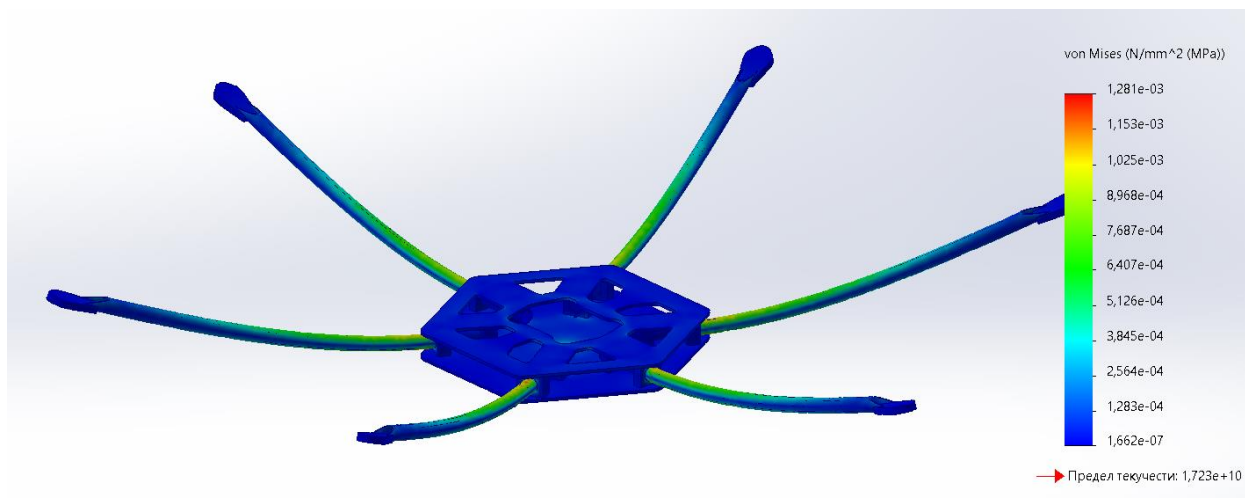


Рисунок 88 – Анализ общей прочности конструкции

Полученные данные позволили сформировать раму (рисунок 89), отвечающую требованиям к весу, прочности и жёсткости, с учётом высоких аэродинамических и эксплуатационных нагрузок.

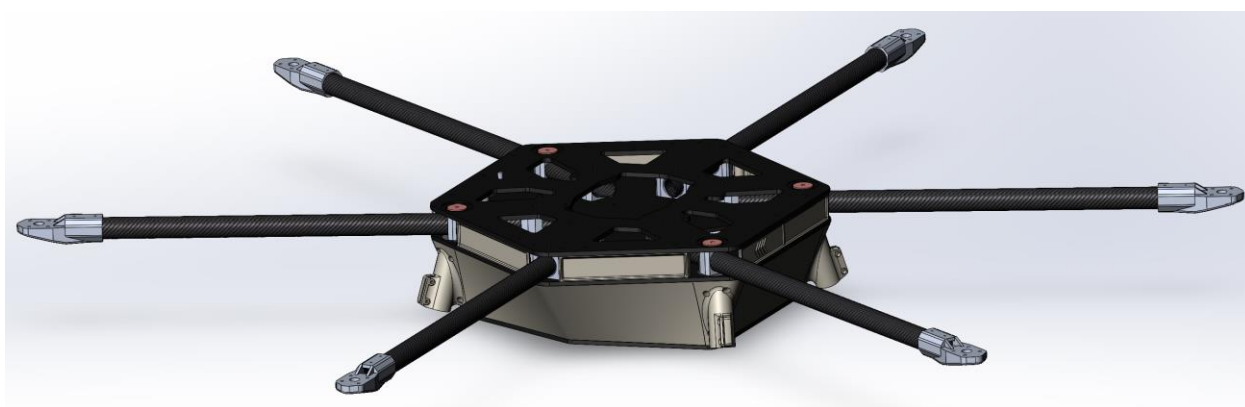


Рисунок 89 – Модель рамы БВС

7.6 Проектирование эскизной модели сборки БВС

После завершения этапа моделирования всех компонентов, включая их габаритные характеристики, была разработана эскизная модель будущего БВС, а также финальная сборка модели рамы в комплекте с винтомоторной группой (ВМГ).

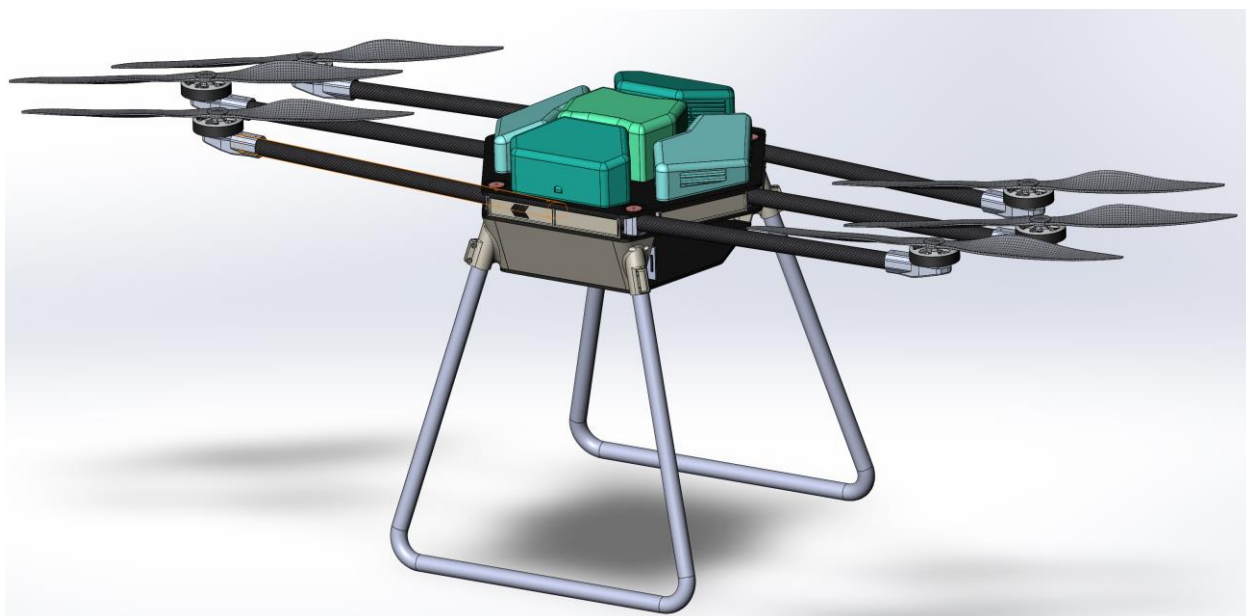
Произведено размещение ключевых компонентов: полетного контроллера, датчиков и других электронных устройств, с учетом готовых моделей и чертежей. Полетный контроллер был размещен на вибропоглощающей платформе для уменьшения механических шумов, воздействующих на гироскоп и акселерометр, что способствует

повышению точности при стабилизации и навигации аппарата. Для защиты электрооборудования были спроектированы пылезащитные накладки и крышки.

Все выводы и разъемы были спроектированы для удобства эксплуатации и обслуживания БВС. Изготовление этих компонентов будет осуществляться с использованием 3D-печати из пластика ABS, что обеспечит необходимую прочность и гибкость деталей.



а)



б)

Рисунок 90 – Модель БВС

Таким образом, спроектирован БВС-носитель, полностью соответствующий техническим и летным требованиям. Геометрия захвата, а также расположение компонентов обеспечивает возможность точного захвата датчика в неподвижном состоянии после посадки, а также гарантируют точность посадки в заранее заданной точке. Конструкция отличается легкостью и надежностью за счет применения высококачественных композитных материалов, а также простотой изготовления, благодаря использованию таких методов, как 3D-печать, лазерная резка и фрезеровка.

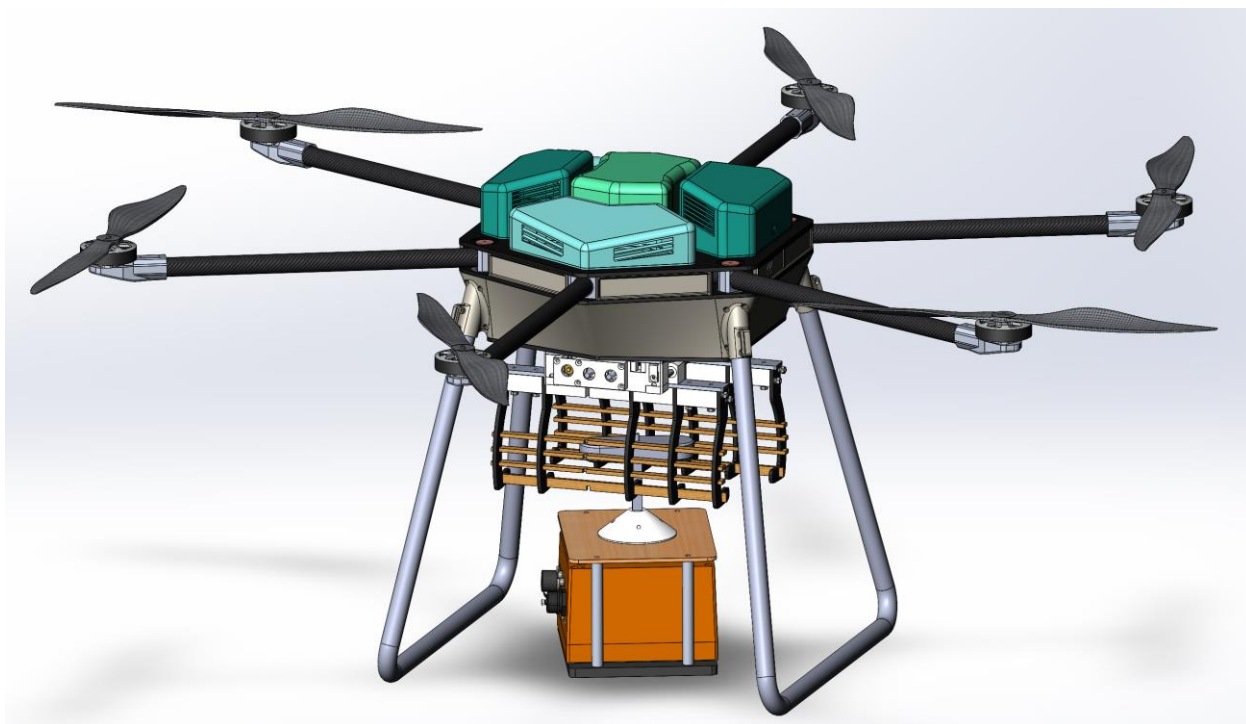


Рисунок 91 – Модель БВС с полезной нагрузкой

7.7 Лабораторное тестирование

7.7.1 Испытания винтомоторной группы (ВМГ) на тестовом стенде

В рамках лабораторных испытаний была проведена серия тестов винтомоторной группы (ВМГ) для проверки ее соответствия заявленным производителем характеристикам, а также для определения расчетных параметров грузоподъемности и времени полета БВС.

Используемая установка:

- Лабораторный блок питания: 24 В, максимальный ток 50 А.
- Измеритель тока: Цифровой амперметр с точностью $\pm 0,01$ А.
- Измеритель тяги: Электронные весы высокой точности (± 1 г), интегрированные с платформой крепления двигателя.
- Регулятор оборотов двигателя: ESC T-MOTOR Flame 60A, настроенный для работы с мотором.

– Контроллер подачи управляющего сигнала: Модуль Arduino Nano, обеспечивающий генерацию сигнала широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с фиксированными уровнями газа.

– ВМГ: мотор TMOTOR MN5008 KV340, пропеллер T-MOTOR P18×6.1" CF.

Цели испытаний:

– Проверить соответствие параметров тяги и потребляемого тока, указанных производителем, с экспериментальными данными.

– Получить экспериментальные данные для расчета максимальной грузоподъемности и времени полета.

– Оценить поведение ВМГ при различных уровнях газа, включая линейность изменения тяги относительно уровня ШИМ.

Методика проведения тестов:

Испытания проводились путем ступенчатого увеличения уровня газа с помощью контроллера Arduino Nano, подающего сигналы ШИМ на регулятор оборотов (ESC). Измерялись тяга и токопотребление для каждого установленного уровня газа. Тяга определялась с помощью датчика веса, соединенного с креплением мотора.

Полученные данные представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты испытаний путем ступенчатого увеличения уровня газа

Уровень газа (Throttle), %	Напряжение (В)	Ток (А)	Тяга (г)
40	23,5	3,92	960
45	23,4	5,28	1215
50	23,3	7,02	1500
55	23,2	9,18	1780
60	23,1	11,48	2070
65	23	13,88	2345
70	22,9	16,50	2610
75	22,8	19,42	2890
80	22,7	22,58	3165
90	22,6	30,12	3780
100	22,5	34,18	4080

Обработка данных:

Результаты тестов показали, что тяга линейно увеличивается с ростом уровня газа, достигая максимального значения 4080 г на одном двигателе при 100% газа. При этом потребляемый ток увеличивается экспоненциально, что ограничивает эффективное использование высоких уровней газа.

Для расчетов грузоподъемности принималось, что шесть двигателей при 70% газа обеспечат суммарную тягу 15,66 кг, что соответствует взлетной массе БВС (15 кг) с запасом тяги для маневрирования и компенсации потерь в сложных погодных условиях.

