

**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 2023 Г.**

**1. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ВЫСОКОТОЧНОГО РАСЧЕТА ОПОРНОЙ
ВОЛНЫ ОТ ИСТОЧНИКА И «ОБРАТНОЙ» ВОЛНЫ, БЕГУЩЕЙ ОТ
АНТЕННЫ ПРИЕМНИКОВ В ОБРАТНОМ ВРЕМЕНИ, С УЧЕТОМ
ТРЕБОВАНИЯ К ПОВЕРХНОСТНОМУ РАЗМЕЩЕНИЮ
СЕЙСМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ**

В сейсморазведке последние 70 лет, традиционно, используются регулярные системы регистрации, когда расстояние на поверхности земли между приемниками одинаково. Примером такой классической расстановки является система «крест» в технологии сбора данных Общей Глубинной Точки (ОГТ) 3Д, когда приемники и источники располагаются вдоль ортогональных линий [Mayne W.H., 1956, Seismic Surveying. U.S. Patent. No. 2.732.906)]. Вопросы технологичности и экономичности таких промышленных систем «300 метров для линий источников и линий приемников и 50 метров между источниками и между приемниками» для большинства регионов РФ давно уже перестали вызывать сомнения. Это решение считается стандартным и оптимальным для выделения отраженных волн, подавления шума, накопления сигнала и пр. Иногда параметры расстановок уменьшаются, например, с целью получения данных «широко-азимутальной» сеймики или повышения кратности и накопления сигнала, но все в рамках алгоритмов временной или глубинной миграции.

Такие же системы регистрации используются и для выделения рассеянной компоненты волнового поля. Исследования в этой области широко проводились в последние 20 лет в связи с построением методов разделения отраженной и дифракционной составляющих волнового поля [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.], [Moser T.J. and C.B.

Howard, 2008, Diffraction imaging in depth. *Geophysical Prospecting*, 56, 627–641 doi:10.1111/j.1365-2478.2007.00718.x], [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]. Дифракционное рассеяние чаще всего связывалось с нетрадиционными трещинно-кавернозными коллекторами нефти и газа. Создаваемые методы в этой области основывались в основном на модернизации алгоритмов временной или глубинной миграции с точки зрения выделения малых амплитуд дифракторов на фоне сильных отражений. Однако рассеяние — это не только рассеяние по амплитуде. Каждая точка среды, до которой дошло первичное возмущение, является сложным источником вторичного излучения энергии. Пространственно-временная неоднородность этого излучения связана со свойствами волны, достигшей этой точки среды и с физическими свойствами самой среды в этой точке. В акустических и сейсмических средах интегральной характеристикой рассеяния является пространственная или угловая анизотропия, называемая индикатрисой рассеяния. В идеальном случае дифракционного рассеяния на малой неоднородности индикатриса не зависит от угла падения первичной волны и математически описывается сферой. Это одна крайность в модели рассеяния. В случае резкого скачка упругих свойств среды вблизи вторичного рассеяния, например, резкого изменения скорости перпендикулярно некоторому направлению, которое называется нормалью к отражающей площадке, индикатриса рассеяния сжимается в узкий луч вдоль направления, известного как угол отражения. В этом случае совокупность волн вдоль отражающей площадки образует синфазное рассеяние, называемое отраженными волнами. Это другая крайность в модели рассеяния. Именно только эти волны были основным инструментом для изучения структуры земли в течение последних 70 лет и лежат в основе самой известной технологии сейсморазведки ОГТ (Common Depth Point — CDP) [Mayne W.H., 1956, *Seismic Surveying*. U.S. Patent. No. 2.732.906]. Очевидно, что случаи идеального синфазного рассеяния (отражения) не всегда могут описать сложную структуру среды, характеризующуюся, например, трещиноватостью, пористостью, флюидонасыщенностью и т.п. [Yilmaz, Öz *Seismic data analysis*. Society of Exploration Geophysicists. 2001. ISBN 1-56080-094-1]. Вследствие этого разумно допустить, что каждая точка среды, или, другими словами, каждый источник вторичного излучения, может иметь более сложную функцию рассеяния, зависящую, от нескольких переменных, например от угла и частоты (времени). Исследование угловых зависимостей рассеяния является предметом ряда сейсмических технологий, основанных на сейсмограммах общей точки изображения – Angle Domain Common Image Gathers (ADCIG) [Biondo L. Biondi 3D Seismic Imaging, Society of exploration

geophysicists geophysics reprint series, Volume 14, 2006 DOI: 10.1190/1.9781560801689]. Такие угловые зависимости рассеяния традиционно статичны во времени [Koren Z., Ravve I, 2011, Full-azimuth subsurface angle domain wavefield decomposition and imaging Part 1: Directional and reflection image gathers; Geophysics, 76, S1-S13], [Ren Li, Liu Guofeng, Meng Xiaohong, Wang Jun, and Zhang Sheng ,2013, Suppressing Artifacts in 2D RTM Using the Poynting Vector. Near Surface Geophysics Asia Pacific Conference, Beijing, China 17-19 July 2013: pp. 484-487 <https://doi.org/10.1190/nsgapc2013-112>], [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>].

Новый метод обработки данных сейсморазведки RTH (Reverse Time Holography) [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>], [Агафонов В.М., Бугаев А.С., Ерохин Г.Н., Ронжин А.Л. Векторная сейсморазведка в обращенном времени: состояние и перспективы // Геофизика №6 : М. 2022. С .76-82], основанный на обращении времени и двухлучевой интерферометрии позволяет исследовать более сложные модели рассеивания, в частности модели нестационарного рассеяния, когда рассеяние меняется со временем в некоторой малой окрестности момента начала излучения. Такое, простое, на первый взгляд, допущение открывает принципиально новое направление в сейсморазведке, которое можно определить как полноволновая нестационарная сейсморазведка на рассеянных волнах.

Метод обработки сейсмических данных в RTH является дальнейшим развитием, с учетом векторной природы сейсмической информации, метода Reverse Time Migration (RTM) [Whitmore, N. D., 1983, Iterative depth migration by backward time propagation:53th Annual International Meeting, SEG, Extended Abstracts,382–385]. Отличие состоит в способе декомпозиции данных общей точки взрыва (ОТВ) в данные общей точки изображения (ОТИ). В RTM данные ОТИ имеют размерность параметров 2, тогда как в RTH они имеют размерность параметров 8. Данные, декомпозированные методом RTH, образуют множество, которое носит название Vector Domain Common Image Gathers (VDCIG) [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>]. Оно значительно мощнее аналогичного множества ADCIG, что существенно расширяет класс, рассматриваемых моделей рассеяния и обеспечивает гиператрибутивность метода RTH [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>],

[Агафонов В.М., Бугаев А.С., Ерохин Г.Н., Ронжин А.Л. Векторная сейсморазведка в обращенном времени: состояние и перспективы // Геофизика №6 : М. 2022. С.76-82]. Общее количество сейсмических атрибутов, получаемых на основе оценки многомерного (10 – мерного) статистического распределения в RTN достигает нескольких сотен [Erokhin Gennady, 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>]. Метод RTN включает в себя, как частный случай, методы, основанные на общей точки изображения – Angle Domain RTM [Biondo L. Biondi 3D Seismic Imaging, Society of exploration geophysicists geophysics reprint series, Volume 14, 2006 DOI: <https://doi.org/10.1190/1.9781560801689>], методы дифракционного анализа ES 360 [Koren Z., Ravve I, 2011, Full-azimuth subsurface angle domain wavefield decomposition and imaging Part 1: Directional and reflection image gathers; Geophysics, 76, S1-S13], CSP [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], методы угловой анизотропии отражения – Amplitude versus Offset (AVO), акустической инверсии [Arild Buland and Henning More, Bayesian linearized AVO inversion, GEOPHYSICS volume 68, issue 1Jan 1, 2003, <https://doi.org/10.1190/1.1543206t>], [Daniel P. Hampson, Brian H. Russell and Brad Bankhead, Simultaneous inversion of pre-stack seismic data, SEG Technical Program Expanded Abstracts 2005 Dec 7, 2005, <https://doi.org/10.1190/1.2148008>], скоростной томографии на основе полноволновой инверсии [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>.] и на основе шнуровых решений [Tanushev Nick, Alexander Mihai Popovici and Sean Hardesty, Fast, high-resolution beam tomography and velocity-model building, The Leading Edge, February 2017 <http://dx.doi.org/10.1190/tle36020140.1>]. RTN обеспечивает выполнение скоростной томографии высокого пространственного разрешения.

Другая особенность RTN состоит в способе оценки атрибутов. Оно, в отличие от метода RTM, где информация сворачивается интегрированием по времени и источникам по формуле Imaging Condition [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>.], осуществляется для каждого пространственного вокселя на основе оценки параметров многомерного статистического распределения событий в VDCIG. Вследствие этого RTN является воксельно-ориентированным подходом устойчивым к нерегулярной и

разреженной системе регистрации. Под вокселем, в данном случае, будем понимать элемент объёмной среды (изображения), содержащий значение расчетного атрибута в трёхмерном пространстве, т.е. некоторый параллелепипед пространства заданного единичного объёма. Воксели являются аналогами двумерных пикселей для трёхмерного пространства. При численных реализациях воксель является узлом численной схемы, при этом пространственные размеры вокселя по глубине и латерали могут не совпадать.

Как отмечалось выше, методы векторной сейсморазведки основываются на технологиях обращения волновых фронтов во времени и анализу поведения векторов нормали к ним. В рамках проведенных ранее проведен анализ существующих подходов распространения волновых фронтов. Остановимся более подробно непосредственно на математических моделях распространения волн.

1.1. Математические основы волнового обращения и векторного анализа распространения волновых фронтов

В каждой точке пространства акустической среды существует пара взаимосвязанных векторов, характеризующихся собственными амплитудами, фазами, частотами, которые изменяются во времени и зависят от координат источников. Поведение вектора обратного рассеяния в каждой точке акустического пространства зависит только от свойств среды вблизи этой точки. Падающий сигнал в определенной точке пространства можно рассматривать как вход в определенный «черный ящик» (среду), а выход представляет собой сигнал обратного рассеяния. Каждый тестовый сигнал на входе такого черного ящика будет называться событием. Очевидно, что количество таких событий для каждой точки среды определяется временем выборки, количеством источников и может достигать нескольких десятков тысяч. В этом случае каждое событие для двумерной акустической среды имеет свои координаты в шестимерном пространстве: время, номер источника, амплитуда прямой волны, амплитуда обратной волны, фаза угла падения α , фаза угла рассеяния β . Для трехмерной акустической среды такие события будут иметь на два измерения больше из-за дополнительных двух пространственных углов. Таким образом, события для трехмерной акустической среды будут локализованы уже в восьмимерном пространстве. В случае трехмерной упругой среды события локализуются в 12-мерном пространстве.

Рассмотрим прямую задачу для трехмерного акустического уравнения:

$$\frac{1}{\rho c^2} u_{tt} = \operatorname{div} \left(\frac{1}{\rho} \nabla u \right) + \delta(x - x_s) \delta(x_3) f(t), R_+^3 \times (0, T),$$

$$R_+^3 = \{x \in R^3 \mid x^3 := z > 0\},$$

$$u(x, 0) = 0, u_t(x, 0) = 0,$$

где ρ – плотность, c – скорость звука, $\delta(x)$ – функция Дирака, $f(t)$ – импульс Рикера с доминирующей частотой 40 Гц (рис. 1). Иногда также используются обозначения $x = x_1$, $y = x_2$, $z = x_3$.

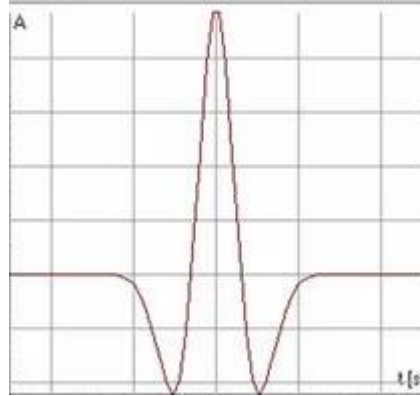


Рисунок 1 – Импульс Рикера

Для упрощения записи сведем указанные условия к системе обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка для давлений и скоростей выполнив замену $p = u_t$ и $v = \nabla u / \rho$:

$$\frac{1}{\rho c^2} p_t = \text{div}(v) + \delta(x - x_s) \delta(z) f(t),$$

$$v_t = \frac{1}{\rho} \nabla p$$

Для численных расчетов будем использовать следующую конечно-разностную схему:

$$\left(\frac{1}{\rho c^2} \right)_{i,j,k} \frac{p_{i,j,k}^{l+\frac{1}{2}} - p_{i,j,k}^{l-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = (D_x v_1)_{i,j,k}^l + (D_y v_2)_{i,j,k}^l + (D_z v_3)_{i,j,k}^l,$$

$$\frac{(v_1)_{i+\frac{1}{2},j,k}^{l+1} - (v_1)_{i+\frac{1}{2},j,k}^l}{\Delta t} = \left(\frac{1}{\rho} \right)_{i,j,k} (D_x p)_{i,j,k}^{l+\frac{1}{2}},$$

$$\frac{(v_2)_{i,j+\frac{1}{2},k}^{l+1} - (v_2)_{i,j+\frac{1}{2},k}^l}{\Delta t} = \left(\frac{1}{\rho} \right)_{i,j,k} (D_y p)_{i,j,k}^{l+\frac{1}{2}},$$

$$\frac{(v_3)_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{l+1} - (v_3)_{i,j,k+\frac{1}{2}}^l}{\Delta t} = \left(\frac{1}{\rho} \right)_{i,j,k} (D_z p)_{i,j,k}^{l+\frac{1}{2}},$$

где D_x , D_y и D_z – аппроксимации частных производных (будем использовать 12-й порядок аппроксимации):

$$(D_x f)_{i,j,k} = \frac{1}{\Delta x} \sum_{l=1}^6 a_l \left(f_{i+(l-\frac{1}{2}),j,k} - f_{i-(l-\frac{1}{2}),j,k} \right) + O(\Delta x^{12}),$$

$$(D_y f)_{i,j,k} = \frac{1}{\Delta y} \sum_{l=1}^6 a_l \left(f_{i,j+(l-\frac{1}{2}),k} - f_{i,j-(l-\frac{1}{2}),k} \right) + O(\Delta y^{12}),$$

$$(D_z f)_{i,j,k} = \frac{1}{\Delta z} \sum_{l=1}^6 a_l \left(f_{i,j,k+(l-\frac{1}{2})} - f_{i,j,k-(l-\frac{1}{2})} \right) + O(\Delta z^{12}),$$

где a_k – соответствующие коэффициенты Тейлора. Временной шаг удовлетворяет условию Куранта:

$$\Delta t < \frac{\Delta x}{c_{max} \sqrt{3}}.$$

Для обеспечения затухания волны на границе среды используются – идеально согласованные слои (Perfect Matched Layers, PML). Пусть ν – единица измерения, перпендикулярная некоторой границе (она может быть изогнутой). Разложим оператор ∇ на сумму:

$$\begin{aligned} \nabla &= \nabla^\perp + \nabla^\parallel, \\ \nabla^\perp &= (\nu, \nabla) \nu, \nabla^\parallel = \nabla - \nabla^\perp. \end{aligned}$$

Выполним декомпозицию для дивергенции:

$$\begin{aligned} div &= div^\perp + div^\parallel, \\ div^\perp f &= \nabla^\perp \cdot f^i, div^\parallel f = \nabla^\parallel \cdot f^i. \end{aligned}$$

Тогда уравнения в PML принимают вид (по отношению к $p^\perp, p^\parallel, v^\perp, v^\parallel$):

$$\frac{1}{\rho c^2} p_t^\perp + \frac{1}{\rho c^2} \alpha p_t^\perp = div^\perp v,$$

$$\frac{1}{\rho c^2} p_t^\parallel = div^\parallel v,$$

$$v_t^\perp + \alpha v = \frac{1}{\rho} \nabla^\perp p,$$

$$v_t^\parallel = \frac{1}{\rho} \nabla^\parallel p,$$

где $p = p^\perp + p^\parallel$, $v = v^\perp + v^\parallel$, а α – функция демпфирования. Это гладкая функция, равная 0 на внутренней границе PML и монотонно возрастающая в направлении внешней границы PML:

$$\alpha(x) = \frac{(n+1)c_{max}}{2\delta} \log\left(\frac{1}{R}\right) \left(\frac{x-x_0}{\delta}\right)^n,$$

где α – ширина PML. При расчетах использовались следующие значения параметров: $\delta = 20 \cdot \Delta x$, $R = 10^{-4}$, $n = 2$.

Математические формулы расчета «обратной» волны не имеют существенного отличия, кроме того, что в качестве импульса выступает не импульс Рикера, а сейсмический сигнал приемников в обратном времени.

Основываясь на данных математических моделях, был разработан программный комплекс, состоящий из нескольких алгоритмических блоков. Рассмотрим их подробнее.