Подтверждение расчетных данных в лабораторных условиях:

Время полета рассчитывалось по формуле:

$$t = \frac{Q}{I_{\text{сум}}} \times 60,$$

где Q – емкость АКБ в ампер-часах (32 Ач); $I_{\text{сум}}$ – суммарный ток для шести двигателей при выбранном уровне газа (70%), равный $16.5\text{А} \times 6 = 99\text{А}$

Расчетное время составило:

$$t = \frac{32}{99} \times 60 \approx 19,4 \text{ минуты}$$

Результаты испытаний подтвердили, что выбранная ВМГ обеспечивает достаточную грузоподъемность для выполнения задач БВС. При этом расчетное время полета (около 19 минут) соответствует заявленным требованиям, обеспечивая минимально необходимую продолжительность в 15 минут. Дополнительно было выявлено, что использование уровней газа выше 75% существенно снижает энергоэффективность ВМГ, что следует учитывать при эксплуатации.

7.7.2 Проверка прочности рамы (статические тесты)

Целью данного тестирования является проверка способности рамы БВС выдерживать статические нагрузки, эквивалентные условиям эксплуатации, включая вес полезной нагрузки, аккумулятора и тягу двигателей, с целью подтверждения прочности, жесткости конструкции и надежности соединений. Для проведения испытаний рама БВС была зафиксирована на испытательном стенде через шесть точек крепления моторов, идентичных штатным точкам крепления двигателей.

К нижней части рамы был прикреплен груз, эквивалентный:

- Полезной нагрузке массой 5 кг.
- Массе аккумулятора 4 кг.
- Суммарной максимальной тяге шести двигателей, составляющей 24,48 кг.

Общая масса груза составила 33,48 кг, что соответствует полной статической нагрузке, действующей на раму в полете. Нагрузка прикладывалась постепенно, начиная с полезной нагрузки и аккумулятора (9 кг), после чего добавлялся эквивалент тяги

двигателей. Рама оставалась под полной нагрузкой в течение 30 минут. Визуально оценивались возможные прогибы и деформации элементов конструкции. После снятия нагрузки фиксировалось состояние соединений и наличие остаточных деформаций.

Рама успешно выдержала полную статическую нагрузку в 33,48 кг без видимых повреждений или остаточных деформаций. Прогиб центральной части рамы под нагрузкой составил менее 2 мм, что свидетельствует о высокой жесткости конструкции. Все соединения элементов остались в рабочем состоянии, разболтанности крепежных элементов не выявлено.

Статические тесты подтвердили, что конструкция рамы соответствует предъявляемым требованиям по прочности и жесткости. Рама способна выдерживать нагрузки, эквивалентные максимальным эксплуатационным, включая тягу двигателей и вес полезной нагрузки. Испытания также подтвердили надежность соединений и устойчивость конструкции к длительным нагрузкам.

7.7.3 Проверка работоспособности программного обеспечения и первичная настройка

Цель: проверить корректность установки и настройки программного обеспечения, работоспособность аппаратных модулей и взаимодействие компонентов системы.

Первичная настройка ПО: на полетный контроллер установлено программное обеспечение ArduPilot (прошивка Copter). Настройка включала:

- Калибровку датчиков (акселерометра, гироскопа, компаса).
- Установку параметров ESC и моторов.
- Конфигурацию полетных режимов.
- Проверку работоспособности аппаратных модулей:
 - GPS: Проверена корректность определения координат и времени, а также стабильность спутникового сигнала.
 - Телеметрия: Настроено соединение с наземной станцией через телеметрический модуль.
 - Приемник: Проверена связь с радиоуправлением и корректная передача команд полетному контроллеру.
- Работа с Raspberry Pi:
 - Установлено программное обеспечение для трекинга маркера. Проведена проверка его работоспособности.
 - Проверена интеграция между полетным контроллером и Raspberry Pi. Было под, что сигналы о распознавании маркера передаются на полетный контроллер без задержек.

Все модули и программное обеспечение были успешно настроены и проверены на работоспособность. Полетный контроллер корректно взаимодействует с аппаратными модулями и Raspberry Pi.

Проверка программного обеспечения и аппаратных модулей подтвердила готовность системы к выполнению заявленных задач. Все компоненты успешно интегрированы и работают в штатном режиме.

7.8 Полевое тестирование

7.8.1 Длительность полета с полезной нагрузкой

Тест проводился на испытательном полигоне при температуре воздуха +10°C, отсутствии осадков и ветре до 10 м/с. На БВС была установлена имитация полезной нагрузки массой 5 кг для проверки времени полета с учетом всех условий, близких к реальным. БВС подняли на высоту 10 м, где он удерживал позицию в режиме стабилизации. Нагрузка включала массу полезной нагрузки (5 кг), аккумулятора (4 кг), а также вес рамы и оборудования, что эквивалентно полной взлетной массе. Параметры полета (напряжение аккумулятора, потребляемый ток, время) фиксировались с помощью наземной станции телеметрии.

Результаты теста: Полетное время составило 16 минут и 20 секунд, что превышает минимальное требование по ТТХ (15 минут). Причина уменьшения фактического времени полета по сравнению с расчетным (19 минут):

- Напряжение аккумулятора 6S (22,2 В) в процессе разряда снижалось, что привело к уменьшению мощности, доступной для двигателей.
- Разряд аккумулятора происходил нелинейно, что характерно для литий-полимерных (LiPo) батарей, и особенно проявляется при нагрузке близкой к максимальной.

Тест подтвердил, что система способна выполнять полет с полезной нагрузкой в течение времени, превышающего минимальные требования. Несмотря на уменьшение фактического времени полета относительно расчетного, оно остается достаточным для выполнения запланированных задач.

7.8.2 Дальность устойчивой связи с наземной станцией

Эксперимент проводился на испытательном полигоне в условиях прямой видимости при скорости ветра до 3 м/с. БВС оснащался телеметрическим модулем RFD900 с всенаправленной антенной, а на наземной станции использовалась направленная антенна. БВС был поднят на высоту 50 м и отправлен в автономный полет по прямой линии от наземной станции управления на расстояние 8 километров, где находилась точка посадки.

На наземной станции фиксировалась дальность телеметрии до момента потери устойчивого соединения.

Связь с телеметрическим модулем оставалась стабильной на расстоянии до 1 км, что соответствует заявленным характеристикам модуля RFD900 при условиях прямой видимости. За пределами 1 км связь стала нестабильной, с частыми разрывами телеметрического соединения. На расстоянии более 1,2 км соединение полностью потеряно, что сделало невозможным как получение данных телеметрии в реальном времени, так и оперативное вмешательство. Тест показал, что дальность связи модуля RFD900 ограничена примерно 1 км. Основные ограничения связаны с затуханием сигнала при увеличении расстояния, влиянием атмосферных условий и препятствиями на линии прямой видимости. Для покрытия зоны 8×8 км использование одного модуля недостаточно. Для решения данной проблемы необходимо использовать ретрансляционное оборудование, которое позволит расширить область работы группы БВС до 8 километров.

7.8.3 Проверка стабильности удержания точки при высокой ветровой нагрузке

Тест проводился на испытательном полигоне в день с сильным ветром, скорость которого составляла до 12 м/с (максимально допустимая ветровая нагрузка согласно требованиям). Испытания включали серию полетов с задачей удержания позиции на разных высотах.

БВС был поднят на высоты 10 м, 20 м и 50 м. В каждом случае включался режим удержания позиции, при котором система автоматически компенсировала смещение под воздействием ветра. Визуально наблюдалось поведение аппарата и степень отклонения от заданной точки. Оценивалось, насколько быстро и точно гексакоптер возвращался в исходное положение после порывов ветра.

На высоте 10 м БВС практически не смещался от заданной точки. Отклонения были минимальными и не мешали выполнению задачи. На высоте 20 м и выше отклонения от точки увеличивались, однако гексакоптер эффективно компенсировал порывы ветра, быстро возвращаясь в исходное положение. На всех высотах система удержания позиции работала стабильно, без признаков резонанса или неконтролируемых движений.

Тестирование показало, что БВС способен надежно удерживать позицию при ветровой нагрузке до 12 м/с, что соответствует заявленным требованиям. Отклонения были незначительными и не влияли на выполнение задач. Конструкция гексакоптера доказала свою эффективность в условиях сильного ветра, обеспечивая высокую устойчивость и управляемость аппарата.

7.8.4 Доставка прототипа сейсмодатчика

Условия тестирования: Тест проводился на испытательном полигоне в спокойных погодных условиях при скорости ветра не более 2 м/с. Целью было проверить способность БВС доставлять сейсмодатчик массой 3 кг в заданную точку, корректно осуществлять посадку, оставлять датчик на месте и возвращаться обратно.

В качестве полезной нагрузки использовался макет сейсмодатчика массой 3 кг, установленный в захвате БВС. Механизм захвата был проверен на надежность фиксации и корректность срабатывания.

Через наземную станцию в полетный контроллер была загружена миссия, включающая:

- Взлет в точке старта.
- Перелет к заранее рассчитанной целевой точке.
- Посадку в целевой точке.
- Открытие захвата для оставления макета датчика.
- Возврат в точку старта.

После загрузки миссии БВС выполнил все этапы автономно. БВС успешно доставил макет сейсмодатчика в целевую точку. Посадка была выполнена с отклонением в 30–40 см от расчетной точки из-за ограничений точности GPS, что соответствует ожидаемому диапазону. Захват сработал корректно, макет сейсмодатчика был оставлен на земле без смещений при освобождении. Возврат в точку старта прошел без отклонений от маршрута, с соблюдением всех этапов миссии.

Тест продемонстрировал способность БВС выполнять задачи по доставке и установке сейсмодатчиков в автономном режиме. Отклонения от целевой точки при посадке обусловлены ограничениями GPS-навигации, но остаются в допустимых пределах для выполнения задач проекта. Использование механизма захвата и алгоритмов автономной навигации показало их надежность и соответствие проектным требованиям.

7.8.5 Автоматизированная посадка и захват сейсмодатчика

Целью данного испытания является проверка работоспособности системы автоматизированной посадки и захвата сейсмодатчика, оценка точности посадки в соответствии с требованиями проекта и подтверждение надежности алгоритмов трекинга и посадки.

БВС изначально занимал фиксированное положение над сейсмодатчиком на высоте 5 м от подстилающей поверхности. Имитация сейсмодатчика весом 3 кг была установлена в целевой точке с предварительно нанесенным QR-кодом для автоматического трекинга.

Процесс выполнения теста:

- Камера на двухосевом гиросtabilизирующем подвесе распознавала QR-код, передавая данные для автоматического наведения.
- Алгоритмы управления обеспечивали плавное снижение и посадку на сейсмодатчик в автономном режиме.
- После посадки захват переводился в закрытое состояние для фиксации датчика.
- Захват считался успешным, если переходная деталь датчика попадала между губками устройства.

Точность посадки оценивалась в соответствии с проектными требованиями:

- Отклонение в плоскости (X, Y): не более ± 100 мм.
- Ошибка по углу рыскания (Z): не более $\pm 10^\circ$.

Успех захвата фиксировался визуально. Проведено 15 последовательных посадок для оценки надежности системы. Результаты представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты автоматизированной посадки и захвата сейсмодатчика

№	Смещение по оси X, мм	Смещение по оси Y, мм	Угол рыскания, °	Захват датчика
1	-45	58	5	Да
2	39	-23	-6	Да
3	72	89	9	Да
4	-64	-45	-3	Да
5	52	31	4	Да
6	-80	-93	8	Да
7	95	105	12	Нет
8	-48	50	-2	Да
9	-51	-40	3	Да
10	67	62	-5	Да
11	-34	88	6	Да
12	60	-25	7	Да
13	-75	40	-9	Да
14	89	-15	8	Да
15	-50	95	11	Нет

В 13 из 15 тестов отклонения по осям X и Y оставались в пределах ± 100 мм, что соответствует требованиям проекта. гол рыскания (Z) не превышал $\pm 10^\circ$ в 14 из 15 случаев. В одном из неудачных тестов ошибка составила $+12^\circ$, что привело к невозможности захвата. Захват датчика был выполнен успешно в 87 % случаев (13 из 15). В 2 тестах отклонения по осям X и Y или по углу Z превысили расчетные допуски, что сделало невозможным захват.

Использование гексакоптера с его высокой устойчивостью к внешним воздействиям позволило значительно уменьшить ошибки по осям X и Y по сравнению с аналогичными системами на квадрокоптерах. Гиросtabilизирующий подвес камеры обеспечил стабильность трекинга и минимизацию ошибок по оси Z.

Тесты подтвердили работоспособность системы автоматизированной посадки и захвата сейсмодатчика. Средняя точность посадки удовлетворяет требованиям проекта, а процент успешных захватов (87 %) демонстрирует высокий уровень надежности системы. В реальных условиях эксплуатации алгоритм автономной посадки при неудачных попытках может повторить процесс для достижения успешного захвата.

7.8.6 Съем данных с прототипа сейсмодатчика

Цель теста: проверить возможность передачи данных с прототипа сейсмодатчика на одноплатный компьютер Raspberry Pi, установленный на БВС, при использовании Wi-Fi 2.4 ГГц. Замерить время подключения, время передачи файла и скорость передачи данных на различных высотах.

Прототип сейсмодатчика оснащен модулем, работающим в режиме точки доступа Wi-Fi. Raspberry Pi на борту БВС настроен как клиент Wi-Fi, автоматически подключающийся к модулю. Для теста использовался файл объемом 5 МБ (5120 кБ), передаваемый от модуля к Raspberry Pi по протоколу UDP.

БВС зависал над сейсмодатчиком на высотах 10 м, 25 м и 35 м. Для каждой высоты фиксировались:

- Время подключения ESP32 к Raspberry Pi.
- Время передачи файла.
- Средняя скорость передачи данных.

Передача данных считалась успешной, если весь файл передавался корректно, а скорость превышала 12 кБ/с. Результаты тестов отражены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты съема данных с прототипа сейсмодатчика

Высота (м)	Время подключения (с)	Время передачи (с)	Средняя скорость (кБ/с)	Устойчивость соединения
10	1	16	320	Высокая
25	2	63	81	Средняя
35	6	214	24	Низкая

На высотах до 25 м скорости значительно превышают минимальные требования проекта (12 кБ/с). На высоте 35 м скорость снизилась до 24 кБ/с, что указывает на предельные возможности системы. Соединение оставалось стабильным на высотах до 25 м. На 35 м наблюдались кратковременные разрывы, но передача данных была завершена.

Тест подтвердил возможность передачи данных с прототипа сейсмодатчика на Raspberry Pi на высотах до 35 м. Для обеспечения надежной работы в реальных условиях рекомендуется ограничивать высоту до 25 м, где система демонстрирует стабильность и высокие скорости. Средние скорости передачи значительно превышают минимальные проектные требования, что подтверждает эффективность выбранных решений.

8. ПОЛЕВАЯ АПРОБАЦИЯ ПРОТОТИПОВ РАЗРАБОТАННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПО ПОДДЕРЖАНИЮ УСТОЙЧИВОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ МЕЖДУ СЕЙСМИЧЕСКИМИ МОДУЛЯМИ И БВС В РЕАЛЬНОЙ СРЕДЕ, ПРОВЕРКА РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ И РАЗВЕРТЫВАНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ НОДАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Для проверки и подтверждения заявленных характеристик разработанной нодальной системы был проведен эксперимент на хорошо исследованном геофизическом полигоне вблизи города Уфа. Целью эксперимента также являлось сравнение характеристик разработанной нодальной системы, а именно молекулярно-электронных геофонов, с уже используемыми геофизиками французскими приемниками Wireless Seismic RT System 2 (рисунок 92).



Рисунок 92 – Комплект сенсоров в точке приема



Рисунок 93 – Источник свип-сигнала (вибратор)

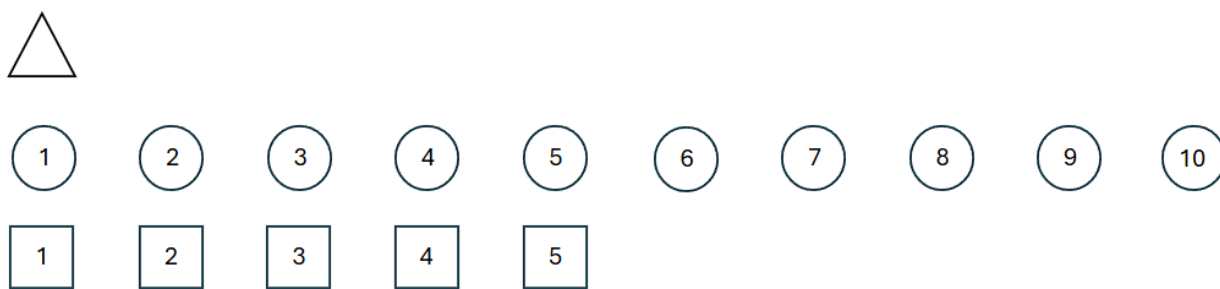
Полевые испытания на базе сейсморазведочного полигона г. Уфа.

8.1 Схема проведения эксперимента

Профиль наблюдения составил 200 метров с шагом регистрации приемников 25 метров. В ходе работ использовалось 5 автономных сейсмических узлов. Шаг возбуждения на профиле был равен шагу регистрации, а именно 25 метров. Источник свип-сигнала перемещался исключительно внутри профиля наблюдения — по 9 позициям. Таким образом для каждой точки работы вибратора мини антенна из 5 сенсоров размером 100 метров переносится 9 раз. Необходимое время регистрации после отработки вибросигнала установили две секунды для более точного сравнения с уже используемым геофизическим оборудованием, имеющим аналогичную длительность записи.

Одновременно с проводимым экспериментом, на профиле была расположена стандартная сейсмическая коса длиной 900 метров с таким же шагом между приемниками – 25 метров.

Схема проведения испытаний показана на рисунках 94-95.

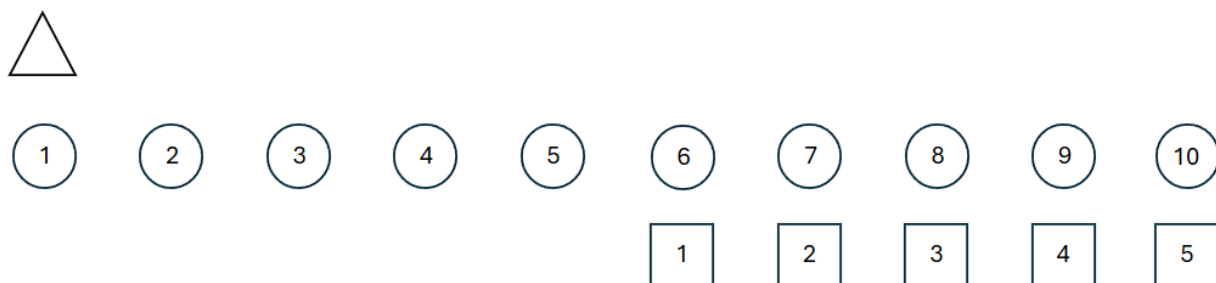


△ - Источник сигнала

○ - Датчики БНГФ

□ - Датчики R-sensors

Рисунок 94– Схема расстановки сейсмических датчиков. Итерация 1



△ - Источник сигнала

○ - Датчики БНГФ

□ - Датчики R-sensors

Рисунок 95 – Схема расстановки сейсмических датчиков. Итерация 2

Зарегистрированные в ходе измерений сигналы конвертируются в формат SEG-Y для последующей обработки, подтверждения заявленных характеристик сейсмических узлов, основанных на молекулярно-электронных геофонах, и сравнения качества записанных данных между двумя системами. Для выявления качества работы двух модулей, располагавшихся недалеко друг от друга, строились спектры «сырых» записанных данных – виброграмм, и спектры коррелограмм – виброграмм после свертки со свпи-сигналом (рисунок 96).

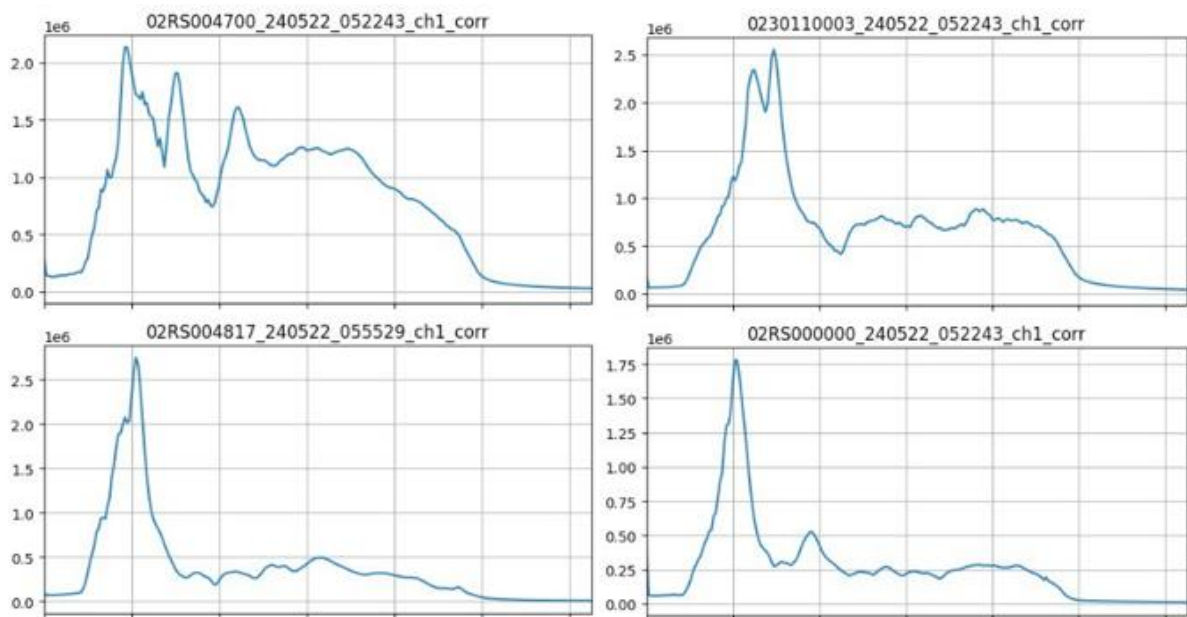


Рисунок 96 – Спектры виброграмм по датчикам

Из графиков видно, положения максимумов у спектров обоих приборов находятся на одном значении частоты, что свидетельствует об исправной работе нодов в ходе сейсмических исследований. Небольшие расхождения в спектрах могут быть связаны с взаимным расположением двух нодов, а именно на расстоянии 25 метров друг от друга, с неоднородностью рельефа, на котором располагались сейсмические модули и с различной степенью контакта с землей.

Режим считывания данных реализуется при обнаружении БВС в зоне распространения сигнала Wi-Fi сейсмического модуля. В ходе полевой апробации было выявлено максимальная дальность распространения сигнала Wi-Fi разработанных нодов – 30 метров. Для сокращения времени сбора цифровых данных с сейсмического модуля сбор данных может осуществляться с определенными временными метками. Для этого запись оцифрованных данных с сейсмодатчиков разбивается на файлы необходимых размеров.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
 Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
 «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр
 Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН)
 14-я линия, д. 39, г. Санкт-Петербург, 199178
 Тел.: (812) 328-33-11, факс: (812) 328-44-50,
 e-mail: info@spcras.ru, web: http://www.spcras.ru
 ОКПО 04683303, ОГРН 1027800514411, ИНН/КПП 7801003920/780101001

Результаты испытаний сейсмических модулей ООО «Р-сенсорс» и беспилотного воздушного судна СПб ФИЦ РАН на учебно-производственной партии АО «Башнефтегеофизика»

20-23 мая 2024 года на учебно-производственной партии АО «Башнефтегеофизика» были проведены испытания сейсмических датчиков и беспилотного воздушного судна СПб ФИЦ РАН с участием сотрудников: Савельев А.И., руководителя лаборатории автономных робототехнических систем, Рябинова А.В., программиста лаборатории автономных робототехнических систем, Горчакова И.В., инженера ООО «Р-сенсорс», Ронжина А.Л., директора СПб ФИЦ РАН.

На рисунке 1 представлены фото использованного сейсмического модуля (геофона) ООО «Р-сенсорс». Сейсмический модуль содержит 3 ортогонально расположенных сейсмических датчика MTSS 1001 производства ООО «Р-сенсорс». Основной особенностью данных датчиков является их работоспособность в любой ориентации относительно вертикали. Все компоненты устанавливаются в единый цилиндрический блок, содержащий специальные ортогональные отверстия для крепления сейсмических датчиков.



Рис. 1. Сейсмический датчик ООО «Р-сенсорс»

Основными компонентами разработанного узла являются цифровая плата, оснащенная встроенной картой памяти SD объемом 32 Гб и модулями Wi-Fi и GPS, а также интерфейсная плата, совмещенная с блоком питания, и все это размещено в водонепроницаемом и герметичном корпусе. Внутри корпуса также находится аккумулятор, который подает питание на платы и датчики при включении устройства. На внешней стороне корпуса расположены антенна Wi-Fi, разъем для подключения антенны GPS, порт

USB-B для загрузки записанных данных и два светодиодных индикатора, отображающих режим работы устройства. В нижней части корпус оснащен платформой для крепления к беспилотному воздушному судну (БВС).

Разработанное беспилотное воздушное судно имеет габариты не более, 1100 мм x 1100 мм x 436 мм, масса не более, 7 кг., полезная нагрузка не менее, 3 кг, ошибка посадки в плоскости (оси X, Y) не более, ± 100 мм. Ошибка по углу рыскания при посадке (ось Z) не более ± 10 мм, максимальный угол крена при посадке не более 30 градусов, размеры пространства для установки дополнительного оборудования не менее, 350 мм x 250 мм x 250 мм, полетное время с нагрузкой не менее 30 минут. Исходя из размеров переходной детали, точности посадки и геометрических размеров беспилотного воздушного судна были выбраны параметры устройства захвата, а именно ход ползунов (b/2), который составляет 70 мм и ширина губок схвата 260 мм. На рисунке 2 представлены фото беспилотного воздушного судна и отдельно устройства захвата.



Рис. 2. Разработанное СПб ФИЦ РАН беспилотное воздушное судно с устройством захвата

Результаты тестирования системы доставки сейсмодатчика посредством беспилотного воздушного судна

В ходе экспериментов проводилась проверка автономной работы системы доставки сейсмодатчика в условиях переменной высоты подстилающей поверхности. Исходные условия: температура окружающей среды $+24^{\circ}\text{C}$, влажность 85%, давление 734 ммрс, координаты начальной точки [53,7845278930022 54,7243809700012 179,61], БВС находится в начальной точке с установленным в ось захвата сейсмическим сенсором, захват открыт.

Основные этапы алгоритма работы БВС:

1. Закрытие захвата БВС над датчиком.
2. Взлет БВС на высоту 10 м.