1.2. Программно-алгоритмический модуль высокоточного расчета «обратной» волны 2D сейсмических данных

По результатам полевых работ и предварительной обработки данных формируется файл в формате SGY. В данных содержатся записи сейсмического возбуждения, которые зарегистрированы для каждого из источников и группы приемников. При этом на местности используется предварительная расстановка приемников и для разных источников могут использоваться одни и те же приемники. В силу технологии полевых работ источники возбуждения запускаются не одновременно, а по очереди независимо друг от друга. Таким образом, задача расчета «обратной» волны может решаться независимо для каждого источника.

Исходя из выше сказанного, получаем задачу разработки алгоритмов и программных средств распространения волны в обратном времени от группы источников в некоторой моделируемой сейсмической среде. Для 2D данных задача существенно проще, так как источники и приемники расположены вдоль линии профиля с некоторым регулярным шагом. В процессе анализа реальных сейсмических данных было замечено, что регулярность шага расстановки источников и приёмников довольно условна, так как не всегда может быть реализована в силу особенностей ландшафта. Кроме этого, рельеф местности так же вносит существенную корректировку в реальное размещение источников и приемников.

Ранее были предложены теоретические подходы к расчету «обратной» волны, которые кратко можно свести к следующему алгоритму:

1. Для расчетов используется некоторая модель с регулярным шагом по осям X и Z в прямоугольной системе координат.
2. Для расчетного профиля предварительно задается скоростная модель, полученная на основе эмпирических данных или предварительной оценки сейсмических данных.
3. Аналитическим способом выполняется расчет «задержки», то есть времени прохождения сигнала в заданной скоростной среде от источника до конкретной точки на расчетном профиле.
4. Выполняется расчет прохождения «обратной» волны в заданной скоростной среде и регистрация расчетных данных для каждой точки в некоторой окрестности времени от рассчитанной «задержки» для каждого источника.

Заметим, что выполнение расчетов осуществляется итерационным способом с шагом по времени. При этом расчетный шаг по времени должен быть достаточными для прохождения фронта волны между расчетными узлами.

Существует прямая зависимость между размером пространственной сетки и размером временного шага. Для расчетов с размером сетки 25×5 м итерационный шаг времени должен быть не менее 0.4 мс, а для высокоскоростной среды не менее 0.2 мс. При этом полевой шаг регистрации составляет $1-2$ мс. В рамках экспериментов были рассмотрены два подхода повышения временного разрешения исходного сейсмического сигнала:

1. Расчет на необходимом итерационном временном разрешении с пониженной «подстановкой» полевых данных. При данном способе происходит расчет с заданным шагом, а вставка полевого сигнала в узлы расположения приемников выполняется с частотой полевой регистрации, т.е. не при каждой итерации.
2. Интерполяция исходного полевого сигнала на расчетную частоту. При данном способе были рассмотрены различные варианты интерполяции исходных данных, но классическая математическая полиномиальная интерполяция и интерполяция сплайнами давали неудовлетворительные результаты. В итоге была выбрана интерполяция через прямое и обратное разложение Фурье с повышением разрешения по времени.

В ходе проведенных численных экспериментов было выявлено, что оба описанных способа дают удовлетворительные результаты и могут применяться на практике.

Для расчета «задержек» разработан программный блок, который позволяет проводить аналитические расчеты для градиентной скоростной среды и численно-аналитические расчеты для кусочно-градиентной среды.

Реализация расчетного алгоритма распространения волны на смещенных сетках была выполнена с использованием технологии параллельного программирования OpenMP. Распараллеливание осуществлялось в рамках отдельной итерации через независимый расчет для каждой точки. В связи с относительно небольшим объемом расчетов для 2D сейсмических данных существенных затруднения при размещении необходимых массивов не возникало. На рисунке 2 приведена блок-схема численной реализации расчетного блока распространения обратной волны для одного источника.

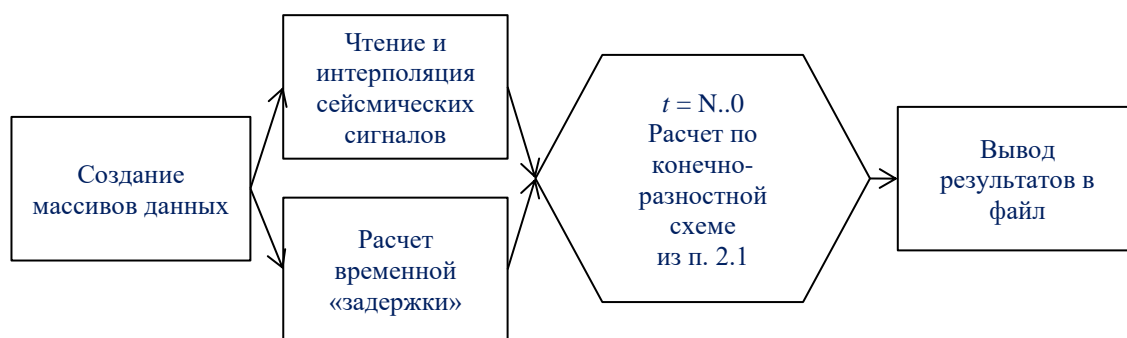


Рисунок 2 – Схема расчетного блока распространения волны в «обратном» времени

Для увеличения скорости обработки данных при высокой степени параллельности алгоритма целесообразно перенесение расчетов на графические процессоры. Вычисления на графических процессорах (GPU) используется, как правило, для компьютерной графики. Обычные вычисления традиционно проводятся центральным процессором (CPU). Использование нескольких видеокарт в одном компьютере или большого количества графических чипов дополнительно увеличивает скорость обработки данных [General-purpose computing on graphics processing units - Wikipedia. Электронный ресурс. https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.c2cbca80-648079f3-24ba5b94-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/General-purpose_computing_on_graphics_processing_units Дата обращения: 04.06.2023]. По сути, конвейер GPU – это разновидность параллельной обработки между одним или несколькими графическими процессорами. Хотя графические процессоры работают на более низких частотах, они обычно имеют во много раз большее количество ядер. Таким образом, графические процессоры могут обрабатывать гораздо больше данных в секунду, чем традиционный центральный процессор

Решение вычислительной задачи «обратной» волны требует многократного итерационного пересчета двумерного массива достаточно большой размерности. При этом отдельные точки, на каждой итерации, рассчитываются независимо, что позволяет легко распараллелить вычислительный процесс.

При расчете на GPU, в силу физических особенностей устройства, необходимо использовать алгоритмы с наименьшим числом ветвлений. Связано это с тем, что одно устройство управления осуществляет контроль за несколькими арифметико-логическими устройствами (32–128). Таким образом, при ветвящихся алгоритмах во время расчета одного из вариантов ветвления потоки блока могут простаивать. Другой проблемой расчета на GPU является необходимость копирования данных из оперативной памяти на видеокарту, что увеличивает время обработки. Так же относительно небольшой объем оперативной памяти видеокарты не позволяет оперировать размещением данных так же, как при расчете на CPU.

Построение архитектур GPU в современных видеокартах дает существенный прирост производительности при обработке чисел с плавающей точкой одинарной точностью, так как в одном физическом расчетном блоке GPU содержится до 128 потоков float и всего лишь пара потоков двойной точности.

Из выше сказанного можно сделать следующие выводы:

1. Обработка данных на GPU должна осуществляться с одинарной точностью.
2. При обработке предпочтительней многократный запуск блоков, а не ветвление алгоритмов.
3. На видеокарте следует размещать только расчетные данные, а результирующие, при достаточно большом объеме, копировать в основную оперативную память.

Анализ разработанных алгоритмов расчета «обратной» волны для 2D сейсмических данных в версии CPU показал, что в целом алгоритм удовлетворяет перечисленным выше критериям кроме расчета на границах области. Связано это с тем, что для численного моделирования прохождения волны используется 12 узловая сетка, которая позволяет сглаживать эффект прохождения, а на границах области используется 2-3-х узловая сетка. Для устранения данной проблемы расчет был разделен на две части, запускаемые последовательно: расчет основной части и расчет на границах.

Хотелось бы отметить, что в версии CPU ветвление алгоритма не играло особой роли, так как распараллеливание цикла по пространству осуществлялось в динамическом режиме, что предотвращало простаивание потоков обработки. В версии же для GPU, в силу физического построения блока, замедление расчета могло достигать до 50%.

Опираясь на выше сказанное, был разработан программный модуль расчета «обратной» волны для версии GPU. В данный модуль были добавлены следующие расчетные блоки:

1. Выделение памяти на видеокарте под расчетные массивы и исходные данные.
2. Копирование исходных данных на видеокарту из основной оперативной памяти.

3. Расчетный итеративный блок на видеокарте, включающий следующие блоки (рис. 3):
 - a. Копирование данных в узлы расчетной сетки (запуск 1 расчетного ядра).
 - b. Расчетный блок (запуск 10 расчетных ядер).
 - c. Копирование значений расчетов в узлах целевой области (запуск 1 расчетного ядра).
 - d. Копирование данных с видеокарты в основную оперативную память.
4. Освобождение памяти на видеокарте.

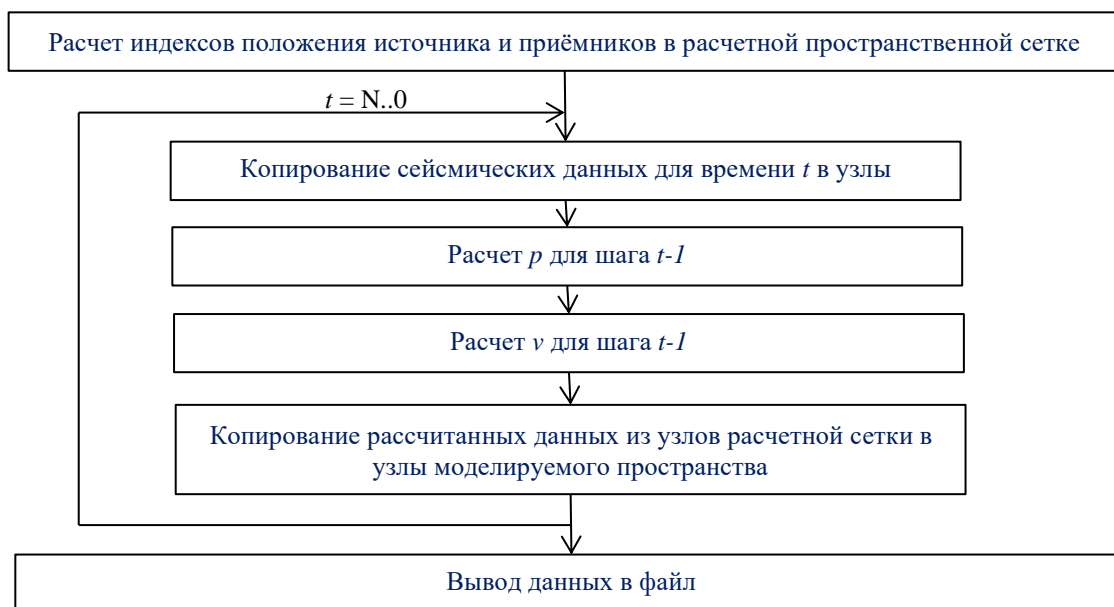


Рисунок 3 – Схема итерационного блока расчета распространения волны

В рамках проведенных численных экспериментов было выявлено, что ускорение скорости обработки одного источника в версии GPU может составлять до 400 раз на одной и той же рабочей станции.

1.3. Программно-алгоритмический модуль высокоточного расчета «обратной» волны 3D сейсмических данных

Разработанные программные средства для расчетов «обратной» волны 2D сейсмических данных показали удовлетворительные результаты. Хотелось бы отметить, что упрощение реальной среды до 2D профиля не позволяет в полной мере отразить пространственный разрез. Прежде всего, это связано с искусственным проецированием результатов полевых исследований на плоскую модель. Сама технология плоской регистрации отражений и рассеяния приводит к некорректному учету окружающей среды. Следует отметить, что в реальности прокладываемый профиль не является прямой линией

в пространстве, т.е., как правило, используется ломаная линия, что вызывает дополнительные искажения в углах реального профиля.

Само использование технологии 2D вызвано как экономическими, так и техническими причинами. Несомненно, прокладка одного профиля существенно экономит средства при полевых работах. В то же время количество данных при регистрации в несколько раз меньше. Ранее технические средства регистрации не позволяли проводить работы по технологии 3D, и активно применялась 2D сейсмика. В настоящее время 2D сейсмика применяется при региональной геологоразведке и предварительной оценки территорий. Несомненно, в современных реалиях, в геологоразведке чаще используется 3D сейсмика.

Основные сложности при обработке 3D данных возникают из-за большого расчетного куба данных, объем которых, как правило, в несколько десятков и даже сотен раз большего, чем при обработке 2D данных.

Другой особенностью 3D является условная регулярность исходных данных, так как в силу природного ландшафта не всегда возможна корректная расстановка источников и приемников. Для учета особенностей расстановки программные модули были модифицированы с учетом произвольного положения источников как по латерали, так и по высоте рельефа. Расположение приемников так же произвольно, но в расчетной сетке они притягиваются к ближайшему узлу.

Таким образом, на этапе адаптации алгоритмов расчета «обратной» волны основными проблемами стали более высокий объем расчетных и результирующих данных, а также увеличение времени вычислений. Сам же алгоритм вычислений не претерпел существенных изменений.

Основная проблема с размещением куба данных в рамках версии для CPU не вызывает особых проблем при достаточном объеме оперативной памяти, однако время вычисления на CPU существенно выросло и могло составлять от нескольких часов до нескольких суток для одного источника. Продолжительный период вычислений вызывает существенные затруднения при обработке данных на участках с площадью больше нескольких десятков квадратных километров.

Использование GPU позволило сократить продолжительность расчета 3D данных до разумных значений, не превышающих одного часа при обработке глубоких целевых горизонтов с высоким пространственным разрешением. При этом фактическим ограничением на масштаб расчетного пространственного шага является размер оперативной памяти на видеокартах, который ограничен, как правило, десятком гигабайт. На современных видеокартах память может достигать 80 гигабайт.

Таким образом, в результате проведенных работ, была выполнена адаптация программных модулей расчета «обратной» волны для 3D сейсмических данных в версиях для CPU и GPU. Было выявлено, что версия для GPU предпочтительней для обработки 3D сейсмических данных из-за более высокой скорости вычислений.

1.4. Программно-алгоритмический модуль высокоточного расчета «прямой» волны

При разработке новых вычислительных методов необходимо уделять особое внимание тестированию на модельных данных, которые, безусловно, слабо отражают реальные геологические среды, однако полезны для тестирования создаваемых алгоритмов и программных средств. Для расчетов «обратной» волны в методе RTH используются данные в формате SGY с указанием положения источников и приемников, а также содержащие регистрируемые в дискретном виде данные на отдельных приемниках. Таким образом, для создания моделируемых данных возникает необходимость разработки программного модуля, генерирующего сейсмические данные для модели. По сути, расчетные блоки распространения «прямой» и «обратной» волны не отличаются, наблюдается различие лишь во входных и выходных данных.

Для воссоздания некоторой скоростной модели профиля или куба был разработан программный модуль, создающий кусочно-градиентные по глубине и константные по латерали скоростные модели. Кроме того, доработка данного программного модуля позволила создавать дифракционные низкоскоростные или высокоскоростные включения в основную модель.

Рассмотрим входные данные для «прямой» волны. В расчетах для «обратной» волны используется распространение импульсов от группы приемников в обратном времени. При расчетах «прямой» волны рассматривается распространение импульса из источника и регистрация на приёмниках. В качестве входного импульса был выбран импульс Рикера (Рис. 1), который позволяет имитировать, с некоторой долей приближения, физический взрыв сейсмического источника, где сам момент взрыва находится на максимальном положительном пике. Таким образом, в качестве исходных данных в расчетный блок подается трасса импульса Рикера, но регистрация в точках моделированных приемников начинается лишь с момента максимума импульса.

В отличие от «обратной» волны регистрация результирующих данных осуществляется в вокселях приёмников, расположенных на условной дневной поверхности расчетного куба. При этом регистрация ведется непрерывно для заданного количества итераций. При моделировании из-за относительно малого количества приемников проблем

с хранением результирующих данных не возникает. Разработанный программный модуль «прямой» волны может быть модифицирован для оценки времени прихода импульса в конкретный воксель расчетного куба, что позволит проводить расчет времени задержек в произвольной скоростной модели.

Для оценки работоспособности разработанных программных модулей были проведены расчеты для моделированных 2D сейсмических данных. При этом использовалась константная скоростная модель, а на глубине 1 км расположен дифрактор со скоростью на 100 м/с выше базовой. Для имитации возбуждения использовался монохромная волна.

Для оценки распространения «прямой» волны был разработан программный модуль, позволяющий создавать покадровые графические изображения распространения волн. С помощью стандартных средств обработки изображений был получен видеофайл, показывающий распространение волн.

В рамках проведенного анализа сделана оценка корректности распространения волн в заданной модельной среде. Так на первоначальном этапе (рис. 4а) наблюдается прямое распространение волны без отражений от мнимых поверхностей. На рисунке 4б наблюдается начальное отражение волн от дифрактора.



Рисунок 4 – Распространение волны в константной среде с дифрактором (а – начальное распространение; б – момент начала прохождения дифрактора)

При анализе последующего распространения волны наблюдается многократное отражение от дифрактора (рис 5а). В последующем наблюдается многократное отражение от дифрактора, складывание отражений. При этом не наблюдается отражений от вертикальных и горизонтальных границ (рис. 5б), что свидетельствует о корректности используемых методов гашения распространения волн на границах моделируемых областей.

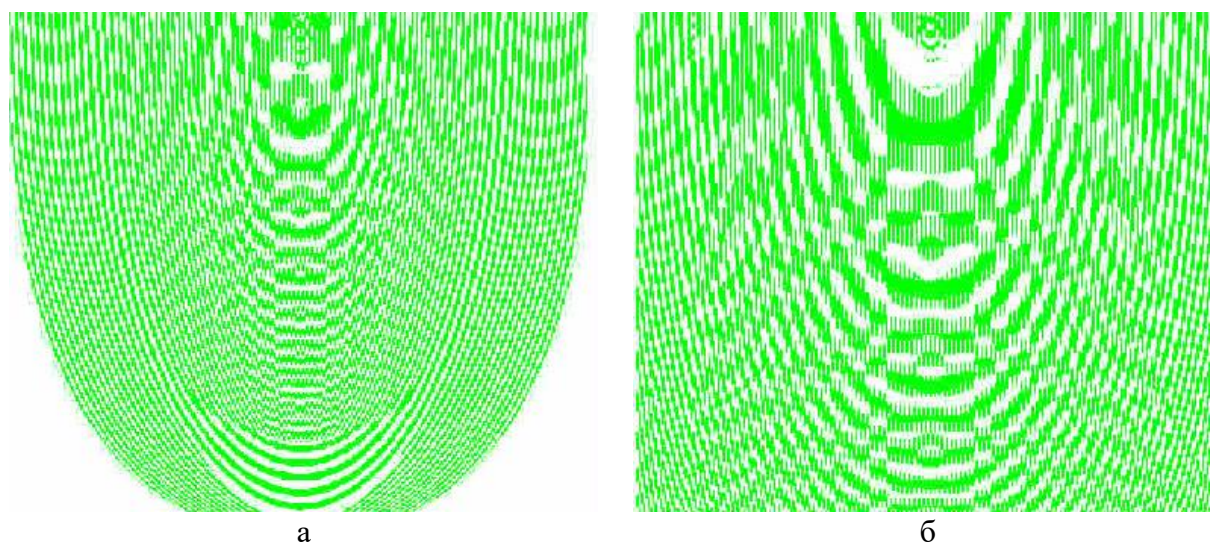


Рисунок 5 – Распространение волны в константной среде с дифрактором (а – момент распространения волны до нижней границы; б – момент распространения волны до боковых границ)

При тестировании распространения «прямых» волн были рассмотрены различные скоростные модели, содержащие высокоскоростные и низкоскоростные дифракторы и рефлекторы. Анализ распространения волн показал, что разработанные методы в полной мере описывают прохождение акустических волн в различных моделируемых средах.

На рисунке 6 приведен пример расчета генерации сейсмического сигнала на основе базовой скоростной модели и результат расчета по методу RTM. Как видно из рисунка в целом достаточно точно удается восстановить модельную структуру геологической среды.

Таким образом, в результате проведенных исследований, был разработан оригинальный сверхбыстрый метод высокоточного расчета распространения опорной волны от источника и «обратной» волны от группы приемников для 2D и 3D. Новизна подхода состоит в том, что в отличие от традиционных методов был реализован расчет волнового поля с использованием уравнений акустики в первых производных – в давлениях и скоростях. При этом расчеты проводились с контролируемой точностью не для 64 разрядных, а для 32 разрядных вычислений не только с использованием CPU, но также с использованием GPU. Последнее позволило сократить время типового расчета волновых полей без потери точности расчетов до двух порядков

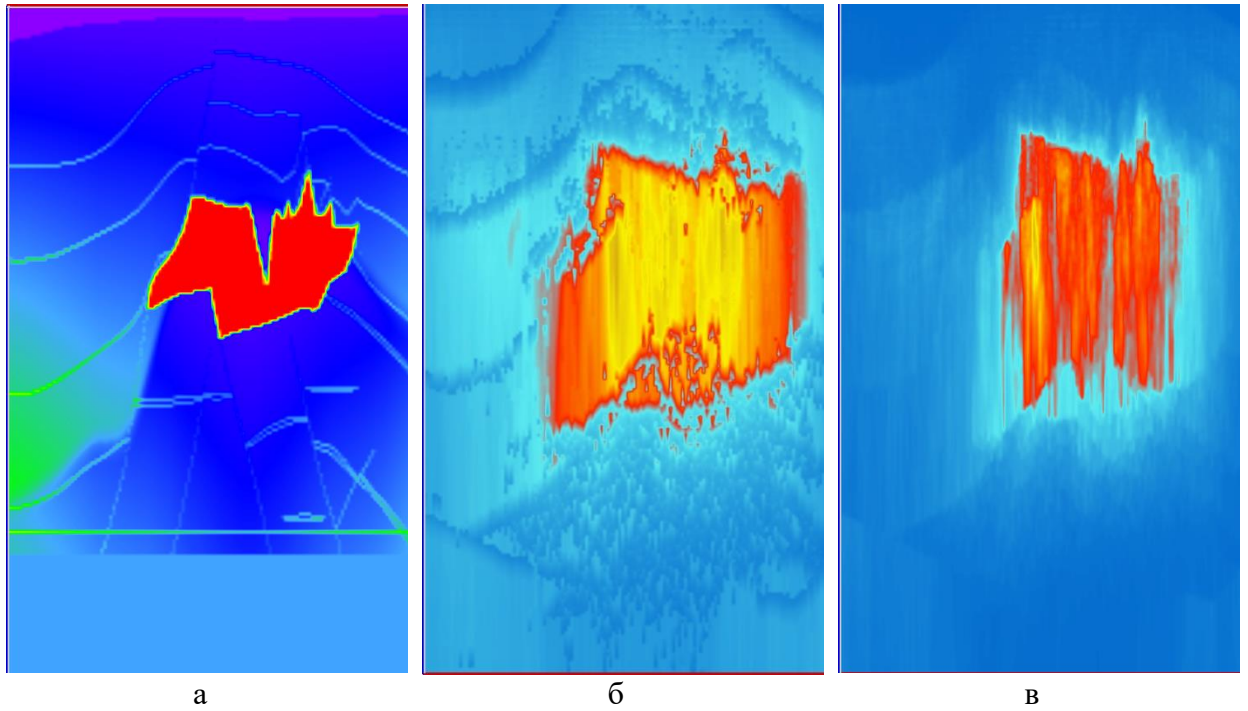


Рисунок 6 – Расчет по методу RTH на основе базовой скоростной модели (а – базовая скоростная модель; б – расчётный атрибут RTH Amplitude/Back; в – расчётный атрибут RTH STime/MaxS)

2. РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ К МИГРАЦИИ В ОБРАТНОМ ВРЕМЕНИ И УГЛОВОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ ВОЛН НА ОСНОВЕ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННЫХ РАНЕЕ МЕТОДОВ И ПОДХОДОВ

Угловая декомпозиция волн осуществляет сбор некоторых диапазонов расчета обратных волн в точке “встречи” с прямой волной для всех источников. Данная процедура выполняется в рамках воксельно-ориентированного подхода, т.е. для каждого вокселя расчетной области. Основные подходы к декомпозиции волн описаны в пункте 2.1.1 отчета за 2022 г.

Основной проблемой, в рамках данного подхода, является количество записываемых данных. Так на один воксель при расчете единичного источника в среднем приходится 7–10 Кбайт данных. Суммарный объём данных для одного источника может составлять десятки Гбайт, а всей области – сотни Тбайт. Такие объемы расчетных данных, сохраняемых для каждого источника, не позволяют осуществить последовательное сохранение в процессе расчета в единый файл данных. Вернее, данная процедура вполне осуществима с технической точки зрения, но временные затраты на сохранение будут существенно превышать время обработки одного источника на узле.

Таким образом, процедура сохранения данных от каждого источника осуществляется в отдельные файлы по единому формату, а собственно угловая декомпозиция осуществляется отдельной процедурой и, фактически, заключается в конвертировании форматов данных. В целом процедура конвертации не вызывает серьёзных затруднений, но чтение/запись данных объемом в несколько сотен Тбайт занимает достаточно продолжительное время.

Хотелось бы отметить, что при проведении полевых работ выполняется расстановка пунктов приема и пунктов взрыва исходя из необходимости заданного покрытия целевой зоны необходимым количеством источников. Количество источников, покрывающих конкретную область исследования, называют кратностью.

При планировании расстановки источников и приемников важно решить, прежде всего, задачу достижения необходимой кратности покрытия целевой зоны при минимизации количества источников и приемников. В связи со сложностью проведения работ на местности, как правило, расстановку источников и приемников проводят на регулярной сетке. Однако, с целью экономии средств на проведение полевых работ, как правило, расстановку делают с разным шагом по местной системе абсцисс и ординат. Такая расстановка, при обработке сейсмических данных, приводит к возможному появлению «артефактов». При обработке данных по методу векторной сейсморазведки было выявлено,

что между регулярными линиями источников появляются «артефакты» не связанные с исследуемой средой.

Время обработки данных по методу векторной сейсморазведки имеет прямую зависимость от кратности покрытия конкретного вокселя целевой области. Для точности расчетов необходимо увеличивать кратность. Однако увеличение кратности увеличивает объём сохраняемых промежуточных данных в RTH. При стандартной кратности покрытия в 1000–2000 источников на воксель объём сохраняемых данных может достигать сотен терабайт, что приводит к необходимости организации объёмного хранилища данных расчетной системы и, как следствие, к существенному удорожанию хранения. Кроме этого, увеличение объёма обрабатываемых данных приводит к существенному увеличению времени обработки. В рамках проводимых исследований были предприняты попытки сокращения кратности покрытия вокселя при сохранении качества обработки. Было проведено прореживание источников в зависимости от расстояния и азимута. Проведенный анализ результатов показал, что сокращение источников случайным образом приводит к удовлетворительным результатам, однако при сложных природных характеристиках местности (водные объекты, крутые уклоны и т.д.) приводит к существенному ухудшению результатов сейсмической обработки. В рамках данных экспериментов «прореживание» источников выполнялось до проводимых расчетов, при этом отфильтрованные источники не участвовали в дальнейшей обработке. В связи с этим был выбран иной способ «прореживания», в рамках которого фильтрация источников выполнялась не по целевой области, а для конкретного вокселя. Для каждого вокселя рассматривался используемый набор источников независимо от соседних вокселей. Такой способ фильтрации приводит к тому, что в соседних вокселях, используемые источники могут динамически изменяться. При предложенном способе фильтрации используются все источники, но у конкретного источника могут использоваться не все расчетные воксели.

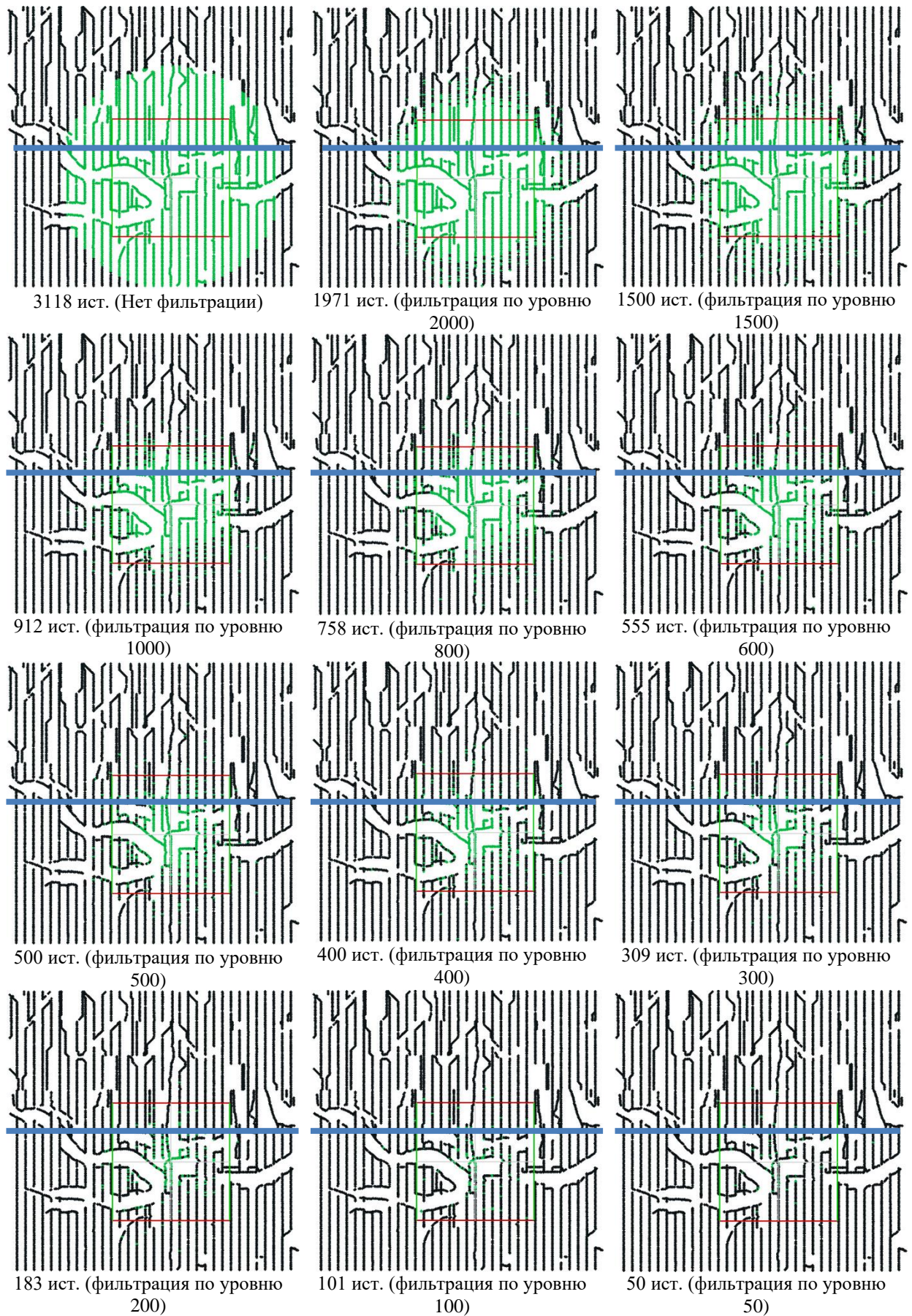


Рисунок 7 – Расположение источников на участке 4x4 км. Черный цвет – все источники, зеленый цвет – источники, используемые в обработке данных по методу RTH. Голубая линия – сечение crossline.

В первоначальных тестовых экспериментах проводился расчет для всех источников и всех вокселей из целевой области, а уже потом осуществлялась фильтрация. Недостатком данного способа фильтрации является то, что фактически осуществляется полная запись промежуточных данных. Фильтрация позволяет лишь сократить время расчета на этапе синтеза. Для устранения данного недостатка был разработан программный модуль предварительной фильтрации на этапе подготовки расчетной модели. В рамках исследований были проведены эксперименты с фильтром равномерного и гауссового распределения, которые показали лучший результат во втором случае (рис. 7). Уровень фильтрации задается количеством источников и диапазоном разброса этого количества, т.е. для каждого вокселя устанавливается случайным образом свое количество источников, удовлетворяющие заданным критериям. Особенностью данного способа фильтрации является то, что источники, расположенные ближе к вокселю используются больше, чем более удаленные от него. То есть формально при фильтрации плотность источников на единичную поверхность снижается для более удаленных источников. Однако, если перейти из меры пространственного расположения по латерали к мере расстояния по латерали между приемником и источником, то получаем, что до фильтрации количество удаленных источников больше, чем близких, а после фильтрации ситуация выравнивается.