3. Полет БВС в точку на удалении 100 м от начальной точки и подъем на 5 м относительно исходной точки.
4. Посадка БВС.
5. Открытие захвата БВС для отгрузки датчика.
6. Взлет БВС на высоту 10 м.
7. Возвращение БВС на начальную точку, посадка.

Ожидаемое поведение:

1. При закрытии захвата на шаге 1 происходит надежная фиксация сейсмического датчика.
2. На протяжении полета с сейсмическим сенсором в целевую точку (шаги 2–4) устройство остается жестко зафиксированным в захвате.
3. На шаге 6 БВС взлетает без сейсмического сенсора.

На протяжении всего полета (шаги 2–4, 6, 7) БВС удерживает высоту 10 м относительно подстилающей поверхности, реагируя на перепады высоты.

На рисунке 3 изображен процесс построения автономной траектории движения БВС. Траектория и процессы, выполняемые в ключевых точках, задавались посредством программного обеспечения QgroundControl. Всего было выполнено 8 тестовых полетов на расстояниях до 150 метров с различными параметрами

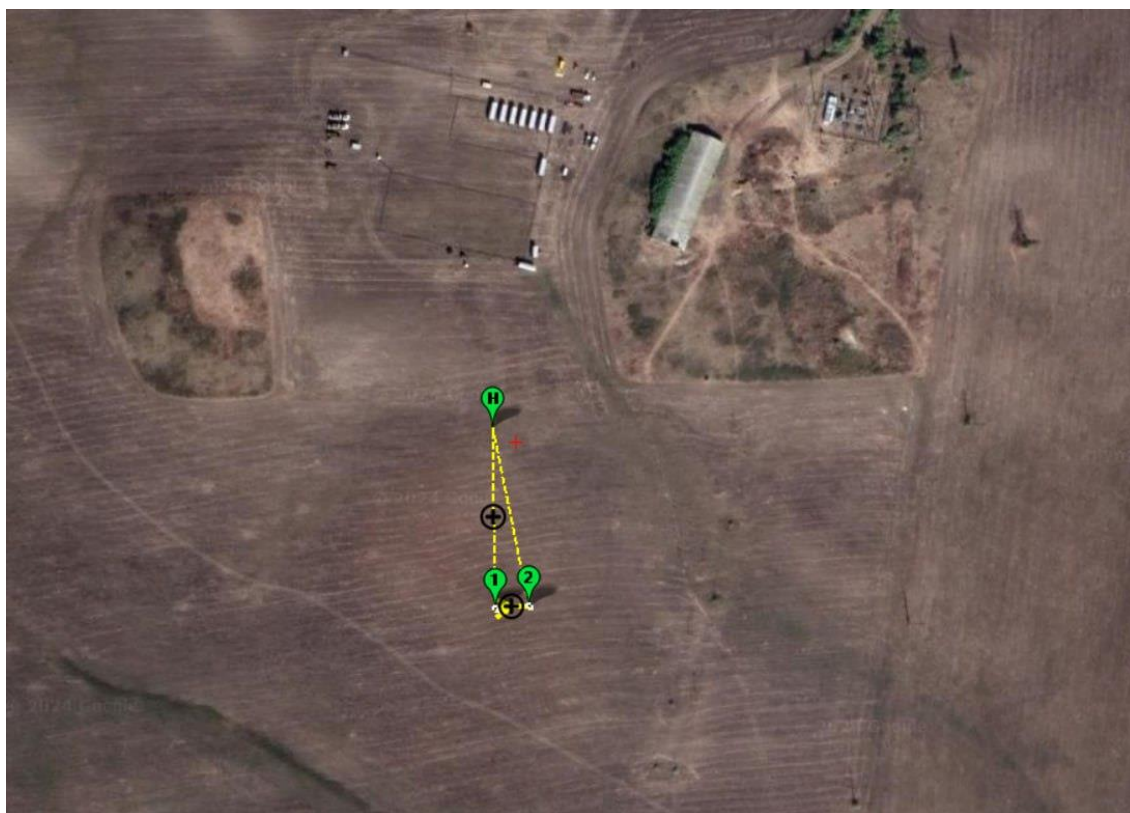


Рис. 1. Траектория движения БВС

В результате проведенного эксперимента с автономным полетом было выявлено:

1. БВС успешно может осуществлять механический захват сейсмического сенсора при отклонении сейсмического датчика от центра БВС на не более 5 см по оси x и по оси y.
2. БВС успешно может осуществлять автономную транспортировку сейсмического сенсора по заданному маршруту при ветровой нагрузке до 12 м/с.
3. Точность работы системы GPS RTK достаточна для первичного подлета в область нахождения сейсмического сенсора, но не достаточна для осуществления посадки и дальнейшего его захвата.
4. Точность работы детектора маркера, расположенного на сейсмическом сенсоре, не позволяет БВС осуществить точную посадку на сенсор при его перекрытии высокой травой или иными визуальными помехами более чем на 30%.
5. Требуется увеличить размер маркера на сейсмическом датчике для посадки на него более чем с 10-ти метров.
6. Неоднородность поверхности влияет на перекрытие радиосигналов с БВС и могут происходить потери данных о полете аппарата, однако это не препятствует конечному выполнению миссии в автономном режиме.
7. Для оперативного управления группой БВС требуется отдельный БВС с ретрансляцией сигнала для обеспечения покрытия площади работы группы.
8. Для обеспечения безопасности полетов БВС требуется лазерная съемка местности для построения актуальной карты высот, на основе которой формируются маршруты движения БВС.
9. Создают проблемы для полета БВС высотные протяженные объекты – вышки связи, ЛЭПы, ВЛС и др. в связи с наличием на них объектов (например, проводов, антенн) сложно детектируемых при полете.

Полеты беспилотных воздушных судов в Республике Башкортостан также требуют согласования, поэтому отдельно приведем хронологический процесс уведомления соответствующих государственных органов и служб:

1. Направлено обращение генеральному директору АО «Башнефтегеофизика» Адиеву Р.Я. № 60-01-01-171 от 26.02.2024 г. с приложением проекта программы полевых испытаний методики регистрации сейсмических данных с помощью беспилотных воздушных средств (в 1 экз. на 7 л.) и визитной презентации СПб ФИЦ РАН (в 1 экз. на 145 л.), за подписью директора СПб ФИЦ РАН А.Л. Ронжина.
2. Получено ответное письмо № 02269/027 от 13.03.2024 г., согласующее данное мероприятие и устанавливающее сроки проведения ОМР, за подписью заместителя генерального директора ДРГ АО «Башнефтегеофизика» А.С. Жужеля.
3. Направлено обращение заместителю Премьер-министра Правительства Республики Башкортостан И.Х. Сагитову № 60-01-01-365/1 от

- 08.05.2024 г. с просьбой о согласовании использования БВС и проведения полетов с вышеописанной целью на территории базы СП-11 (координаты: Ш: 53°47'8.93"С; Д: 54°43'27.20"В), в радиусе 1,5 км в период с 21 мая по 23 мая 2024 г. с указанием ответственного за проведение полетов лица и приложением скан-копии письма АО «Башнефтегеофизика» № 02269/027 от 13.03.2024 г. о проведении опытно-методических работ (на 1 л. в 1 экз.), а также уведомления о постановке на учет БВС (на 1 л. в 1 экз.).
4. Получено ответное письмо с отказом в использовании БВС на территории Республики Башкортостан в соответствии с выпиской из Протокола заседания группы при оперативном штабе Республики Башкортостан по координации вопросов использования БВС на территории региона.
 5. Направлено повторное обращение заместителю Премьер-министра Правительства Республики Башкортостан И.Х. Сагитову № 60-01-01-380 от 16.05.2024 г. с просьбой о согласовании использования БВС и проведения полетов с вышеописанной целью на территории базы СП-11 (координаты: Ш: 53°47'8.93"С; Д: 54°43'27.20"В), в радиусе 1,5 км в период с 21 мая по 23 мая 2024 г. с указанием ответственного за проведение полетов лица и приложением скан-копии письма АО «Башнефтегеофизика» № 02269/027 от 13.03.2024 г. о проведении опытно-методических работ (на 1 л. в 1 экз.), а также уведомления о постановке на учет БВС (на 1 л. в 1 экз.).
 6. Получено ответное письмо № 2-1-388-2146-О-191 от 22.05.2024 г., согласующее использование БВС на территории Республики Башкортостан в соответствии с выпиской из Протокола заседания группы при оперативном штабе № 5/8 от 21.05.2024 г. Республики Башкортостан по координации вопросов использования БВС на территории региона и информирующее о необходимости осведомления территориальных отделов МВД, Управления ФСБ по региону и Управления Росгвардией по региону с указанием контактных номеров телефонов.
 7. Сразу после получения документа, представленного в п. 4, СПб ФИЦ РАН произвел информирование всех представленных органов о проведении полетов на территории региона:
 - УФСБ: устное уведомление дежурного с последующим представлением всех подтверждающих документов по электронной почте и получением подтверждения согласования проведения полетов БВС в электронном формате.
 - УР: устное уведомление дежурного с последующим представлением всех подтверждающих документов по электронной почте и получением подтверждения согласования проведения полетов БВС в устном формате.
 - МВД: устное уведомление дежурного с последующим обращением в канцелярию органа ввиду необходимости

представления всех подтверждающих документов по электронной почте и получением ответа с указанием требования направления пакета документов через электронную систему органа (ввиду принципиальной позиции по отказу принятия документов и письма по электронной почте)

Полеты БВС были успешно проведены в соответствии со следующей информацией, предоставленной территориальным отделам УФСБ, УР и МВД:

Дата проведения полетов БВС: 23.05.2024 г.

Время проведения полетов БВС: 8:00-20:00 (по местному времени)

Место проведения полетов БВС: территория базы СП-11 (координаты: Ш: 53°47'8.93"С; Д: 54°43'27.20"В), в радиусе 1,5 км.

Взаимодействие осуществлялось по следующим контактам:

Заместитель Премьер-министра Правительства Республики Башкортостан Сагитов Ирек Хайривариевич infoaprb@bashkortostan.ru, priemnaya505@bashkortostan.ru

Член группы при оперативном штабе Республики Башкортостан по координации вопросов использования беспилотных воздушных судов на территории Республики Башкортостан Ягафоров Адус Ринатович, +7 347 280 8392.

Генеральный директор АО «Башнефтегеофизика» Адиев Рустем Явдатович, secretary@bngf.ru, zhuzhelAS@bngf.ru.

Главный геофизик АО "Башнефтегеофизика" Гафаров Радий Марсович, gafarovRM@bngf.ru.

Результаты обработки данных, зарегистрированных в ходе экспериментов, методом RTH

1. Данные регистрации АО «Башнефтегеофизика»

Анализ данных и предварительная обработка

Для обработки RTH были переданы 68 сейсмограмм ОПВ, представляющие собой коррелограммы (результат корреляции виброграмм со свипом) длительностью 2 сек. Наблюдения были произведены на 9 позициях источника, на каждой позиции источник отрабатывал по несколько раз. В каждом наблюдении отраженный сигнал принимали 37 приемников. Шаг между позициями источников 25м, между позициями приемников 25м. Схема наблюдения представлена на рис. 4.

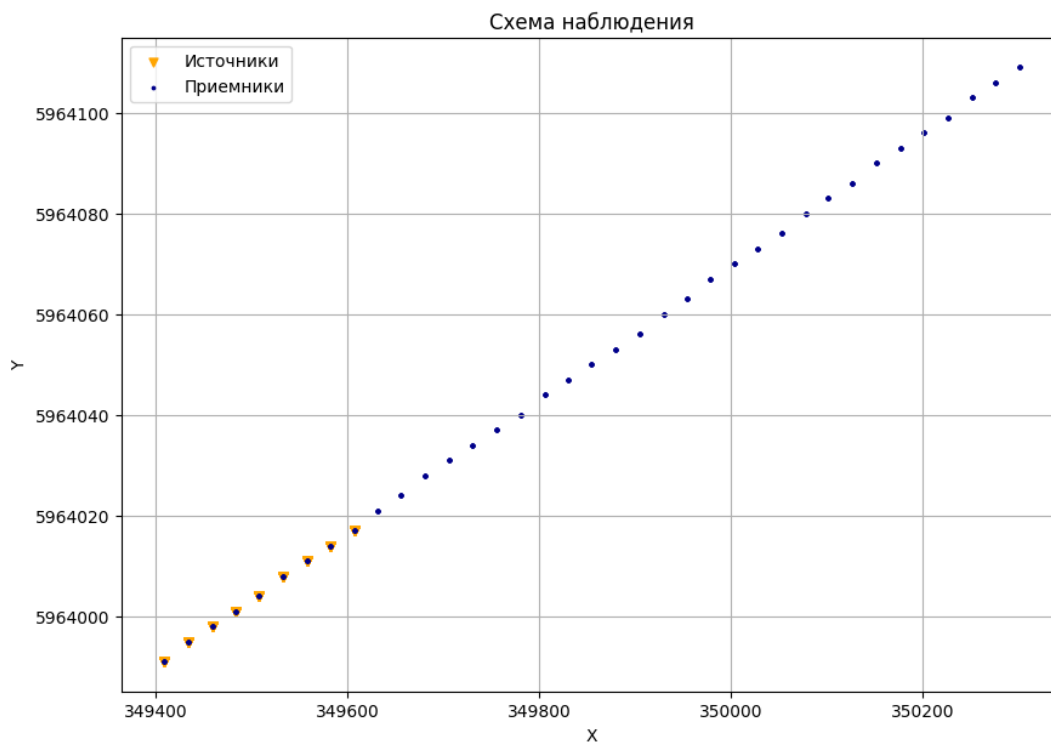


Рис. 4. Схема наблюдения

Коррелограммы и их спектр представлены на рис. 5. Для корректной последующей обработки и ослабления случайных помех, накопления на одинаковых позициях источника были просуммированы (рис. 6)