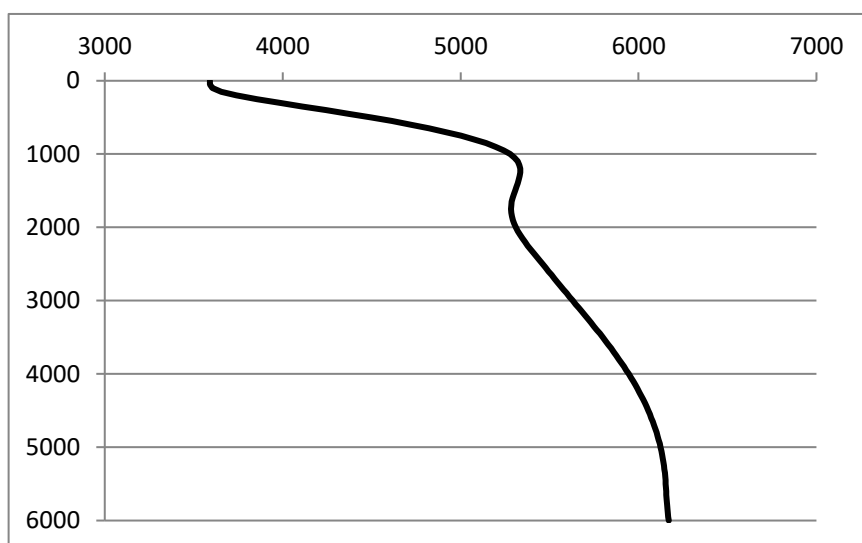


Рисунок 8 – Начально скоростная модель в м/с. Глубина в м.

На рисунке 9 приведены результаты обработки данных по методу RTH при различных количествах источников для одного из атрибутов RTH. Дано сечение куба вдоль линии crossline (голубая линия на рис. 7) сейсмического RTH атрибута ATD (Arrival Time Discrepancy), характеризующего величину отклонения скорости от заданной априорной начально-скоростной модели, приведенной на рисунке 8. Красный цвет – скорость в модели завышена, синий – занижена.

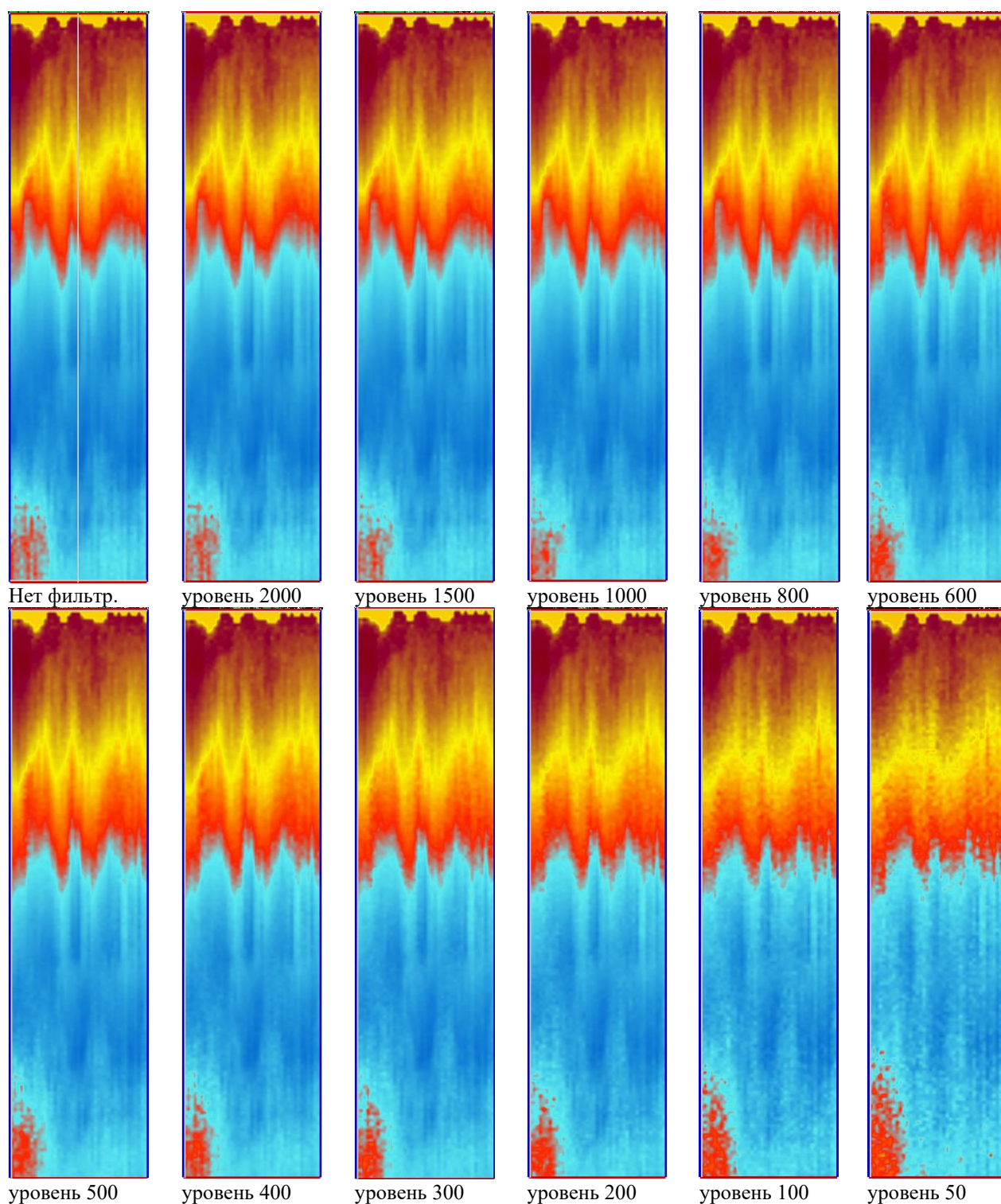


Рисунок 9 – Сечение куба вдоль линии crossline (голубая линия на рис. 5) сейсмического RTN атрибута ATD

Проведенный анализ результатов расчетов с различными уровнями фильтрации показал, что при уменьшении количества источников наблюдается некоторая деградация результатов на уровне фильтрации менее 300 источников, однако некоторые атрибуты даже на уровне фильтрации 50 источников дают удовлетворительные результаты (рис. 9). Так видно, что для уровня фильтрации 400 и более источников переход от завышенной скорости

к заниженной (центр изображений на рисунке 9) не имеет каких-либо отличий. При большем уровне фильтрации общая тенденция сохраняется, но наблюдаются некоторые шумы, приводящие к размытию границ.

Основываясь на описанных выше алгоритмах и разработанных блоках, была составлена технологическая схема угловой декомпозиции волн, представленная на рисунке 10. При этом расчет на каждом этапе может решаться как с использованием одного вычислительного узла, так и с использованием многомашинных вычислительных комплексов. Отдельный расчетный блок так же использует параллелизм обработки на CPU и GPU (при наличии). Для расчета распространения «прямой» и «обратной» волны используются программные модули, описание которых приведено в пункте 2 настоящего отчёта.

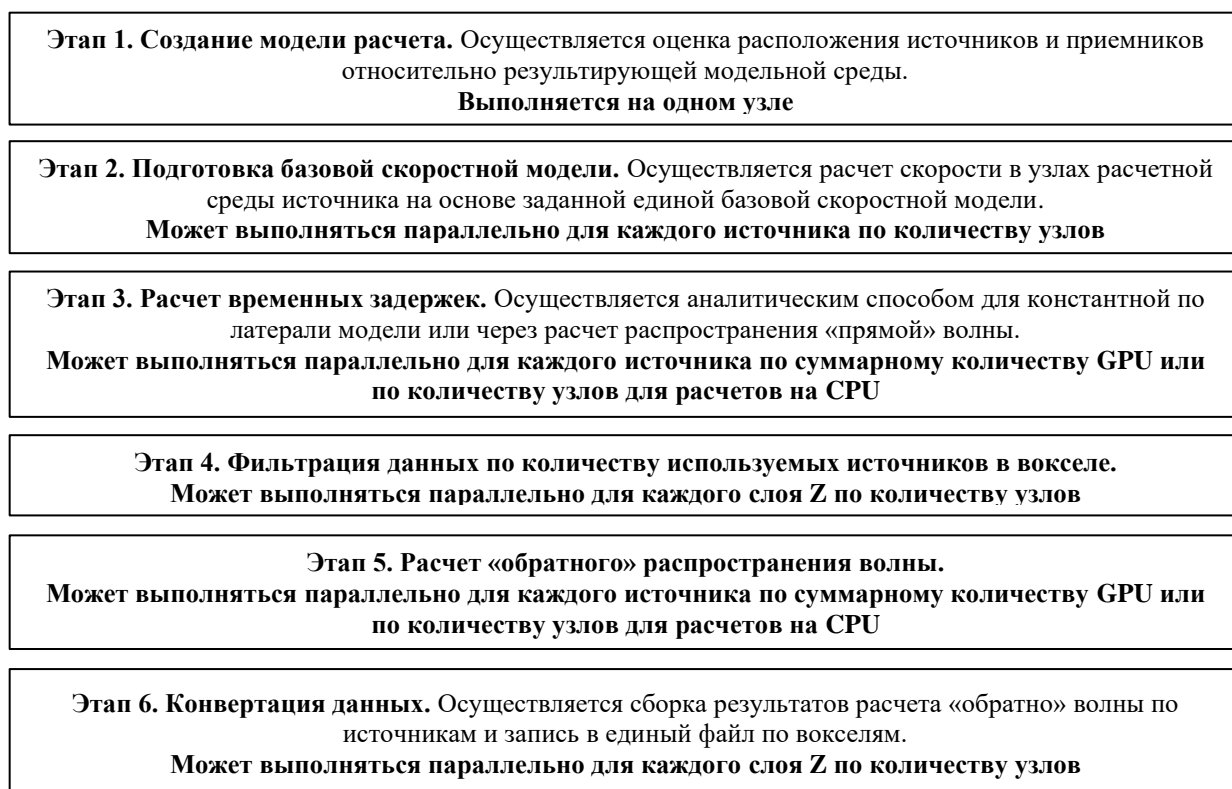


Рисунок 10 – Схема миграции в обратном времени и угловой декомпозиции волн на основе разработанного ранее метода расчета волн

Таким образом, в результате проведенных исследований, на основе предложенных ранее математических моделей, были разработаны программные модули угловой высокоточной декомпозиции исходных сейсмических данных, зарегистрированных на поверхности. Декомпозиция осуществляется с использованием опорной волны на основе уравнений акустики, описываемых дифференциальными уравнениями первого порядка для давлений и векторов скорости частиц, изменяющихся во времени (усреднение последних по времени приводит к традиционным статичным во времени векторам нормали к фронту

распространения волн). Детальная фиксация во времени углов между векторами скоростей частиц в прямой волне и в обратной приводит к необходимости промежуточного хранения огромного количества информации (в среднем на три порядка больше, чем исходные сейсмические данные). Это является значительным вызовом в предлагаемом подходе векторной сеймики. Для сокращения количества сохраняемых данных проведены исследования и выполнена программная реализация технологии фильтрации используемых источников для каждого пространственного вокселя расчетной области, которая позволяет сократить объем сохраняемых промежуточных данных в 5–8 раз. При этом сокращение вовлеченных в расчеты источников волновых полей не сказывается на качестве оцениваемых конечных сейсмических атрибутов.

3. РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ МАКЕТНЫХ ОБРАЗЦОВ ВЫСОКОМОБИЛЬНОГО МАЛОГАБАРИТНОГО ЦИФРОВОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО МОДУЛЯ, ОБЛАДАЮЩЕГО ВОЗМОЖНОСТЬЮ ПО БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧЕ ДАННЫХ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ ВНЕШНЕГО ОКРУЖЕНИЯ, НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ И МОДЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ И КОМПОНОВКИ УСТРОЙСТВА, РАЗРАБОТАННЫХ НА ПРЕДЫДУЩЕМ ЭТАПЕ ПРОЕКТА

3.1. Состав и функционирование макетных образцов высококомобильного малогабаритного цифрового сейсмического модуля

Представляемая система состоит из трех ортогонально установленных активных линейных молекулярно-электронных геофонов MTSS-1001 [Z. Zhu, Z. Wu, Z. Deng, H. Qin and X. Wang, 'An Ocean Bottom Flying Node AUV for Seismic Observations,' 2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV), Porto, Portugal, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/AUV.2018.8729726.], [https://www.sercel.com/en/products/winghttps://www.sercel.com/ene.] с рабочей полосой в базовой конфигурации от 1 до 300 Гц. Линейные геофоны MTSS сочетают малые габариты и вес – не более 65 граммов с высокой чувствительностью – до 250 В/(м/с). Ключевой отличительной особенностью геофонов MTSS является широкая рабочая полоса частот до 1 Гц, что больше, чем у других типов приборов, что является особенно важным для работы на сложных территориях, содержащих труднодоступные участки, ограничивающие возможности для создания плотных расстановок сейсмодатчиков. Кроме того, приборы устойчивы к вибрациям и ударам при транспортировке, а также сохраняют работоспособность при любой ориентации относительно вертикали, что значительно снижает требования по точности выставления вертикали при использовании неподготовленной площадки. Более того, ошибки, связанные с неточной установкой прибора относительно вертикали, могут быть в дальнейшем скорректированы на основании показаний встроенного в цифровую плату трехкомпонентного акселерометра-магнитометра. Усилители, примененные в геофонах, характеризуются малым собственным шумом и небольшим энергопотреблением – не более 30 мВт на компоненту. Вместе с тем, путем перенастройки параметров цепей обратной связи и выходного фильтра, имеется возможность расширить рабочую полосу прибора в сторону низких частот вплоть до 0,1 Гц (10 секунд), что недоступно существующим электродинамическим геофонам даже при применении схем активного демпфирования.

Полученные в этом случае низкочастотные компоненты спектра позволяют проводить широкополосную обработку и дополнительно увеличить глубину, для которой могут быть получены геологические данные [V. M. Agafonov, I. V. Egorov, and a. S. Shabalina, “Operating principles and technical characteristics of a small-sized molecular-electronic seismic sensor with negative feedback,” *Seism. Instruments*, vol. 50, no. 1, pp. 1–8, 2014].

Блок схема устройства представлена на рисунке 11. Аналоговые напряжения от активных геофонов А6.. А8 через платы усилителей А3..А5 поступают на плату оцифровки сигнала А2. Для оцифровки сигнала датчиков применена микросхема ADS131E04 [<http://r-sensors.ru/ru/products/geophones/MTSS-1001-rus/>. Доступ 25.11.23.], содержащая 4 синхронных независимых 24-разрядных аналогово-цифровых преобразователя, работающих на частоте опроса 1000 Гц и характеризующиеся отношением сигнал/шум – 122 дБ, что дает 20,5 эффективных разряда без шума. Выходные сигналы с частотами ниже 1000 Гц формируются посредством децимации, сопровождающейся антиалиазинговой фильтрацией высоких частот. В результате децимации с выполнением 32-разрядных вычислений число эффективных разрядов без шума возрастает. В частности, при частоте отсчетов 100 Гц число эффективных разрядов без шума составляет уже 22, что обеспечивает динамический диапазон входного сигнала в 131,8 дБ. Дальнейшее снижение частоты опроса дает возможность еще большего увеличения динамического диапазона, но сказывается на полосе пропускания, которая в зависимости от применяемых коэффициентов фильтров составляет 0,4–0,45 от конечной частоты опроса.

В качестве опорного применен прецизионный источник напряжения (ИОН) ADR444 [F. ten Kroode, S. Bergler, C. Corsten, J. W. de Maag, F. Strijbos, and H. Tijhof, “Broadband seismic data — The importance of low frequencies,” *GEOPHYSICS*, vol. 78, no. 2, pp. WA3–WA14, Mar. 2013.] с плотностью шумового напряжения в $78,6 \frac{\text{нВ}}{\sqrt{\text{Гц}}}$ на частоте 1 кГц, что дает оценку величины с.к.з шума в полосе 0,1 – 500 Гц на уровне 0,56 мкВ или - 134,3 дБ от с.к.з. максимального входного сигнала, составляющего 2,896 В. Применение одного источника опорного напряжения для всех четырех каналов АЦП и счетверенного интегрального АЦП позволило минимизировать общее потребление тракта АЦП до 50 мВт.

Синхронизация отсчетов и привязка данных по координате производятся при помощи спутникового приемника GloNASS/GPS MAX-M8Q A1.4 [ADS131E04. <https://www.ti.com/lit/gpn/ads131e04> Доступ проверен.24.11.2023] и термокомпенсированного подстраиваемого кварцевого генератора TG-2016 [ADR444. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data->

sheets/adr440_441_443_444_445.pdf Доступ проверен.24.11.2023], расположенного на плате АЦП. При наличии сигналов точного времени микроконтроллер измеряет частоту опорного генератора относительного истинного времени GPS и выдает команду на коррекцию частоты. Система подстройки обеспечивает точность привязки отсчета к точному времени не хуже 1 мкс. В отсутствие сигналов подстройки точность системных часов определяется стабильностью термокомпенсированного кварцевого генератора и относительный уход не превышает $0.5 \cdot 10^{-6}$ на всем температурном диапазоне от -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$.