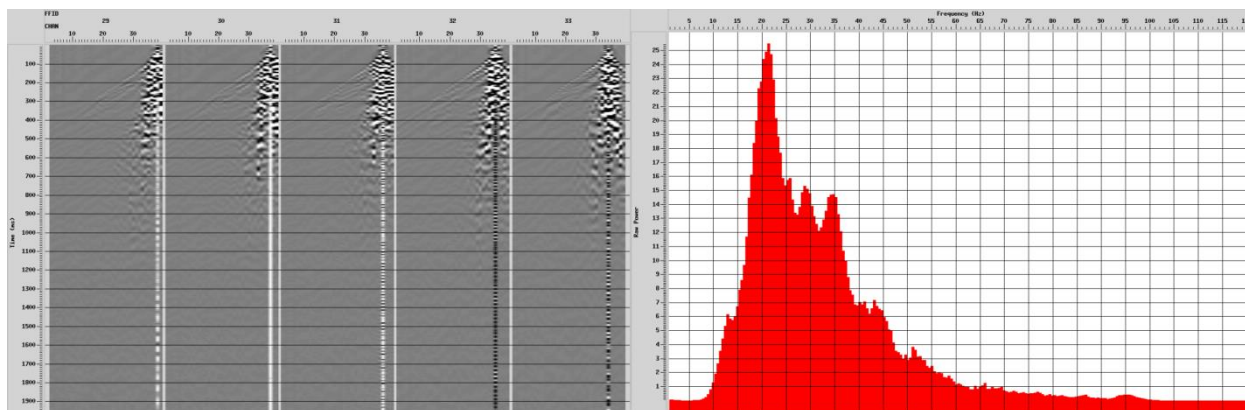


Рис. 5. Коррелограммы и их спектр

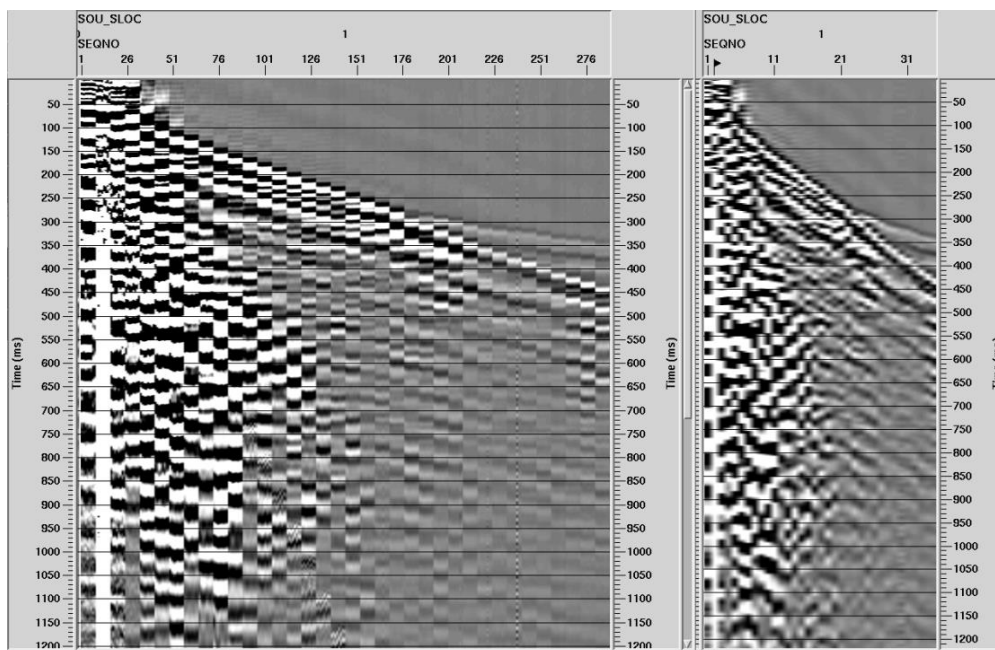


Рис. 6. Коррелогограмма от одной позиции источника до суммирования (слева) и после суммирования (справа)

Далее была проведена экспресс-обработка по методу ОГТ с расчетом средних точек между источником и приемником, бинирования их на сетку с шагом 12.5м (максимальная кратность 9), подавлением помех, оценкой средних скоростей и расчетом глубинной миграции. Некоторые результаты обработки приведены на рисунках 7-10.

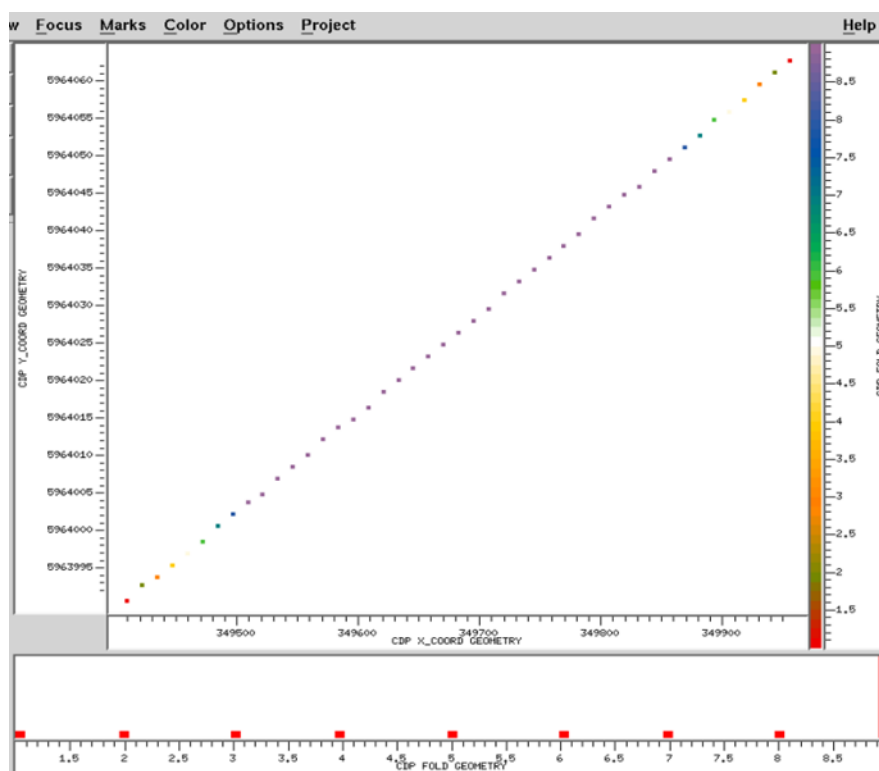


Рис. 7. Карта и гистограмма кратности ОГТ

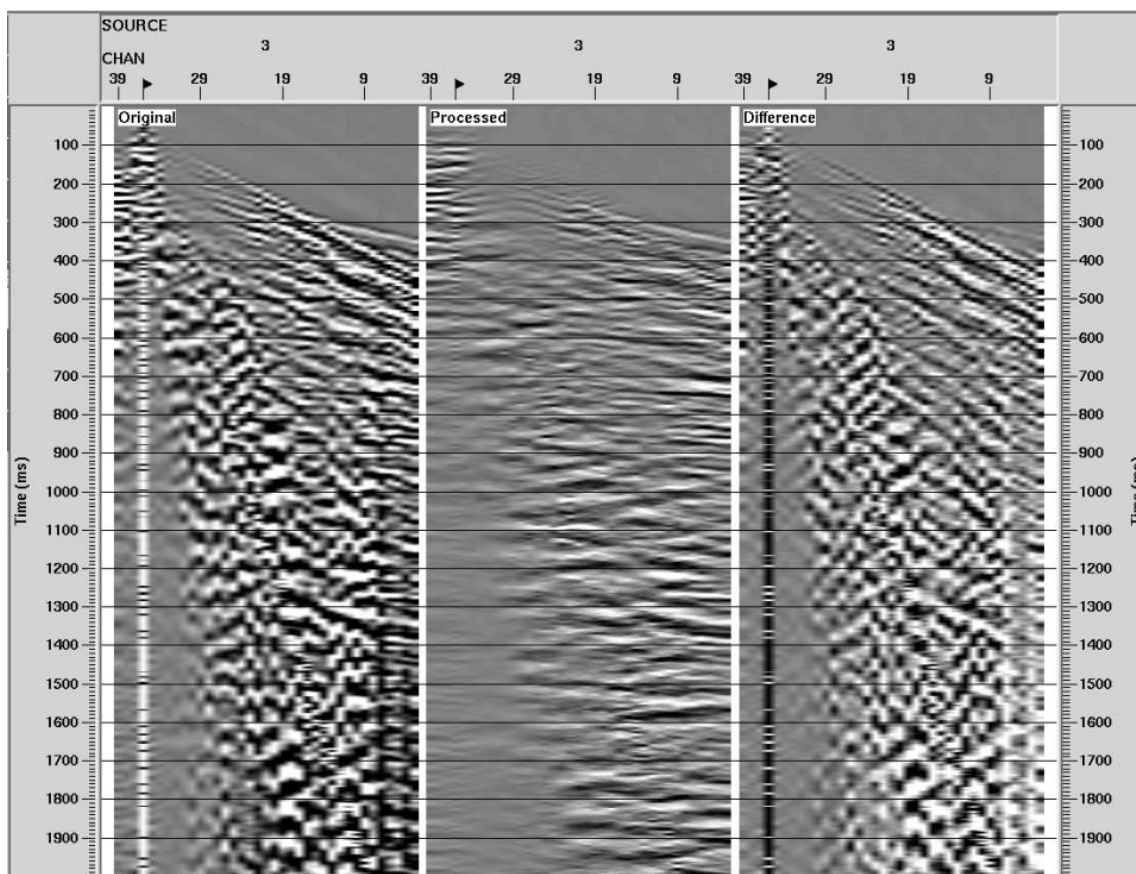


Рис. 8. Подавление помех. Сейсмограмма до применения подавляющих процедур, после применения и разнища

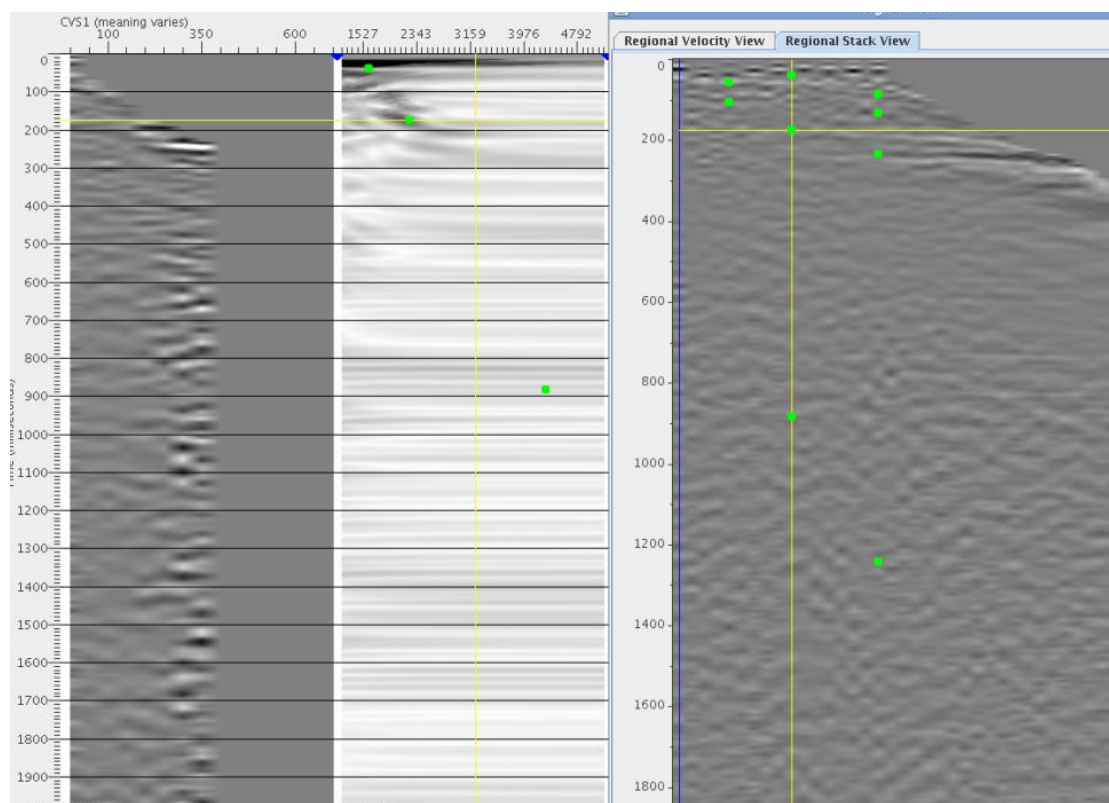


Рис. 9. Анализ средних скоростей по скоростным спектрам. Слева-направо: сейсмограмма ОГТ, вертикальный скоростной спектр, суммарный разрез с текущим скоростным законом