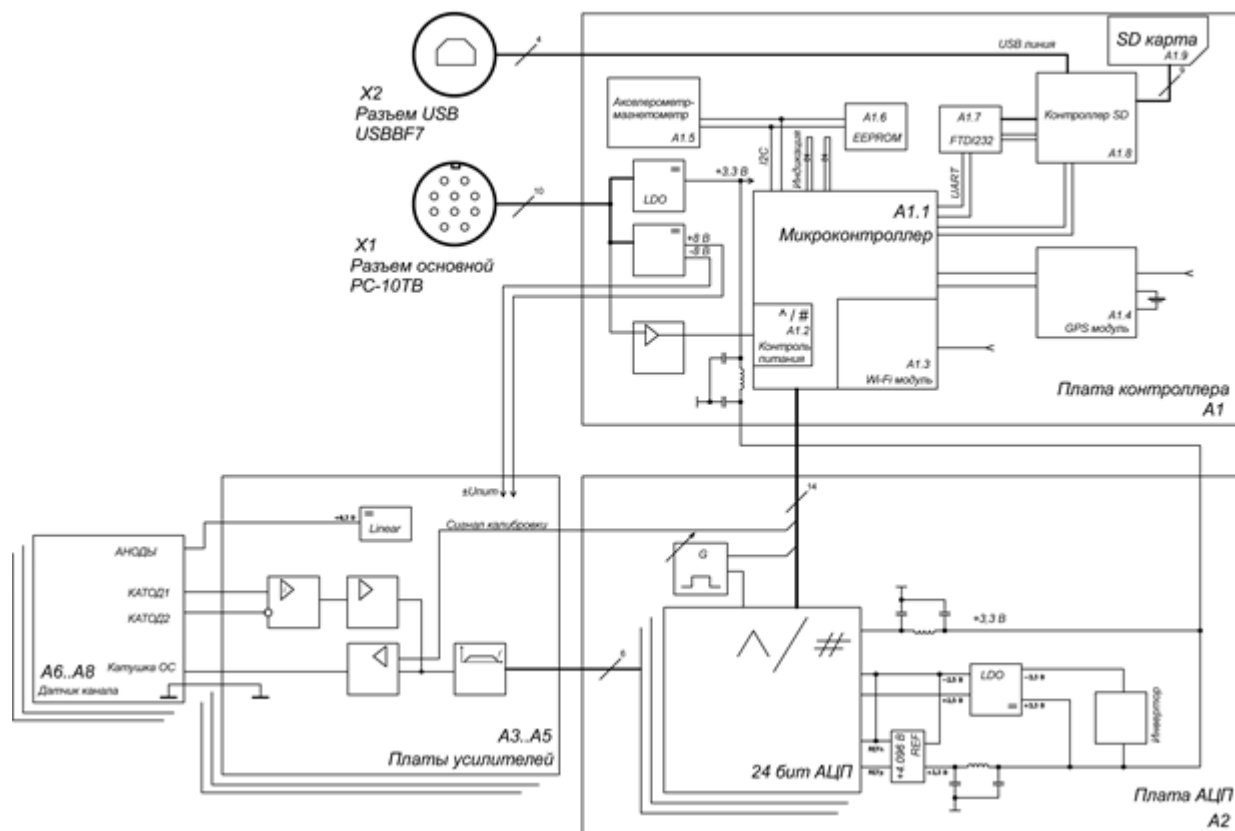


Рисунок 11 – Блок схема цифрового сейсмического нода

На плате контроллера А1 установлен микроконтроллер А1.1 типа CC3200R1M2RGC с архитектурой ARM Cortex-M и встроенным интерфейсом Wi-Fi А1.3.[MAX-M8Q А1.4. https://www.u-blox.com/sites/default/files/MAX-M8-FW3_DataSheet_%28UBX-15031506%29.pdf Доступ проверен.24.11.2023]. На контроллере производится прием оцифрованных данных от АЦП, их последующая фильтрация с децимацией, снабжение метками точного времени и дальнейшая запись на SD карту, либо передача по каналам связи. Кроме того, контроллер осуществляет контроль напряжения питания с помощью встроенного 12-разрядного АЦП А1.2 и осуществляет выдачу калибровочных сигналов на платы усилителей для контроля работоспособности и характеристик активных геофонов.

Хранение данных осуществляется на энергонезависимую флэш-память А1.9 типоразмера microSD ёмкостью до 32 Гбайт. Для хранения данных применяется файловая

система FAT32, что позволяет дальнейшее их считывание с карты без применения специальных программных средств. Блоки записанных данных содержат чередующиеся значения компонентов сигнала и минутные заголовки метаданных, в которых содержатся информация о координате установке, времени отсчета, показания встроенных датчиков – температура внутри прибора, показания магнитометра и акселерометра. Чтение данных может осуществляться либо по беспроводному интерфейсу Wi-Fi с помощью FTP, либо с использованием контроллера SD карты A1.6 типа MAX14502 [TG-2016 https://support.epson.biz/td/api/doc_check.php?dl=app_TG2016SMN&lang=en Доступ проверен.24.11.2023] по проводному соединению стандарта USB 2.0. Данные сохраняются в специализированном формате SIVY и могут в дальнейшем конвертироваться в общепринятые форматы представления сейсмических данных – 32-разрядные бинарные отсчеты, miniSEED, SEG Y и другие. Также по интерфейсу USB с помощью преобразователя интерфейсов A1.7 типа FT232 [Microcontroller CC3200. <https://www.ti.com/lit/gpn/CC3200> Доступ проверен.24.11.2023] возможно чтение телеметрических данных с выхода UART микроконтроллера. Текущие настройки прибора и системная информация, необходимая для работы, сохраняется в энергонезависимой памяти A1.6 типа 24LC256. [MAX14502 . <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/max14502.pdf> Доступ проверен.24.11.2023].

Для определения текущего режима эксплуатации прибора применяются термометр, встроенный в микросхему АЦП, а также интегральный шестикомпонентный магнитометр-акселерометр A1.5 типа LSM303 [FT232. https://ftdichip.com/wp-content/uploads/2020/08/DS_FT232R.pdf Доступ проверен.24.11.2023]. В микросхеме магнитометр-акселерометра имеется трёхкомпонентный линейный акселерометр со входным диапазоном $\pm 2g$ и спектральной плотностью шума $220 \frac{мкg}{\sqrt{Гц}}$ и трехкомпонентный магнетометр со входным диапазоном $\pm 1,3$ Гс и разрешением 2 мГс. Применение шестикомпонентного магнитометра-акселерометра позволяет производить последующую компенсацию неточности расположения осей прибора относительно вертикали и направления на географический Север при установке посредством пост-обработки данных на основании значений проекций ускорения свободного падения и линий магнитного поля Земли на оси прибора.

3.2. Программное обеспечение макетных образцов высококомобильного малогабаритного цифрового сейсмического модуля

Программное обеспечение состоит из загрузчика и основной прошивки микроконтроллера. Загрузчик исполняется до момента запуска основной прошивки и

предназначен для обновления прошивки и проверки ее целостности перед запуском. Основная прошивка основана на операционной системе реального времени (RTOS), в которой параллельно исполняется несколько подпрограмм: опрос АЦП с последующей серией каскадов децимации с антиалиазинговой фильтрацией, сохранение данных на внутреннюю SD карту, выдача калибровочного сигнала, подстройка кварцевого генератора по часам приемника GNSS.

В прошивке реализован также ряд сетевых серверных приложений – HTTP сервер для отображения веб-интерфейса модуля, FTP сервер для скачивания файлов, хранящихся на SD карте, а также сервер для обмена данными и командами с внешней системой управления посредством специализированного протокола прикладного уровня, реализованного поверх сетевого протокола UDP. Передача команд и запрос состояния системы происходит по принципу запрос-ответ. Передача данных выполняется асинхронно – модуль отправляет пакеты с данными по мере их формирования, принимающая сторона отправляет подтверждение приема. В случае отсутствия подтверждения модуль высылает пакет повторно, таким образом обеспечивается целостность потока данных.

Описанный протокол использован для автоматизированного обмена командами и данными с БВС. Дальность действия Wi-Fi позволяет БВС установить связь с модулем, находясь на высоте до ста метров. Компьютер БВС, после установки беспроводного соединения, может запросить состояние модуля, изменить параметры регистрации, произвести тестовую запись сигнала или подать команду на подачу калибровочного сигнала.

3.3. Механическая конструкция и сборка макетного образца высокоавтомобильного малогабаритного цифрового сейсмического модуля

При разработке конструкции цифровой станции БВС использовались современные автоматизированные средства проектирования и разработки конструкторской документации – программы 3D-моделирования и 2D-проектирования. С помощью 3D-моделирования создается трехмерное изображение деталей, которое в дальнейшем используется для создания чертежей, а также программ для станков металлообработки с числовым программным управлением. Основные преимущества 3D-моделирования состоят в существенной экономии времени и финансовых ресурсов в ходе создания 3D-моделей, больших возможностях в плане изменения и преобразования 3D-моделей, наглядности и презентабельности образцов изделий, представленных в виде 3D-моделей. Применение 3D-моделирования способствует сокращению затрат на разработку и внедрение в производство опытных образцов изделий. Данное обстоятельство способствует

тому, что снижается себестоимость готовой продукции. Основным недостатком 2D-проектирования состоит в том, что по чертежам бывает трудно представить, как изделие выглядит в пространстве. Ошибки в чертежах приходится исправлять на уже созданном изделии, что замедляет время от появления идеи до выпуска готовой продукции и приводит к дополнительным затратам. Работать с трехмерной моделью гораздо проще и удобнее, чем с традиционными чертежами. В результате значительно сокращаются временные затраты на проектирование, снижаются издержки.

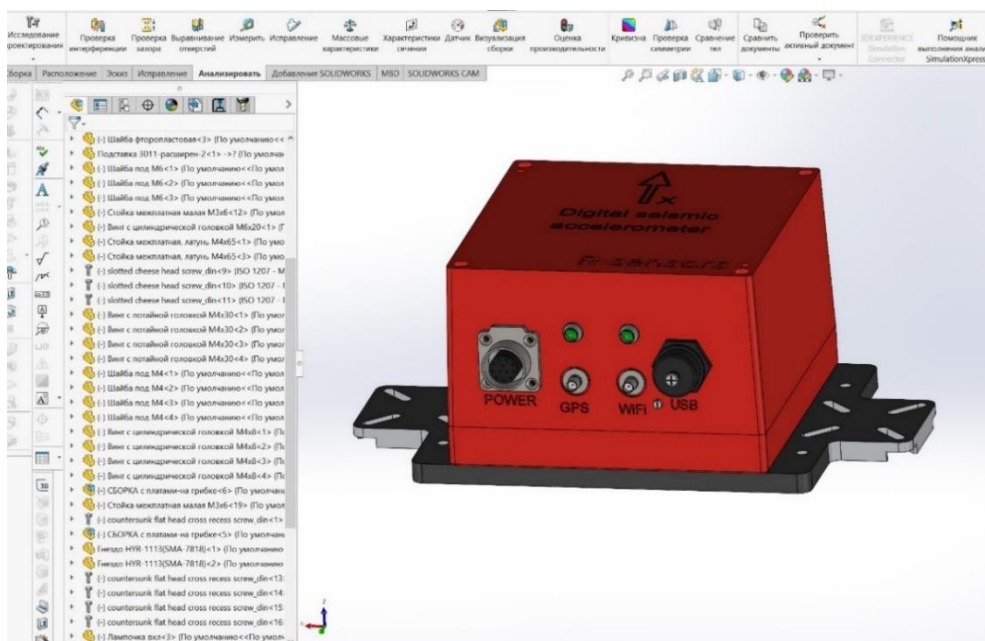


Рисунок 12 – Внешний вид рабочего окна программы 3D-моделирования при разработке конструкции цифровой станции

При проектировании конструкции цифровой станции была применена современная программа 3D-моделирования – SolidWorks (рисунок 12), которая наиболее популярна и широко распространена в современном производстве благодаря своей простоте и доступности быстрого освоения пользователем, постоянным своевременным обновлениям программного обеспечения. Кроме того, в стандартной библиотеке SolidWorks содержится огромное количество стандартных деталей, которые также можно использовать при проектировании и экономить так же значительное количество времени. По трехмерной модели система легко определяет ее физические характеристики: площадь поверхности, объем, координаты центра тяжести и т.д.

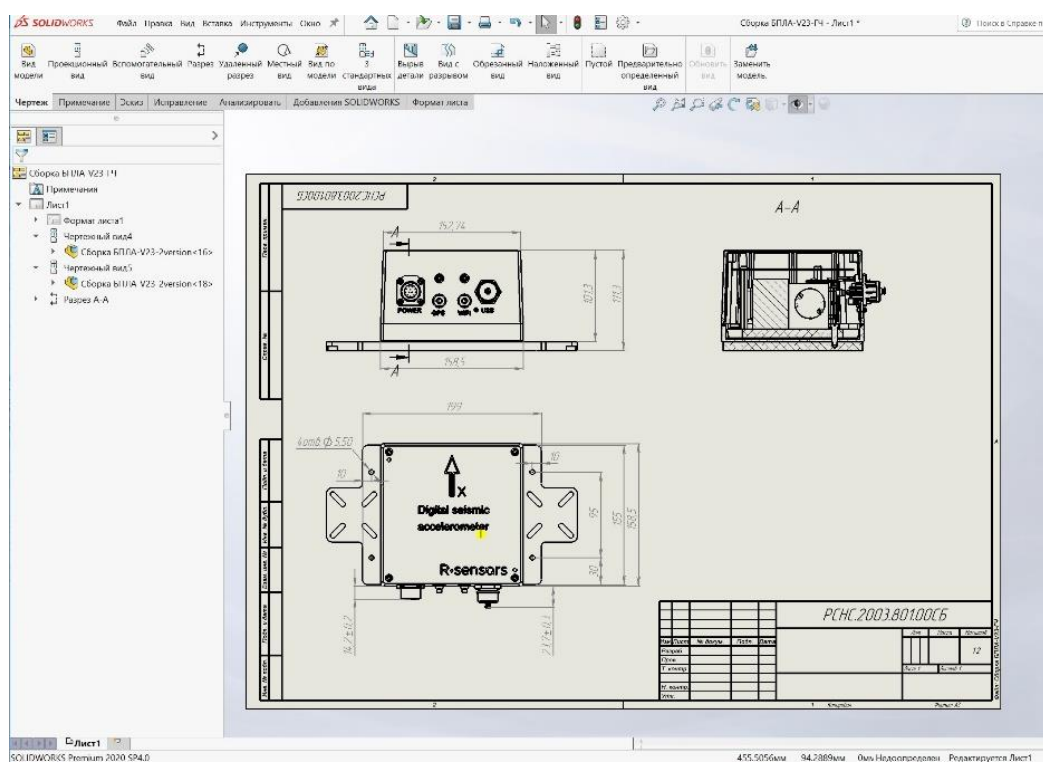


Рисунок 13 – Разработка чертежа с помощью программы САПР

Разработка чертежей с помощью модуля программы проектирования на основе трехмерной модели проще и быстрее, чем создание чертежа изделия в программе САПР с нуля, так как система сама автоматически конструирует необходимые виды и предлагает пользователю выбрать и разместить на листе нужные для лучшего представления и понимания конструкции, также из выпадающего меню предлагается выбрать нужный формат чертежа образца согласно ГОСТ 2.301-68, автоматически проставляются размеры.

Комплект конструкторской документации цифровой станции включает в себя: спецификацию на всю систему в целом, являющуюся основным конструкторским документом, определяющим состав системы, и содержащую перечень сборочных единиц, входящих в состав разрабатываемой цифровой станции, сборочный чертеж цифровой станции 2003ND, чертежи сборочных единиц, чертежи составных деталей. Все спецификации, и чертежи разработаны с помощью последних версий современных средств автоматизированного проектирования и оформлены строго в соответствии с ГОСТ.

Конструкция устройства изображена на рисунке 14, представляет собой систему из трех ортогонально направленных геофонов 3, закрепленных на кронштейне 4 и основании 5, на котором также установлена на стойках 8 цифровая плата 7 и аккумулятор 9. Основание с датчиками и платами размещается в корпусе 1 для радиоэлектронной аппаратуры типа G139, доработанном на станке механообработки для установки разъемов USB, GPS, WiFi.

Для установки к корпусу крепления к БВС предназначена площадка 2, которая крепится к корпусу 1 при помощи винтов.

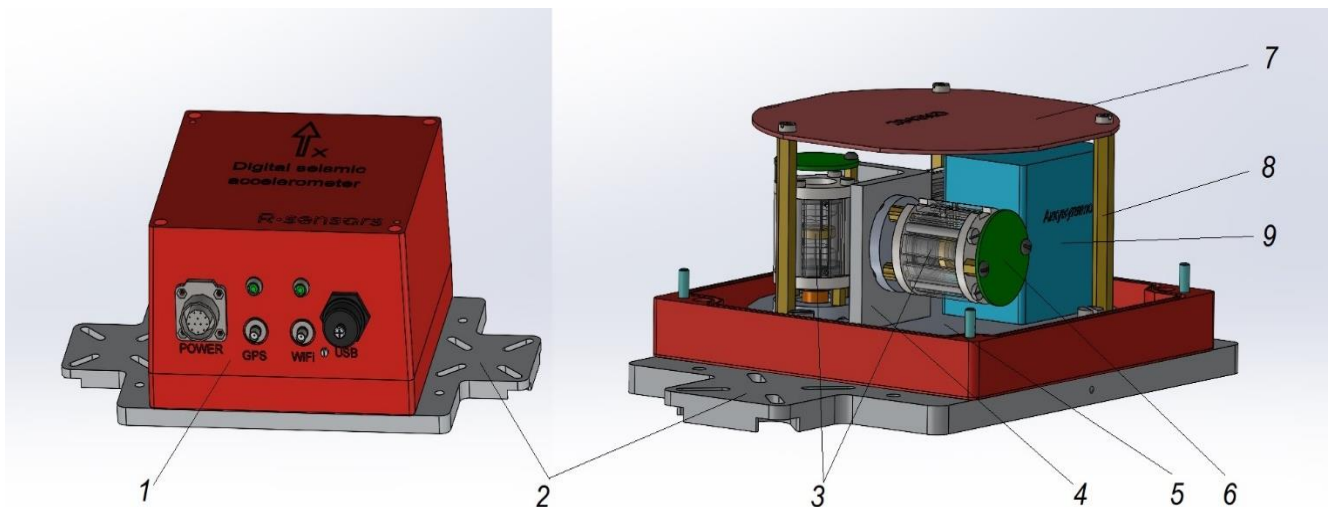


Рисунок 14 – Модель устройства, разработанная с помощью программы 3D-моделирования: 1 – корпус устройства, 2 – площадка для установки крепления к БВС, 3 – молекулярно-электронный датчик – геофон, 4 – кронштейн, 5 – основание, 6 – плата усилителя сигнала, 7 – плата оцифровки сигнала, 8 – межплатная стойка

Внешний вид устройства иллюстрирует фотография, показанная на рисунке 15.



Рисунок 15 – Внешний вид цифрового модуля без внешнего корпуса

Изготовленный макет был объектом последующих испытаний для определения соответствия целям проекта и требованиям ТЗ.

4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ МАКЕТНЫХ ОБРАЗЦОВ ВЫСОКОМОБИЛЬНОГО МАЛОГАБАРИТНОГО ЦИФРОВОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО МОДУЛЯ, ОБЛАДАЮЩЕГО ВОЗМОЖНОСТЬЮ ПО БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧЕ ДАННЫХ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ ВНЕШНЕГО ОКРУЖЕНИЯ. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ И ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ ПОЛУЧЕННОГО РЕШЕНИЯ ЦЕЛЯМ ПРОЕКТА

Наиболее критическими характеристиками для сейсмических систем в целом и, в частности, в случае ее построения на основе нодов, взаимодействующих с беспилотниками, являются рабочая полоса частот первичных датчиков, собственные шумы аналого-цифрового преобразователя, наличие и функционирование устройства для тестирования и калибровки датчиков непосредственно в полевых условиях, а также возможность оперативного получения блоков данных, характеризующих качество получаемой сейсмической информации.

4.1. Измерение частотных характеристик датчика

Использованные датчики были предварительно откалиброваны и исследованы на вибростенде. Полученная при этом полоса рабочих частот соответствует 1–300 Гц по уровню -3 дБ относительно коэффициента преобразования на частоте 10 Гц. Здесь представлены результаты исследования характеристик с помощью встроенной калибровочной катушки методом сканирования по исследуемому частотному диапазону. Для исследования амплитудно-частотной характеристики датчика подключим к нему двуполярное питание и универсальный цифровой блок NI-6205 (National instruments), включающий аналого-цифровой (АЦП) и цифро-аналоговый (ЦАП) преобразователи.

Контакты Х6 отвечают за выходной сигнал (левая ножка — плюс, средняя — минус). Четыре связанные ножки слева направо отвечают соответственно за: минус питания, плюс питания, входной сигнал, земля.

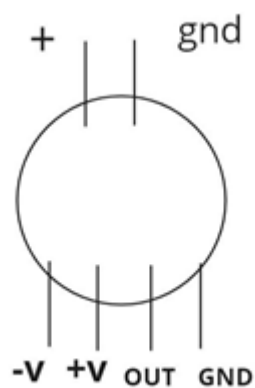


Рисунок 16 – Схема подключения АЦП и ЦАП при тестировании сейсмического датчика

На вход датчиков при помощи ЦАП (National Instruments) подаем синусоидальный сигнал на определенной частоте с амплитудой 1 вольт (для больших частот амплитуду следует снизить до 0,5 В). Сигнал поступает на внутреннюю катушку, меняя ток в ней, тем самым изменяя величину магнитного поля. В результате чего приходит в движение магнит, начиная толкать электролит. Таким образом, сигналы, получаемые в процессе калибровки, соответствуют реальным сейсмическим сигналам с той же частотой и амплитудой [V. M. Agafonov, I. V. Egorov, and a. S. Shabalina, “Operating principles and technical characteristics of a small-sized molecular-electronic seismic sensor with negative feedback,” *Seism. Instruments*, vol. 50, no. 1, pp. 1–8, 2014].

Считываем сигнал на выходе с каждого из датчиков и в программе DADiSP строим спектры всех полученных сигналов. Затем смотрим на отношения спектров выходных сигналов к спектру входного. Результаты представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Зависимость отношений пика выходного сигнала к пику входного сигнала

Частота, Гц	1-ый датчик	2-ой датчик	3-ий датчик
1	0,072	0,075	0,073
2	0,094	0,096	0,096
8	0,098	0,107	0,110
32	0,101	0,107	0,112
128	0,092	0,095	0,092
200	0,086	0,077	0,078
300	0,098	0,056	0,061

Таким образом, полученная частотная характеристика соответствует заявленному частотному диапазону 1–300 Гц. Отметим, что данный метод не позволяет получить абсолютное значение коэффициента преобразования в В/м/с, в отличие от методов, связанных с использованием вибростенда или сличением спектров выходных сигналов с

референсным датчиком. Преимуществом метода является его применимость в полевых условиях.

4.2. Выполнение функции контроля характеристик датчиков и качества сейсмических данных при совместной работе с БВС

Метод, сканирования по частотам, использованный в предыдущем разделе обладает высокой точностью, поскольку использует гармонические сигналы, которые могут быть исследованы с применением спектральных методов и получением крайне высокого отношения сигнал/шум на выделенных дискретах. Более удобным в полевых условиях является методом калибровки с применением в качестве входного импульсного сигнала или функции Хевисайда.

Указанная функция реализована следующим образом. На борту БВС установлен одноплатный компьютер Raspberry Pi. Взаимодействие с сейсмическими нодами построено следующим образом. Каждый сейсмический нод создает свою Wi-Fi сеть, название которой соответствует серийному номеру нода. При приближении БВС на достаточное для беспроводной передачи данных расстояние Raspberry Pi подключается к сети прибора и подает команды на выполнение тестирования.

В данный момент выполняются следующие команды:

1. Контроль качества данных. Компьютер на борту беспилотника подает команду на передачу данных с указанием длительности передаваемых данных. Данные передаются в текущем времени, сохраняются в памяти компьютера без обработки. Обработка проводится оператором. Целью обработки является контроль качества принимаемых сигналов, вычисление отношения сигнал/шум для точки приема, выявление точек, в которых не обеспечивается надлежащий контакт датчика с грунтом.
2. Для проверки частотных характеристик датчика и исправности регистрирующего тракта с встроенного в БВС Raspberry Pi подается команда о запуске калибровочного сигнала, в качестве которого применяется десятисекундный импульс заданной амплитуды. После считывания отклика датчиков данные по Wi-Fi отправляются обратно на Raspberry Pi. Пример такого отклика показан на рисунке 17:

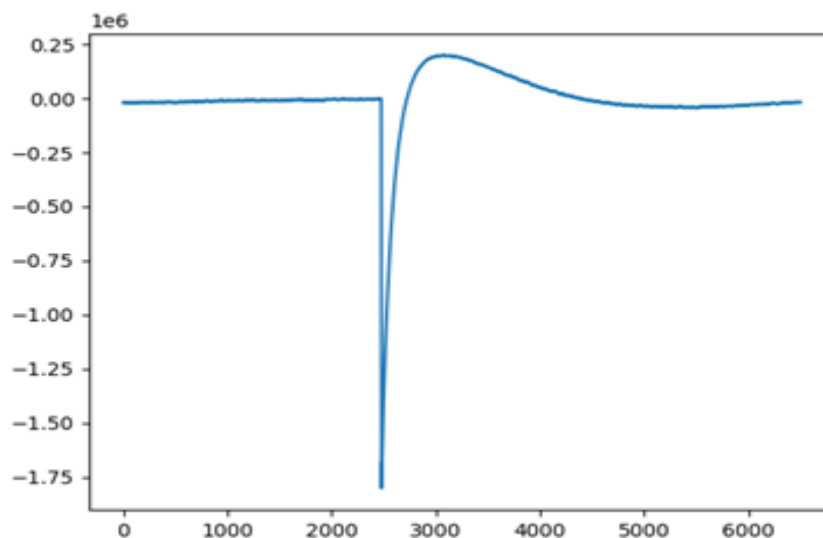


Рисунок 17 – Отклик датчика на тестирующее воздействие

Далее на одноплатном компьютере запускается программа, которая находит минимум и максимум сигнала. Вычисляя между ними разницу по вертикали — величину отклика, а также разницу по оси времени — его длительность, сравнивает полученные значения с соответствующими эталонными величиной (2 Вольт) и длительностью отклика (0,6 секунды). Допустимое отклонение могут быть выставлены в программе. Обычно, приемлемым считается отклонение в пределах $\pm 5\%$. В зависимости от результата проверки выводится сообщение об исправности или неисправности датчиков.

По завершении взаимодействия с нодом, в зависимости от пилотного задания, БВС либо перемещается к следующему устройству, повторяя описанный выше алгоритм, либо возвращается на командный пункт для просмотра и обработки собранных данных.

4.3. Характеристики цифровой системы и аналого-цифрового преобразователя

Тестирование аналогово-цифрового преобразователя платы заключается в проверке коэффициента преобразования, амплитуды напряжения максимального неискаженного входного гармонического сигнала и измерения с.к.з. шума, приведенного ко входу.

Для первого измерения применяется калиброванный источник сигнала и высокоточный вольтметр постоянного тока, считываются показания АЦП и вычисляется фактический коэффициент преобразования. Номинальное значение этого параметра определяется, как $\frac{4,096 \text{ В}}{2^{31} \text{ отсчет}}$ и составляет $1,907 \frac{\text{нВ}}{\text{отсчет}}$.

Границы максимального входного напряжения определяются величиной опорного источника и составляют $\pm 4,096 \text{ В}$. Методикой проверки допускается ухудшение величины любой из границ вследствие смещения нуля на 50 мВ.

Измерение уровня собственных шумов производится путем длительной (2–4 часа) записи отсчетов АЦП, нагруженного на эквивалент выходного сопротивления геофона – металлопленочный резистор сопротивлением 1 кОм. Полученная при этом запись разбивается на 12–16 отрезков, для каждого из которых производится взятие амплитудного спектра по мощности (квадрата амплитуды напряжения). Далее итоговое значение шумовой спектральной плотности по мощности для каждой точки берется, как средневзвешенное значение шумовых спектральных плотностей каждого из отрезков. Применяемое усреднение позволяет ослабить вклад случайных импульсных помех в шумовом спектре и сделать его более монотонным [Д. В. Пономаренко *et al.*, “Диагностика методом естественных полей.pdf,” *Приборы и системы разведочной геофизики*, no. 2(77), pp. 81–92, 2023] Среднеквадратичное значение шумового напряжения может быть получено путем интегрирования значений шумовой спектральной плотности напряжения в рабочем диапазоне частот.

На рисунке 18 приведены шумовые спектры АЦП, полученные для двух разных частот опроса – 100 Гц и 1000 Гц. Для облегчения понимания масштабов сигналов спектры приведены к значениям амплитуд входного напряжения и затем пересчитаны ко входным скоростям через типовой коэффициент преобразования активного геофона 250 В/м/с. На этот же рисунок нанесены модельные кривые естественного шума Земли NLNM и NNNM Петерсона [Peterson, J. (1993) *Observations and Modeling of Seismic Background Noise*. U.S.G.S, Open File Report, 93-322, 95 p.], применяемые в качестве референсных в сейсмологии и пересчитанные ко входным скоростям для согласования масштабов графиков.

Из представленного графика видно, что в большей части спектра собственный шум лежит ниже Low-Noise Model, что означает достаточно низкий для большинства применений уровень шума. Отметим, что данный результат соответствует определенному типу использованного датчика. В частности, при использовании стандартного электродинамического геофона эквивалентный шум вырастет на порядок за счет более низкого коэффициента преобразования и, дополнительно будет возрастать в области низких частот обратно пропорционально квадрату частоты, начиная с 10 Гц.

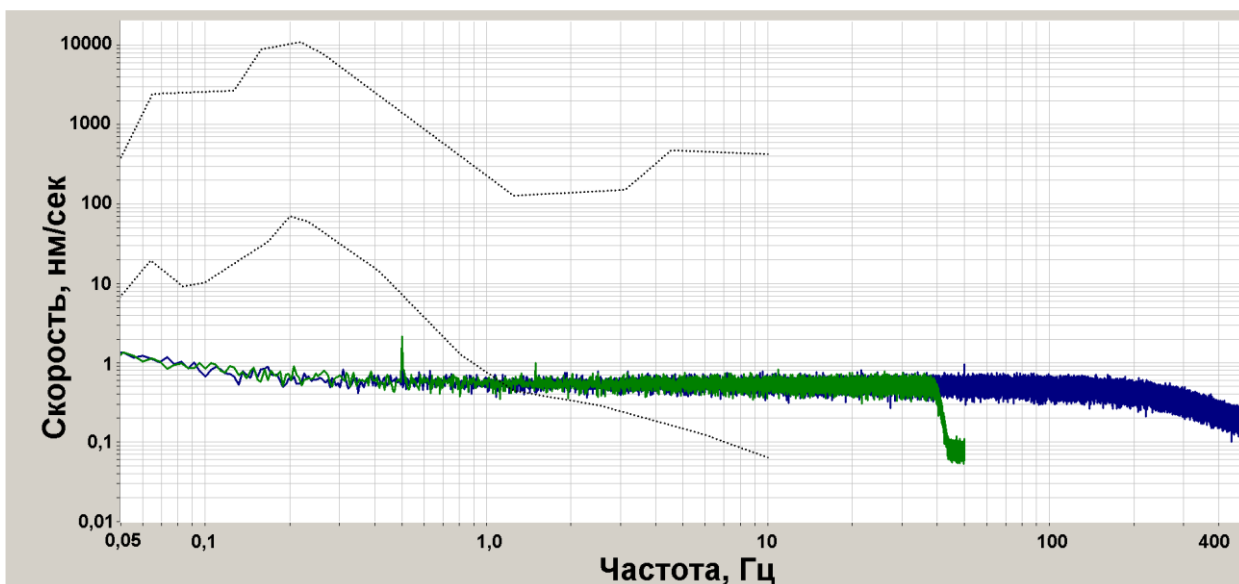


Рисунок 18 – Спектры шумов АЦП в диапазоне 0,05–500 Гц, приведенные к чувствительности $250 \frac{В}{м/с}$, при частотах опроса 1000 Гц (синий) и 100 Гц (зеленый). Черным – модельные кривые Петерсона NHNM (сверху) и NLNM (снизу)

4.4. Анализ результатов испытаний и оценка соответствия полученного решения целям проекта

Для анализа соответствия полученных результатов целям проекта воспользуемся перечнем выработанных на предшествующем этапе проекта требований, которым должен удовлетворять разрабатываемый в проекте сейсмический модуль. В таблице 2, ниже, по пунктам, приводится анализ соответствия результатов разработки указанным требованиям.

Таблица 2. Перечень соответствия характеристик нода, выработанным ранее требованиям.

Требование	Результат
Широкий частотный диапазон – от единиц Гц до нескольких сотен Гц	Получен частотный диапазон от 1 до 250 Гц
Разрядность АЦП – 24 разряда	Используется АЦП 24 разряда
Динамический диапазон – не менее 120 дБ	Динамический диапазон по результатам испытаний соответствует 130 дБ
Наличие в тракте записи или в тракте воспроизведения фильтров ФНЧ, ФВЧ и РФ с широким набором частот среза	Имеются встроенные аналоговые (частота среза 250 Гц) и цифровые фильтры (частота среза 0.55 от частоты Найквиста)
Скорость передачи данных по беспроводному каналу – не хуже 50 кБит/сек;	Измерена (см. раздел 5 отчета) скорость передачи данных не менее 120 кБит/сек при расстоянии 100 метров на открытом воздухе
Наличие интерфейса связи с внешним компьютером	Имеются интерфейсы WiFi и USB для подключения к внешнему компьютеру.