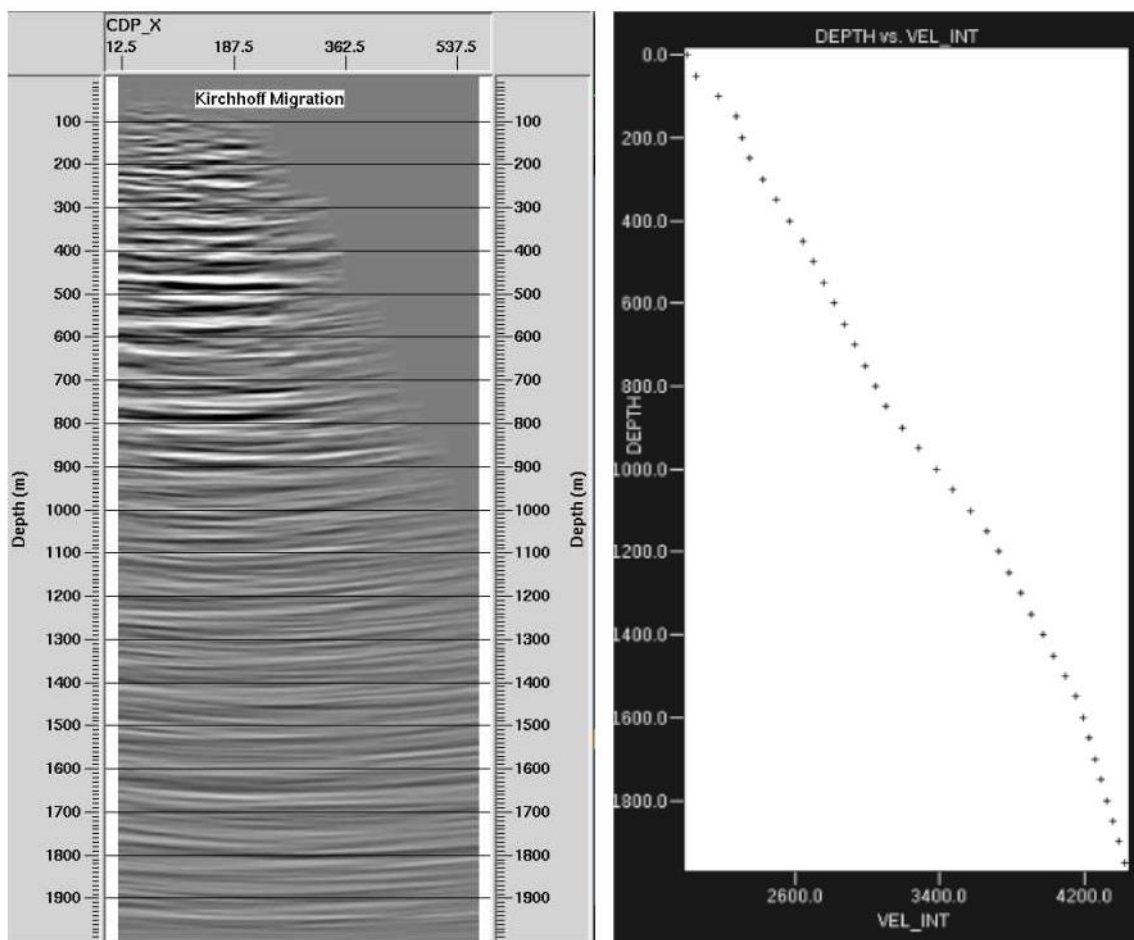


Рис. 10. Глубинная миграция Кирхгофа и оценочная глубинно-скоростная модель.

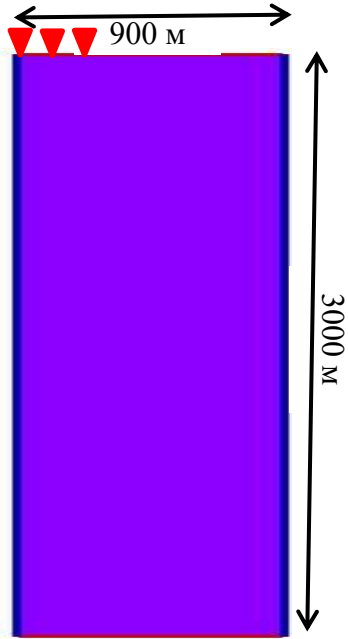
После очистки от помех, выравнивания амплитуд трасс и деконволюции, данные с координатами, спроецированными на линию, были переданы на расчет RTH.

Обработка данных методом RTH

Расчет RTH проводился на сетке 900 метров по латерали и 3000 метров по глубине. Размер ячейки 10x5 метров. Количество отсчетов 90x600.

Первый этап RTH заключается в построении начально-скоростной модели RTH Velocity. На первом шаге взята начальная скорость 3000 м/сек во всем разрезе (рис. 11) и путем итерационной корректировки на 8 шаге получена устойчивая начально-скоростная глубинная модель RTH Velocity, которая в дальнейшем использовалась для вычисления других сейсмических атрибутов RTH (рис. 12).

В эксперименте использовалось 9 источников. Расстояние между источниками составляло 25 метров. Первый источник располагался в левой начальной точке области обработки. Шаг между приемниками составлял также 25 метров. Приемники расположены равномерно по профилю длиной 900 метров. Глубина области исследования 3000 метров. Результаты обработки данных представлены на рис. 13-19.



Скорость постоянная - 3000 м/с

Рис. 11. Начально-скоростная модель. Шаг 1.

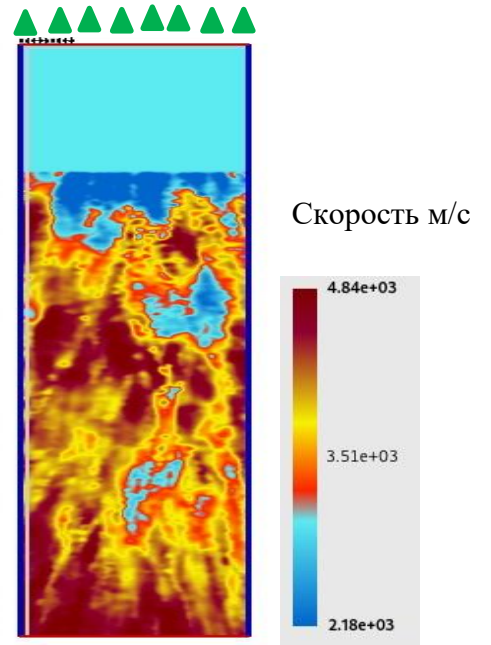


Рис. 12. Уточненная начально-скоростная модель. Шаг 8.

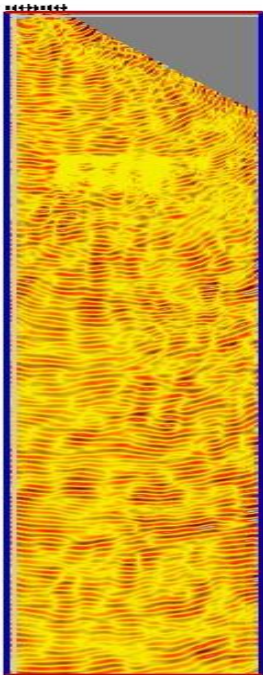


Рис. 13. RTH RTM

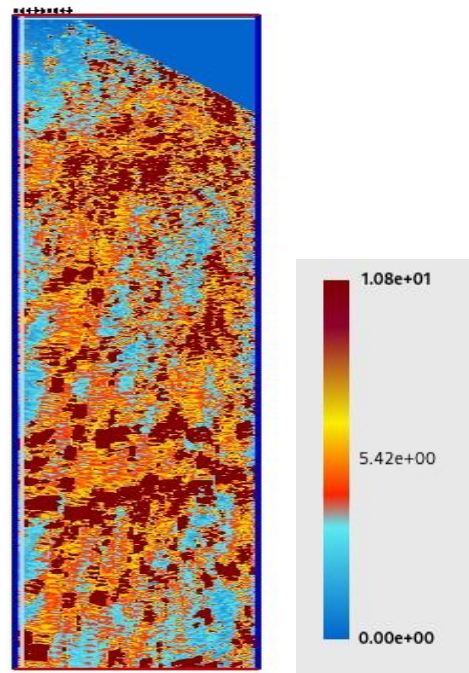


Рис. 14. RTH AVO R0

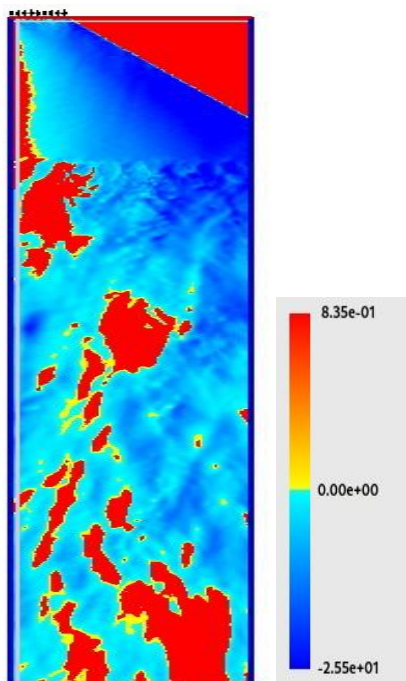


Рис. 15. RTH Opening Angle, град.

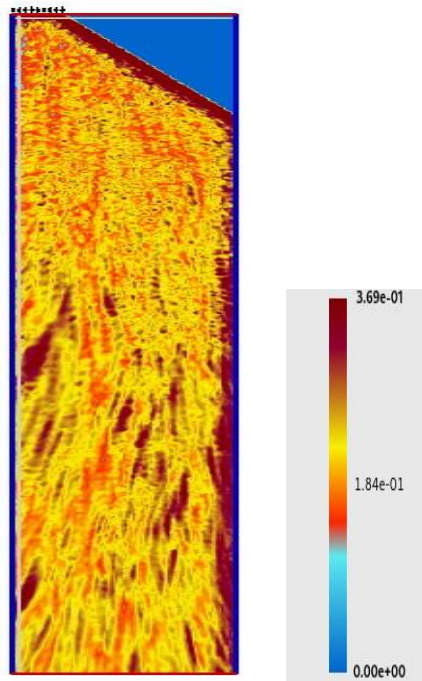


Рис. 16. RTH Semblance

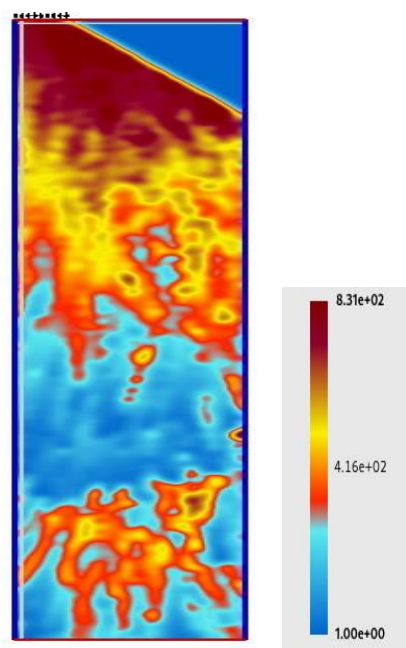


Рис. 17. RTH ATD

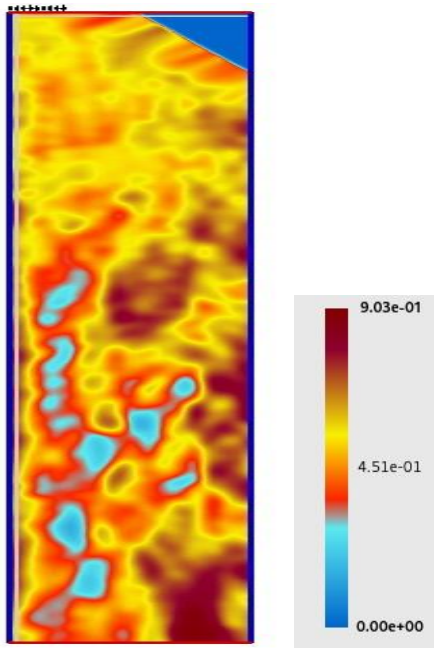


Рис. 18. Diffraction Reflection Ratio

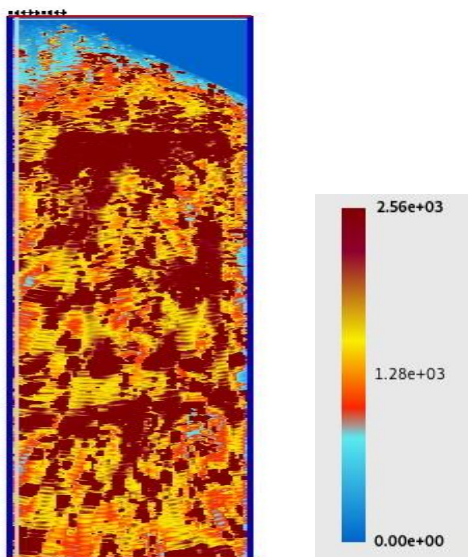


Рис. 19. RTN Impedance Reflection

2. Данные регистрации сенсорами МФТИ ООО «Р-сенсор» Описание методики проведения экспериментов

В ходе испытаний было установлено 35 геофонов на 35 пикетов с шагом 25 метров Wireless Seismic RTSysystem 2. Было выбрано 9 позиций работы вибратора с шагом 25 метров. Алгоритм измерений состоял из следующих шагов:

- 1) Выбирается позиция вибратора.
- 2) Вибратор перемещается в выбранную позицию.
- 3) Происходит работа вибратора в выбранной позиции.
- 4) Затем вибратор перемещается и выполняются пункты 1-3 заново пока все позиции (9 штук) не будут отработаны.
- 5) Затем геофоны компании R-Sensors (5 штук) перемещаются на новые позиции в соответствии с установленным пикетом без пропуска позиций.
- 6) Производится повторение пунктов 1-5 пока все геофоны компании R-Sensors не будут перемещены до конца линии, то есть не снимут данные на всех позициях пикета.