	В силу ограничений в скорости передачи данных WiFi предпочтительно использовать для контроля качества данных, USB – для скачивания данных в полном объеме.
Наличие внутренней память большой емкости, предназначенной для хранения зарегистрированный данных, с возможностью ее расширения;	SD карта от 32 до 128 Гб
Возможность перепрошивки микропрограмм	Имеется возможность перепрошивки
Развитое программное обеспечение, обеспечивающее широкий набор возможностей получения сейсмической информации высокого качества;	Программное обеспечение позволяет выбирать частоты опроса, задает параметры работы: по расписанию, при наличии синхронизации, по включению питания.
Широкий набор средств диагностики, как технического состояния аппаратуры самой сейсмостанции, так и геофонов в расстановке.	Имеются встроенные средства для калибровки датчиков и для самотестирования цифровой системы.
Непрерывная регистрация, мониторинг с GPS синхронизацией;	Реализованы непрерывная регистрация, мониторинг с GPS синхронизацией;
Надежное и гибкое полевое оборудование, обеспечивающее: непрерывную регистрацию или регистрацию только по запуску; «горячую» замену аккумуляторных батарей; корреляцию и накапливание данных непосредственно в полевом модуле, либо передачу необработанных данных в компьютер системы;	Оборудование обеспечивает непрерывную регистрацию с накопление данных в модуле
Развитое программное обеспечение, обеспечивающее широкий набор возможностей получения сейсмической информации высокого качества;	Данное требование не реализовано в полном объеме, поскольку проект находится на своей ранней стадии.

Проведенный анализ показывает соответствие полученных результатов целям проекта.

5. ПОЛЕВАЯ АПРОБАЦИЯ СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ ГРУППЫ БВС ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ПОЛЕТНЫХ ЗАДАЧ

Рассмотрим задачу планирования движения группы БВС для расстановки сейсмических датчиков. Имеется: известное количество БВС и их основные характеристики: координаты начального местоположения, диапазон скоростей, дальность полета, угол обзора, минимальный радиус разворота; количество целей и их характеристики: географические координаты целей, время нахождения в целевой точке и вид работ, осуществляемых БВС в точке;

Решение данной задачи состоит из трёх этапов: этап формирования матрицы соответствий между целевыми объектами, которые могут быть выражены в географических координатах, и БВС из группы; этап планирования траекторий до назначенных целей и этап устранения потенциальных столкновений между БВС. Матрицей соответствия в рассматриваемом решении считается матрица распределения всех целей или набора целей для группы БВС. Из матрицы соответствия производится поиск маршрута для каждого БВС одним из известных алгоритмов (вероятностные алгоритмы, эвристические алгоритмы, алгоритм потенциальных полей). Алгоритм предотвращения столкновений обеспечивает, на основе сгенерированных траекторий для каждого БВС, обеспечивает изменение данных траекторий для устранения коллизий между БВС во время движения. Каждый из перечисленных этапов метода может быть представлен в виде определенного алгоритма. На первом этапе – алгоритм распределения целей, на втором – алгоритм планирования траекторий, на третьем – алгоритм устранения столкновений. Комплекс из трех алгоритмов позволяет сформировать единый метод планирования траекторий для группы БВС, выполняющих полетное задание по доставке сейсмических сенсоров.

Структурная схема метода приведена на рисунке 19.

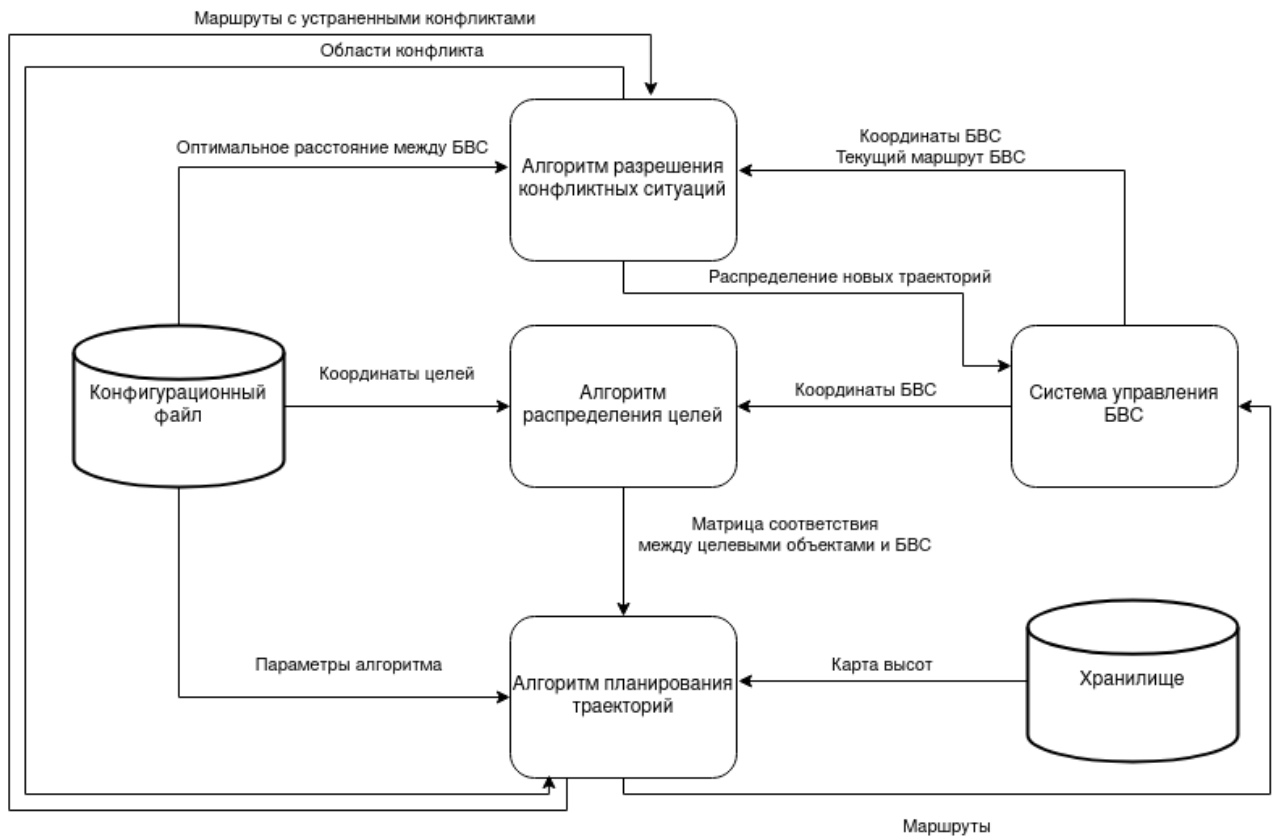


Рисунок 19 – Структурная схема

На начальном этапе планирования маршрутов происходит распределение целей. На вход алгоритму распределения целей поступают координаты целей из конфигурационного файла и текущее местоположение БВС из системы управления. Алгоритм распределения целей на основе расстояний между целями и БВС формирует матрицу распределения целей между БВС, содержащую сопоставление между координатами БВС и распределенными целями.

Следующим этапом является формирования траекторий. Алгоритм планирования траекторий формирует траектории, представляющие собой набор точек. На вход алгоритму поступает полученная матрица соответствия, карта высот для определения препятствий и параметры алгоритма, регулирующие вид формирующихся траекторий и скорость работы алгоритма. Сформированные траектории поступают системе управления БВС для выполнения миссий.

Далее следует процесс отслеживания конфликтных ситуаций между БВС. Конфликтная ситуация заключается в наличии потенциального столкновения между БВС в случае пересечения траектории одного БВС другими. На вход алгоритму разрешения конфликтных ситуаций поступают текущие координаты БВС из системы управления и текущие маршруты БВС. Алгоритм обеспечивает нахождение БВС на некотором заданном оптимальном расстоянии друг от друга. В случае нарушения некоторыми БВС данного

ограничения, алгоритм запрашивает остановку данных БВС, формирует области конфликта, которые необходимы устранить, отправляет текущие траектории с помеченными областями конфликта алгоритму планирования траекторий для устранения коллизий. Алгоритм планирования траекторий передает новые бесколлизийные траектории алгоритму разрешения конфликтных ситуаций, после чего алгоритм разрешения конфликтных ситуаций формирует распределение новых траекторий, минимизируя временные издержки, возникающие при облете друг друга конфликтных БВС.

5.1 Алгоритм распределения целей

Задачу распределения целей в группе БВС можно сформулировать как несбалансированную задачу о назначениях [Spivey M. Z., Powell W. B. The dynamic assignment problem //Transportation science. – 2004. – Т. 38. – №. 4. – С. 399-419.]:

Имеется m беспилотных летательных аппаратов и n задач. Каждое БВС способно выполнить несколько задач, ни одна задача не может быть назначена более чем на одно БВС. Каждая пара БВС и назначенных задачах имеет некоторую стоимость выполнения C_{ij} , $i=1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$. Необходимо найти оптимальную политику назначения заданий БВС, при которой все задания должны быть выполнены, и общая стоимость выполнения всех задач должно быть минимальным:

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij}$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \geq 1, i = 1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, n$$

$$X_{ij} \in \{0,1\}$$

Одним из первых алгоритмов, разработанных для решения задачи распределения целей (задач, функций) между группой агентов, является Венгерский алгоритм [Kuhn H. The Hungarian Method for the Assignment Problem // Naval Research Logistics. 1955 Vol. 52 P. 7–21.], который позволяет распределить агентов по целевым функциям таким образом, чтобы минимизировать затраты на их выполнение. Другим вариантом решением задачи

распределения целей использование потенциальных полей для притяжения РС (робототехнических средств) к свободным целевым позициям [Zavlanos M., Pappas G. Dynamic assignment in distributed motion planning with limited information // Proc. of the American Control Conference. USA, New-York City, 2007 P. 1173–1178.]. Достоинствами данного метода являются его децентрализованность и возможность обеспечивать одновременное решение задачи целераспределения и синтеза структуры строя. Недостаток данного метода проявляется в тех случаях, когда сенсорная и коммуникационная подсистемы РС не позволяют идентифицировать уже занятую целевую позицию на достаточном удалении, что приводит к их избыточным перемещениям. Для решения задачи целераспределения также нередко используются методы: релаксаций Лагранжа [Ni M., Yu Z., Ma F., Wu X. A Lagrange Relaxation Method for Solving Weapon-Target Assignment Problem // Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering. 2011 Vol. 1 P. 1 – 10.], линейного целочисленного программирования и нелинейных сетевых потоков [Rockafellar R. Network Flows on Monotropic Optimization // USA, New-York: Wiley, 1984.616 p.], динамического программирования [Sikanen T. Solving Weapon Target Assignment Problem with Dynamic Programming // Independent research projects in applied mathematics. 2008 32 p], нечетких моделей [Mukhedkar R., Naik S. Weapon Target Allocation Problem Using Fuzzy Model // Intern. J. of Application or Innovation in Engineering & Management. 2013 Vol. 2 № 6 P. 279 – 289], нейронных сетей [Wachholder E. A Neural Network-Based Optimization Algorithm for the Static Weapon-Target Assignment Problem // ORSA J. on Computing 4 1989 P. 232–246.], генетических алгоритмов [Lu Y., Miao W., Li M. The Air Defense Missile Optimum Target Assignment Based on the Improved Genetic Algorithm // J. of Theoretical and Applied Information Technology. 2013 Vol. 48 № 2 P. 809 – 816.], муравьиных алгоритмов [A Hybrid Heuristic Ant Colony System for Coordinated Multi-Target Assignment / B. Liu, Z. Qin, R. Wang, Y-B. Gao, L-P. Shao // Information Technology Journal. 2009 Vol. 8 № 2 P. 156–164].

Однако использование данных алгоритмов ограничивается случаями, когда количество задач совпадает с количеством агентов. Для преодоления данного ограничения вводятся фиктивные агенты, но в таком случае задачи, распределенные фиктивным агентам, остаются невыполненными. Для решения задачи в случае, когда число задач больше числа агентов $n \geq m$ предлагается использовать модифицированный венгерский алгоритм [Rabbani Q., Khan A., Quddoos A. Modified Hungarian method for unbalanced assignment problem with multiple jobs //Applied Mathematics and Computation. – 2019. – Т. 361. – С. 493–498.], алгоритм которого представлен на рисунке 20.

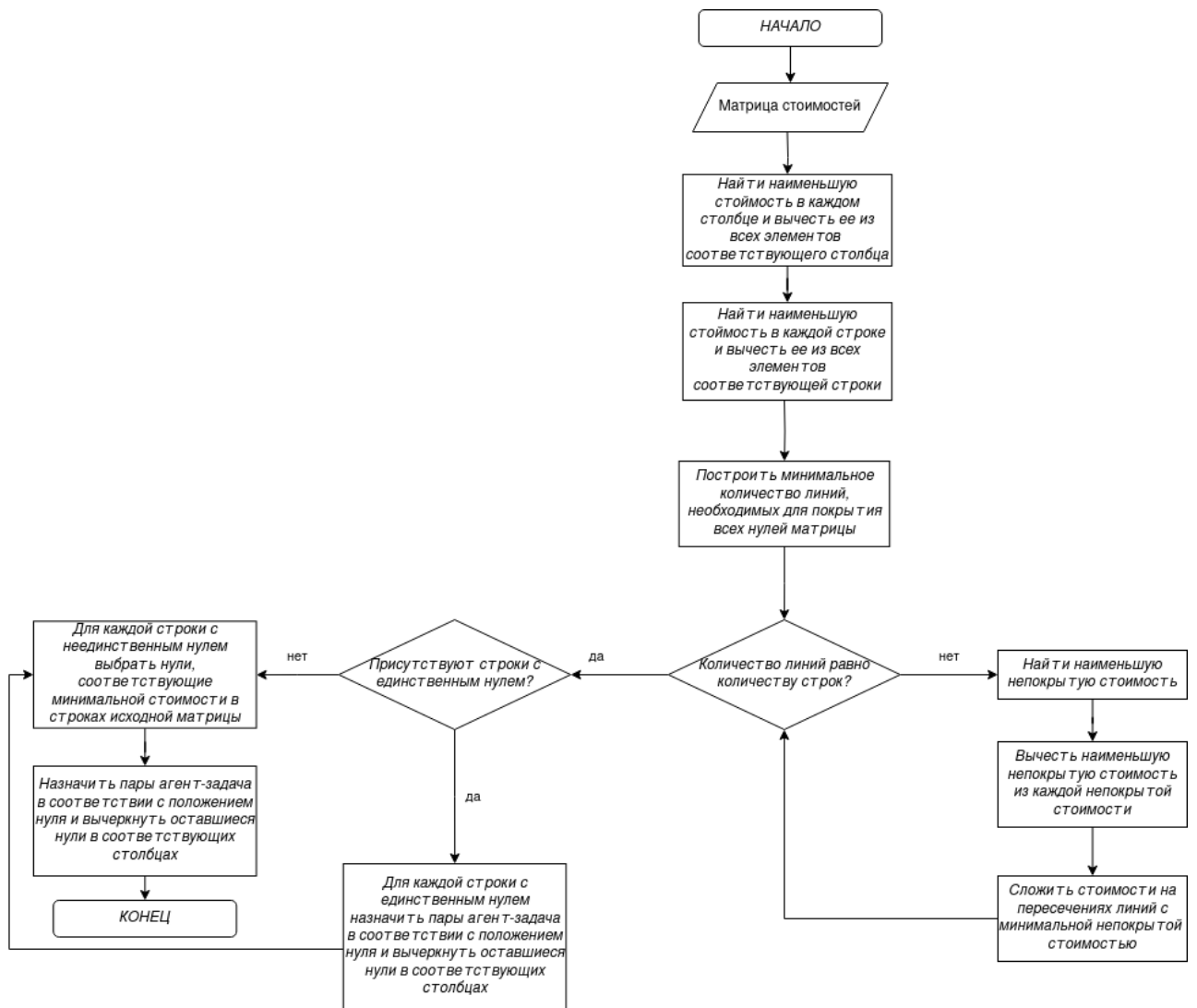


Рисунок 20 – Модифицированный венгерский алгоритм

На вход алгоритму поступает матрица стоимостей, элементы которой содержат расстояния между каждым БВС из группы и всеми целями. Столбцами матрицы являются задачи, а строки – БВС. Алгоритм решает задачу оптимизации путем поиска значений в матрице, которые необходимо вычесть из всех элементов каждой строки и каждого столбца такие, что все элементы останутся неотрицательными, но появятся нулевые решения. Результатом работы алгоритма является модифицированная матрица стоимостей, содержащая нулевые элементы, положение нулевого элемента определяет назначение очередной задачи одному из БВС группы.