При реализации алгоритма измерений выполнялись следующие процессы:

1. Выбор позиций пикета. Позиции пикета пронумерованы. Формирует расположение позиций главный геофизик совместно с топографами (может быть применен БВС для составления ортофотоплана, карт высот и выбора точек установки).
2. Доставка датчиков на первую точку развертывания линии. Инженер и рабочие.
3. Развертывание датчиков на позициях пикета. Инженер.
4. Подключение первого геофона к приемнику (по беспроводному каналу). Инженер.

5. Подключение приемника к базовой станции (по проводному каналу). Инженер совместно с оператором станции.
6. Подключение геофонов между собой (по беспроводному каналу). Инженер совместно с оператором станции.
7. Перемещение вибратора к началу линии. Водитель вибратора.
8. Выполнение процесса формирования вибраций и съем данных. Совместная работа водителя вибратора, инженера и оператора станции.

Анализ данных и предварительная обработка

Для обработки RTH были переданы 4 виброграммы, полученные с 4 разных датчиков. На каждой виброграмме записан сигнал с разных позиций вибратора и с разных позиций датчика. Оригинальные координаты источников и приемников из переданных SEG-Y файлов, судя по всему, были записаны с ошибками, поэтому были взяты соответствующие координаты из съемки БНГФ, т.к. позиции источников и приемников были теми же самыми. Карты источников и приемников приведены на рис. 20.

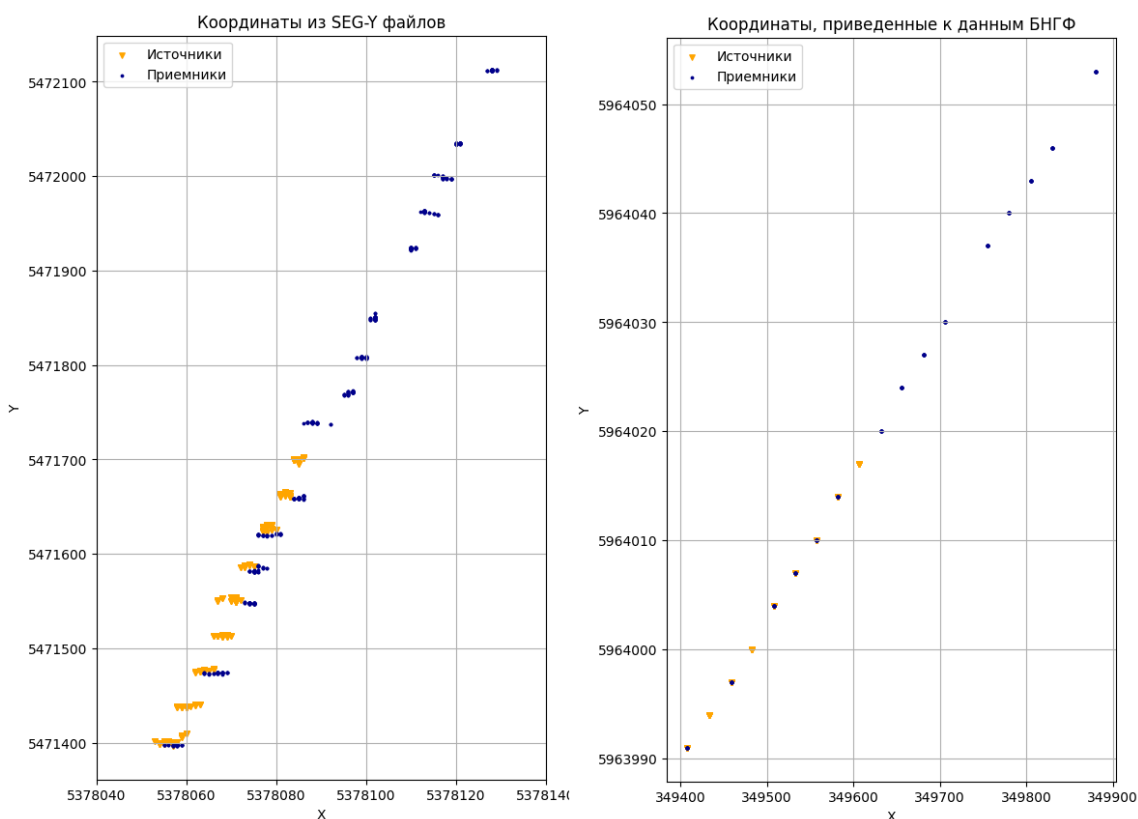


Рис. 20. Схема наблюдения

Свип для получения коррелограмм был взят так же из данных БНГФ. Коррелограммы и их спектр представлены на рис. 21.

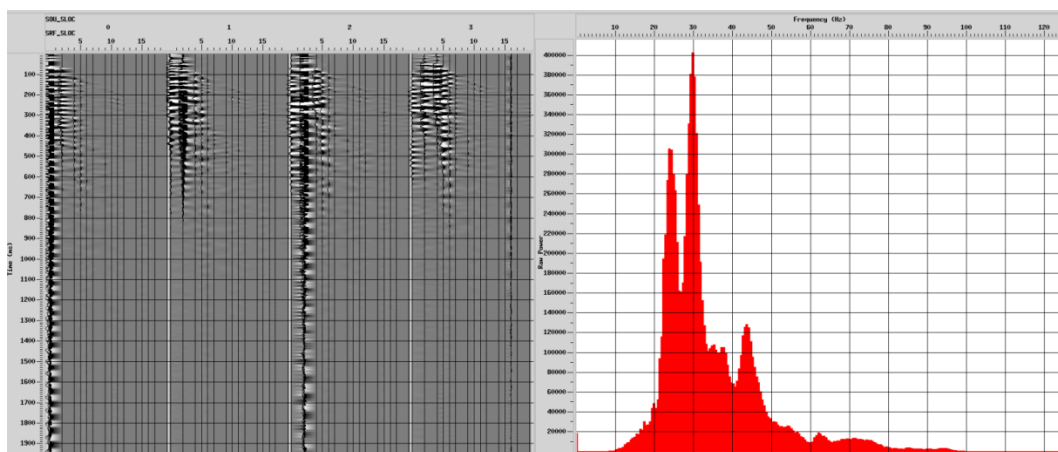


Рис. 21. Коррелограммы и их спектр

Для корректной последующей обработки и ослабления случайных помех, накопления на одинаковых позициях источника были просуммированы (рис. 22).

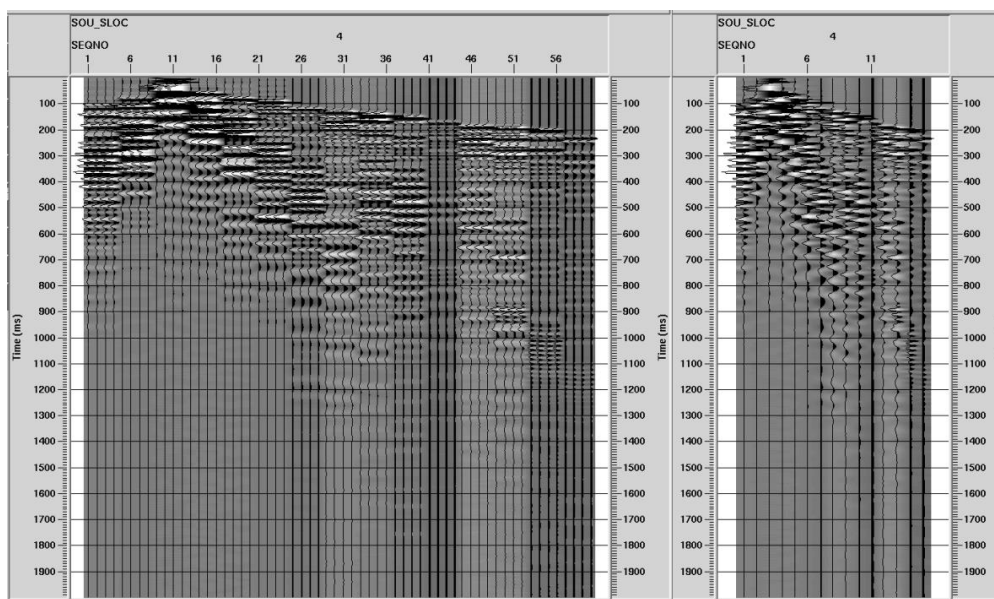


Рис. 22. Коррелограмма от одной позиции источника до суммирования (слева) и после суммирования (справа)

Далее была проведена экспресс-обработка по методу ОГТ с расчетом средних точек между источником и приемником, бинирования их на сетку с шагом 12.5м (максимальная кратность 8, преобладающая 7), подавлением помех и деконволюцией, и расчетом глубинной миграции. Величина кратности съемки и разброс удалений не позволяют сделать сколь либо корректных анализ скоростей, поэтому скорость была взята из обработки

данных БНГФ. Некоторые результаты обработки приведены на рисунках 23-25.

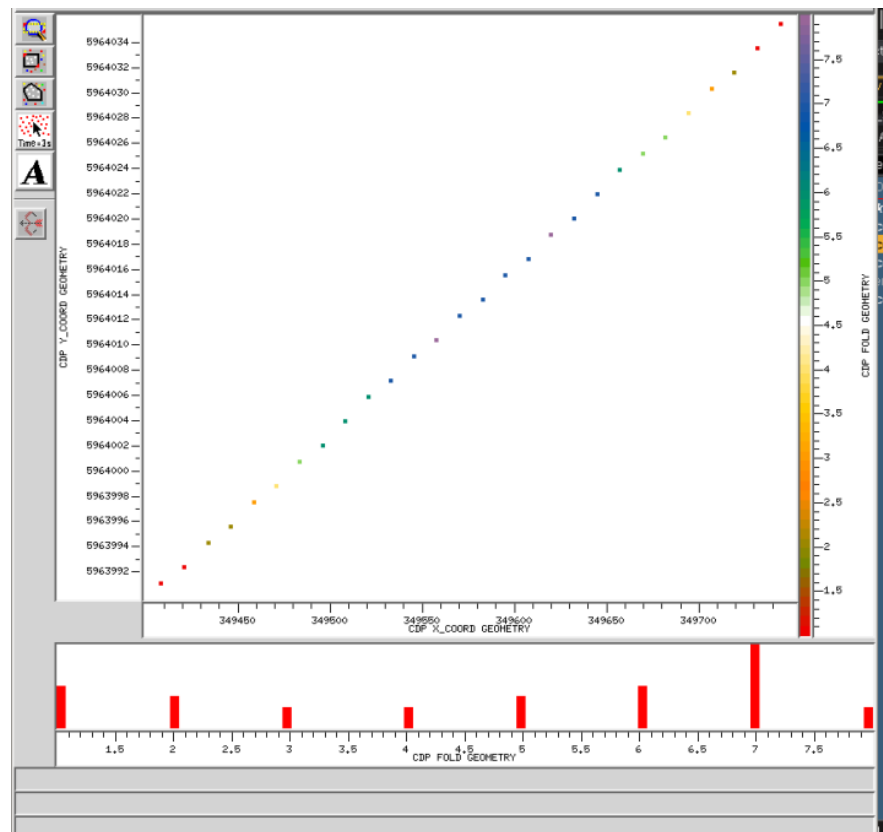


Рис. 23. Карта и гистограмма кратности ОГТ

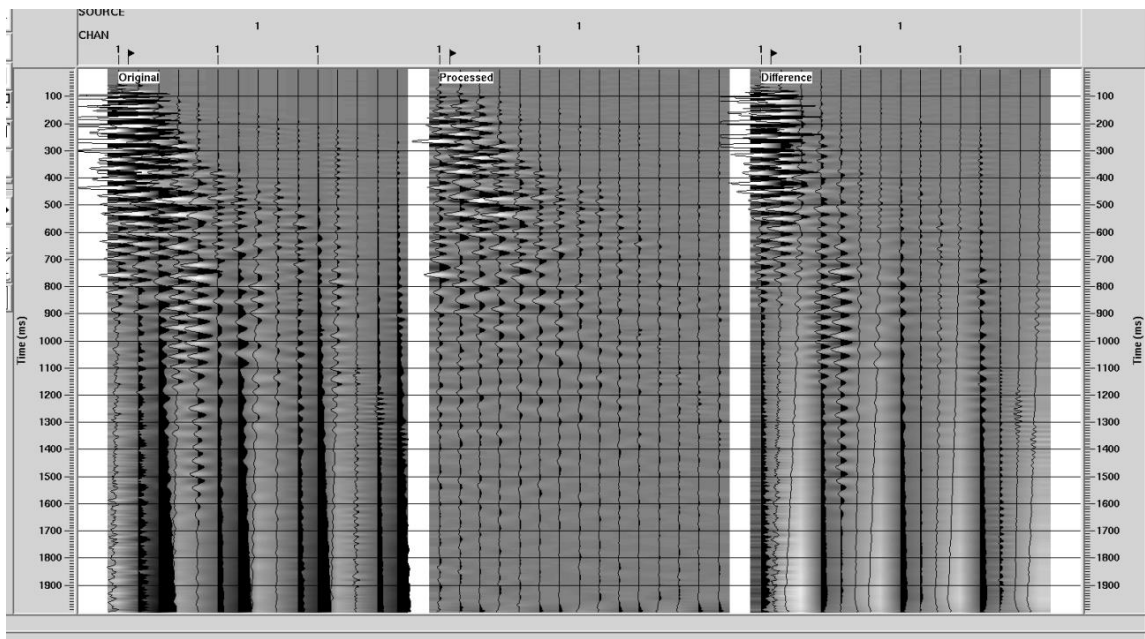


Рис. 24. Подавление помех. Сейсмограмма до применения подавляющих процедур, после применения и разница.

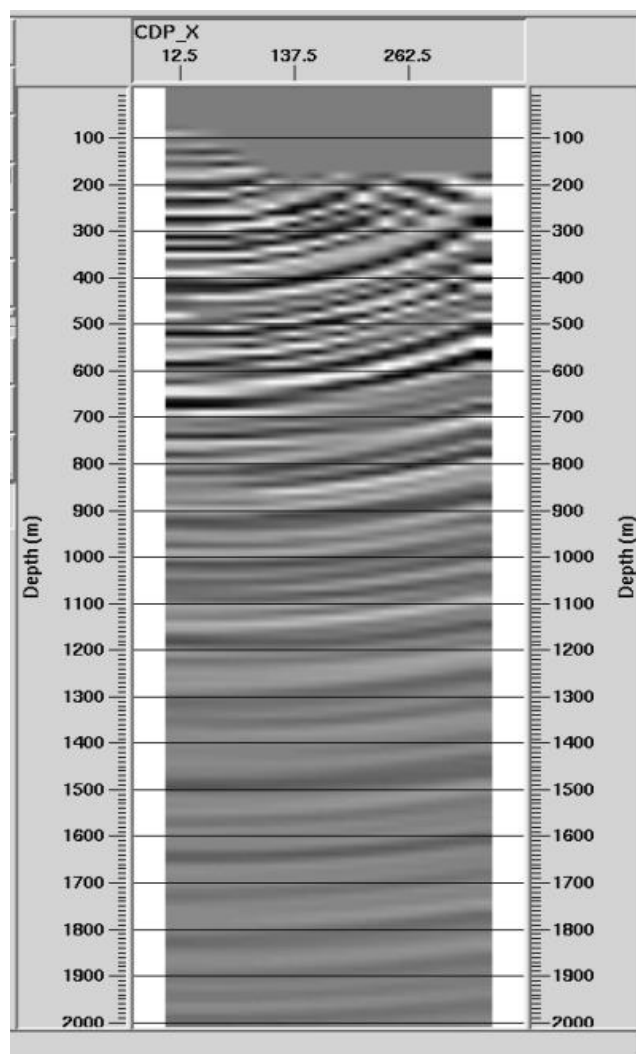


Рис. 25. Глубинная миграция, выполненная в пакете ProMax

После очистки от помех, выравнивания амплитуд трасс и деконволюции, данные с координатами, спроецированными на линию, были переданы на расчет RTH.

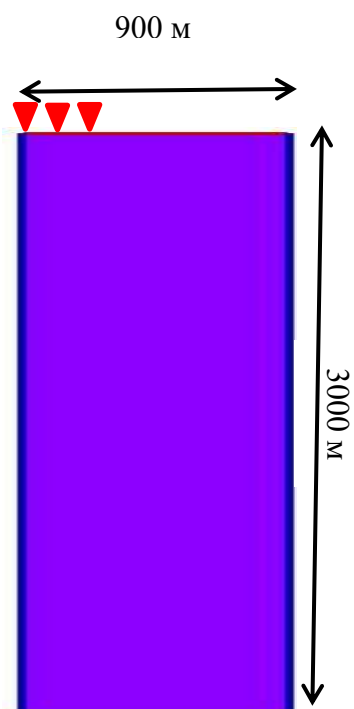
Обработка данных методом RTH

Расчет RTH проводился на сетке 900 метров по латерали и 3000 метров по глубине. Размер ячейки 10x5 метров. Количество отсчетов 90x600.

Первый этап RTH заключается в построении начально-скоростной модели RTH Velocity. На первом шаге взята начальная скорость 3000 м/сек во всем разрезе (рис. 26) и путем итерационной корректировки на 8 шаге получена устойчивая начально-скоростная глубинная модель RTH Velocity, которая в дальнейшем использовалась для вычисления других сейсмических атрибутов RTH (рис. 27).

В эксперименте использовалось 9 источников. Расстояние между источниками составляло 25 метров. Первый источник располагался в левой начальной точке области обработки. Шаг между приемниками составлял также 25 метров. Приемники расположены равномерно по профилю длиной не 900 метров, как в системе регистрации БНГФ, а лишь 700

метров. Глубина области исследования 3000 метров. Результаты обработки данных представлены на рис. 28-34.



Скорость постоянная - 3000 м/с

Рис. 26. Начально-скоростная модель. Шаг 1.

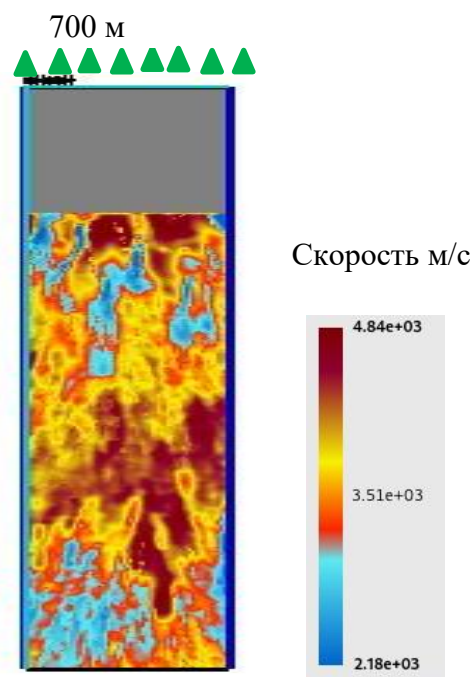


Рис. 27. Уточненная начально-скоростная модель. Шаг 8.

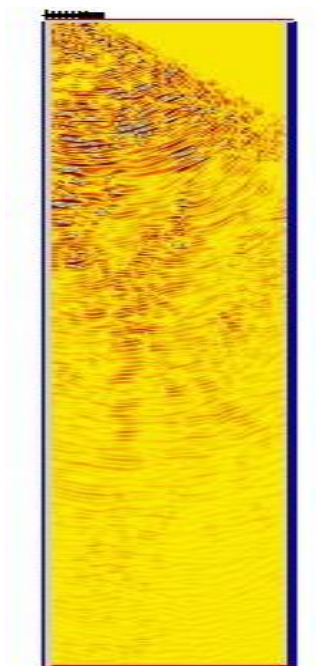


Рис. 28. RTM RTM

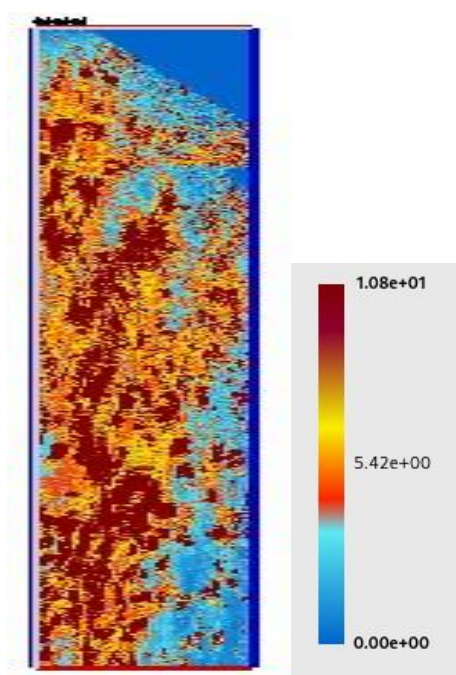


Рис. 29. RTM AVO R0

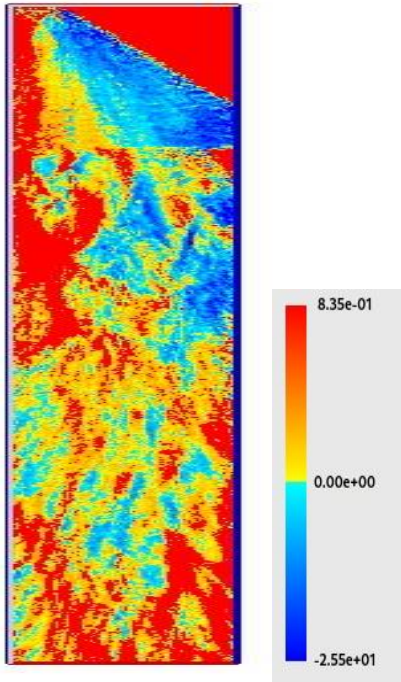


Рис. 30. RTH Opening Angle, град.

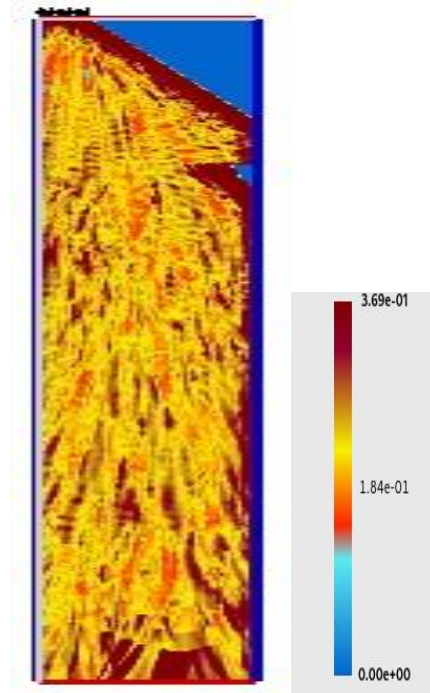


Рис. 31. RTH Semblance

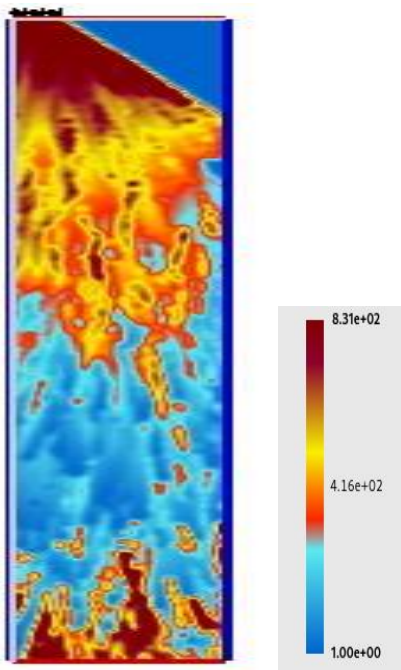


Рис. 32. RTH ATD

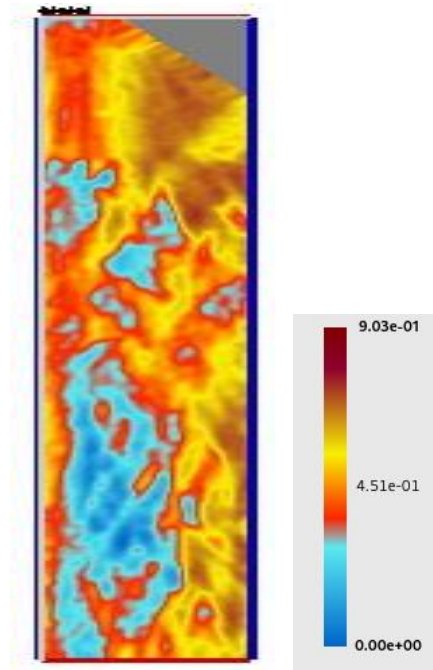


Рис. 33. Diffraction Reflection Ratio

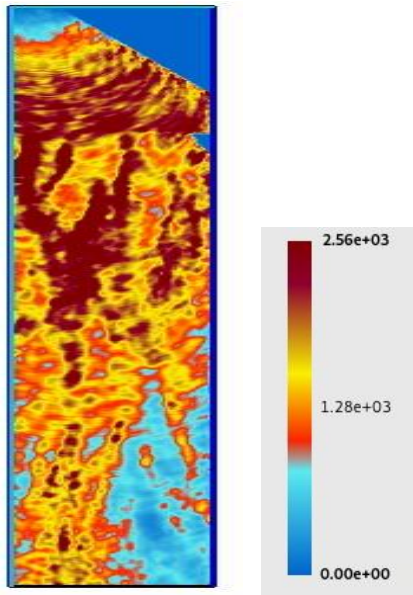


Рис. 34. RTH Impedance Reflection

Таким образом, метод RTH позволяет оценивать сейсмические атрибуты при средней кратности равной 9 и менее, что существенно ниже средних значений кратности, допустимых для промышленной обработки данных ОГТ. Наряду с миграционным глубинным разрезом RTH RTM (RTH Reverse Time Migration) (рис. 13 и 28) достаточно детально, с точностью до размера пикселя 10x5 метров, вычисляются такие сейсмические атрибуты как:

- глубинно-скоростная модель среды RTH Velocity (рис. 12 и 27);
- коэффициент отражения RTH AVO (рис. 14 и 29);
- RTH Opening Angle (рис. 15 и 30);
- RTH Semblance (рис. 16 и 31);
- RTH ATD (Arrival Time Discrepancy) (рис. 17 и 32);
- RTH Diffraction Reflection Ratio (рис. 18 и 33) – дифракционная компонента, связанная с несинхронным рассеянием;
- RTH Impedance Reflection (рис. 19 и 34) - компонента, связанная с синхронным рассеянием.

Приложение. Фото материалы полученные в ходе испытаний сейсмических модулей ООО «Р-сенсор» и беспилотного воздушного судна СПб ФИЦ РАН на учебно-производственной партии АО «Башнефтегеофизика».