Исходя из положения нулей в результирующей матрице составляется матрица соответствия, сопоставляющая координаты БВС с координатами распределенных задач.

5.2 Алгоритм планирования траекторий

Методы планирования траектории можно разделить на глобальные и локальные [Sullivan J.C.W., Pipe A.G. Path planning for redundant robot manipulators: a global optimization approach using evolutionary search // 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. 1998 vol. 3 pp. 2396–2400]. В первом случае БВС доступна полная карта препятствий окружающей среды, во втором – БВС строит карту и планирует свой путь по мере своего продвижения к цели, используя бортовые датчики. К классическим глобальным (статическим) алгоритмам планирования пути относятся все алгоритмы поиска на графе, построенному на основе карты окружающей среды, включая алгоритмы DFS, BFS, алгоритм A* [Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B.A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths // IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics. 1968 vol. 4 no. 2 pp. 100 107.], алгоритм на основе вероятностного метода: RRT [LaValle S.M. Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning // Iowa State University Ames. 1998 4 p.], Theta* и другие. Основной недостаток статических алгоритмов — это отсутствие адаптации РС к изменяющимся параметрам окружающей среды. В связи с этим, используя только алгоритмы статического планирования в групповом управлении, невозможно исключить коллизии с другими агентами группы и динамическими препятствиями.

Для усовершенствования алгоритмов статического планирования можно воспользоваться различными методами, в частности, дополнить базовый алгоритм графом Вороного [Nagatani K., Iwai Y., Tanaka Y. Sensor based navigation for carlike mobile robots using Generalized Voronoi Graph // 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2001 vol. 2 pp. 1017 1022.]. Граф Вороного используется для построения первоначального пути, который служит отправной точкой для итерационного. поиска. В отличие от алгоритмов поиска по графу видимости и алгоритмов семейства RRT, которые находят кратчайший путь, граф Вороного безопасны для агента маршруты относительно расстояний до препятствий окружающей среды в каждой точке маршрута, что обусловлено принципом построения графа. Однако, граф Вороного все равно не исключает проблему возникновения столкновений между агентами в группе.

Примерами классических алгоритмов динамического или локального планирования пути являются алгоритм D* [Stentz A. Optimal and efficient path planning for partially-known environments // International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 1994 vol. 94 pp. 3310–3317.] и его более распространенная версия D* Lite [An T. Le; Minh Q. Bui; Than D. Le; Nauth Peter D* Lite with Reset: Improved Version of D* Lite for Complex Environment 2017 First IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC) DOI: 10.1109/IRC.2017.52] и

модификации алгоритмов на основе RRT, включая RRT* [Karaman S., Frazzoli E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning // The International Journal of Robotics Research. 2011 vol. 30 no. 7 pp. 846–894.] и RRTX [Otte M., Frazzoli E. RRT X: Real Time Motion Planning/Replanning for Envi-ronments with Unpredictable Foundations of Robotics XI. 2015 pp. 461–478.] и ADRRT*-Connect [Chen Y., Wang L. Adaptively Dynamic RRT*-Connect: Path Planning for UAVs Against Dynamic Obstacles //2022 7th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE). – IEEE, 2022. – С. 1-7.]

Выбор эффективного алгоритма планирования движения зависит от наличия или отсутствия входных данных об окружающей среде, вычислительных характеристик БВС и его технических возможностей. Методы, предложенные выше, часто используются в задачах поиска пути на карте рабочей области группы от заданных целевых координат до известных конечных координат. При этом рабочая область, где находится группа, может быть с высокой плотностью застройки.

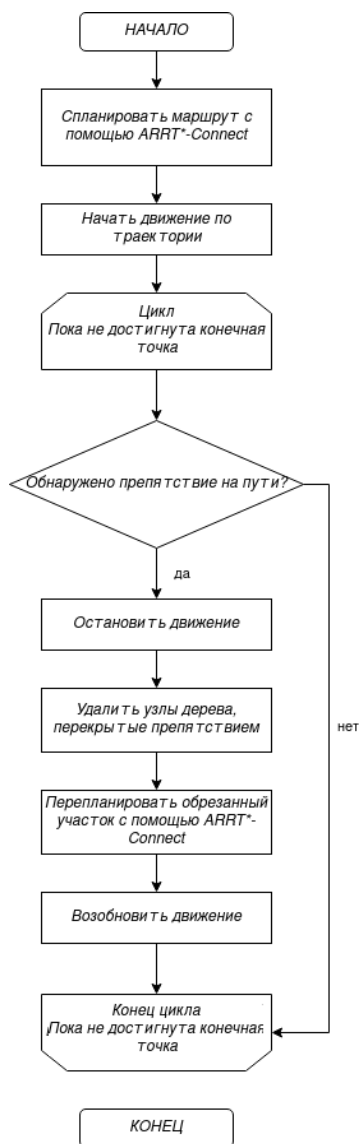


Рисунок 21 – Алгоритм ADRRT*-Connect

Предлагается использовать алгоритм ADRRT*-Connect – алгоритм планирования на основе RRT*, обеспечивающий построение оптимального маршрута и их перепланирование при обнаружении динамического препятствия. ADRRT*-Connect является модификацией алгоритма RRT*-Connect с введением механизма обрезки-пересоединения деревьев при обнаружении динамических препятствий и механизма адаптивной выборки состояния в пространстве состояний. Схема алгоритма приведена на рисунке 21.

5.3. Тестирование разработанного решения

Для апробации данного решения была разработана симуляционная среда (рисунок 27) в Gazebo [Gazebo // Gazebo URL: <https://gazebo.org/home>] и разработано программное обеспечение на базе ROS2 [ROS - Robotic Operating System // ROS: Home URL: <https://www.ros.org/>]. В качестве языка программирования использован C++, дополнительно использованы библиотека линейной алгебры Eigen [Eigen // Eigen URL: https://eigen.tuxfamily.org/index.php?title=Main_Page] и библиотека для реализации карты препятствий Grid Map [Grid Map // ANYbotics/grid_map: Universal grid map library for mobile robotic mapping URL: https://github.com/ANYbotics/grid_map]. В качестве автопилота использован PX4 [PX4 // Open Source Autopilot for Drones URL: <https://px4.io/>].

На территории размером 8x8 км проведено стохастическое распределение точек расстановки сейсмодатчиков плотностью не менее 7 сейсмодатчиков на кв.км с учетом пригодности местности. Итого количество назначаемых задач составило 448 целей. Количество БВС в экспериментах варьировалось: по 4, 7 и 10 штук на каждый эксперимент.

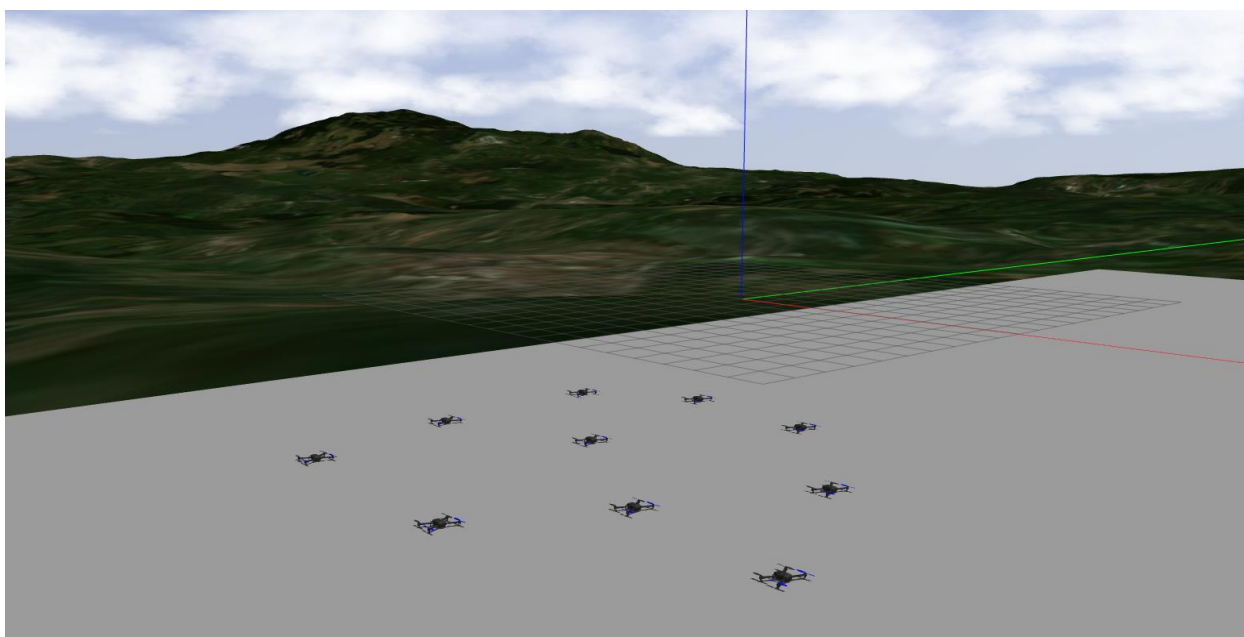


Рисунок 22 – Симуляция в Gazebo

На начальном этапе алгоритм распределения целей назначает цели каждому БВС. Затем генерируются траектории для целей и передаются БВС. БВС начинают миссию по установке датчиков, после установки датчика БВС возвращаются на базу для получения нового датчика или замены батареи при необходимости. Получение нового датчика и замена батареи имитировались задержкой 10 секунд для получения нового датчика и 5 минут для замены АКБ. После возврата на базу генерируется следующая траектория в соответствии с распределением задач и БВС отправляется устанавливать следующий датчик. Процесс заканчивался после установки всех датчиков.

Результаты работы алгоритма распределения целей приведены в Таблице 3.

Таблица 3 – Результаты работы алгоритма распределения целей

Кол-во БВС	БВС	Количество задач	Время работы алгоритма, сек.
4	1	109	0.008
	2	115	
	3	108	
	4	116	
7	1	65	0.007
	2	66	
	3	56	
	4	70	
	5	49	
	6	66	
	7	76	
10	1	42	0.007
	2	32	
	3	47	
	4	51	
	5	32	
	6	59	
	7	46	
	8	47	
	9	46	
	10	46	

Видно, что вне зависимости от соотношения «количество БВС — количество задач» алгоритм обеспечивает практически мгновенное распределение. Среднее время

распределения для всех случаев составило 0.007 секунд. Таким образом алгоритм обеспечивает распределение задач в реальном времени.

Результаты работы алгоритма построения маршрутов приведены в Таблице 4.

Таблица 4 – Результаты работы алгоритма построения маршрутов

Кол-во БВС	БВС	Количество задач	Среднее время расчета одной траектории
4	1	109	0.042
	2	115	0.039
	3	108	0.103
	4	116	0.035
7	1	65	0.038
	2	66	0.041
	3	56	0.040
	4	70	0.067
	5	49	0.088
	6	66	0.034
	7	76	0.071
10	1	42	0.056
	2	32	0.059
	3	47	0.064
	4	51	0.031
	5	32	0.044
	6	59	0.088
	7	46	0.065
	8	47	0.041
	9	46	0.052
	10	46	0.056

Среднее время расчета одной траектории складывалось из среднего времени расчета траектории до каждой из целей и времени перерасчета траектории в конфликтных ситуациях и зависело от особенностей рельефа и количества конфликтных ситуаций. Максимальное среднее время расчета одной траектории составляет 0.103, 0.88 и 0.88 секунд для групп из 4, 7 и 10 БВС соответственно, минимальное время – 0.039, 0.034, 0.031 соответственно. В случаях с максимальным средним временем расчета одной траектории больше времени затрачивалось на планирование траектории в связи с большим количеством препятствий в виде рельефа и большим количеством конфликтных ситуаций. В случаях с минимальным временем наблюдалось существенно меньшее количество

конфликтных ситуаций и более гладкий рельеф. Тем не из полученных данных видно, что алгоритм справляется с решением задачи в режиме реального времени.

Время, затраченное на прохождение всех миссий, приведено в Таблице 5.

Таблица 5 – Время, затраченное на прохождение всех миссий

Кол-во БВС	БВС	Количество задач	Время выполнения миссий, мин
4	1	109	513.66
	2	115	520.02
	3	108	512.88
	4	116	521.11
7	1	65	222.35
	2	66	223.76
	3	56	183.84
	4	70	230.90
	5	49	167.12
	6	66	224.35
	7	76	232.17
10	1	42	145.13
	2	32	131.33
	3	47	166.26
	4	51	169.45
	5	32	132.51
	6	59	174.76
	7	46	162.43
	8	47	164.67
	9	46	163.54
	10	46	165.21

Из таблицы видно, что больше всего времени было затрачено на установку датчиков в группе из 4 БВС, что коррелирует с большим количеством задач, соответственно и большим временем полета и необходимости в большем количестве циклов замены батарей. Меньше всего времени затрачено в группе из 10 БВС. Из полученных результатов можно сделать вывод, что целесообразно осуществлять использование группы БВС для решения задачи расстановки сейсмических сенсоров на местности, что обеспечивает ускорение процесса расстановки устройств и обслуживания выделенной территории в целом.

5.5. Полевая апробация разработанного решения

В целях полевой апробации системы планирования траекторий движения для группы БВС при выполнении полетных задач были проведены испытания в условиях, приближенных к реальным эксплуатационным. Для этого была проведена имитация миссии по установке семи сейсмодатчиков на площади 1 квадратный километр с помощью двух и четырех БВС. Для сравнения работы алгоритмов и качества выполнения задачи в реальных условиях с условиями моделирования, было проведено дополнительное моделирование выполнения данной миссии в среде Gazebo. В качестве тестовых БВС использовались 4 малоразмерных БВС, оснащенных полетными контроллерами Pixhawk и MAVLink телеметрией для коммуникации с наземными станциями (рисунок 23).



Рисунок 23 – Тестовое БВС

Построенные алгоритмами траектории были загружены на БВС с помощью ПО наземной станции QGroundControl [<https://qgroundcontrol.com/>]. Для имитации установки сейсмодатчика на БВС подавалась команда на посадку, задержка в 10 секунд и взлет для дальнейшего выполнения миссии. Как и в случае с моделированием, после установки датчика БВС возвращались в исходную точку для получения нового датчика (задержка 10 секунд) и замены батареи при необходимости (задержка 5 минут). Фиксировалось общее время выполнения миссии каждым БВС, результаты проведенных испытаний и их сравнение с результатами моделирования приведены в таблице 6.

Кол-во БВС	БВС	Кол-во задач	Время выполнения миссий (моделирование), мин	Время выполнения миссий (полевые испытания), мин
2	1	3	7.23	15.5
	2	4	5.76	11.1

4	1	2	3.12	6.75
	2	2	4.08	9.25
	3	2	3.55	8.5
	4	1	2.98	6.05

Во время испытаний все БВС успешно осуществили доставку сенсоров к своим целям без коллизий, замен АКБ не требовалось. Испытания показали увеличение реального времени выполнения миссии в среднем на 115%. Это вызвано, в первую очередь, различиями в максимальных скоростях движения БВС во время выполнения миссии при моделировании (16 м/с) и в реальности (10 м/с), а также задержками БВС в точках взлета и посадки при выполнении данных маневров в реальности (около 15 секунд на каждый маневр), что не было учтено при моделировании. В целом проведенные испытания по апробации показали работоспособность разработанных решений и целесообразность их использования для дальнейшего развития проекта.

6. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ГРУППЫ БВС ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ УСТОЙЧИВЫХ БЕСПРОВОДНЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ МЕЖДУ БВС И СЕЙСМИЧЕСКИМИ МОДУЛЯМИ В ПРОЦЕССЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ НОДАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ ВНЕШНЕГО ОКРУЖЕНИЯ

На сегодняшний день добыча полезных ископаемых во многом зависит от наличия информации о типах, составе и местоположения залежей, находящихся в исследуемых районах. Одним из наиболее эффективных методов сбора данных о залежах является использование сейсмических модулей, которые позволяют регистрировать и анализировать колебания, искусственно формируемые различными источниками. При проведении сейсмического мониторинга требуется осуществлять сбор данных с сейсмических модулей на местности с неоднородным рельефом, а также в отдаленных и труднодоступных районах. Перспективным решением данной проблемы является использование группы БВС, которая может произвести аэромониторинг обширных территорий и движение в различные точки рабочего пространства, вне зависимости от состава почвы, наличия непроходимых участков, и других особенностей местности, где осуществление поставленных задач сложно выполнимо с использованием наземных средств.

Основным ограничением при использовании БВС для беспроводного съема данных с сейсмических модулей, является исследуемая территория, которая требует заранее проведенного анализа геометрических параметров поверхности и типов объектов на ней. Перечисленные особенности влияют на распространение сигнала.

В данной работе предложен метод, обеспечивающий съем данных с сейсмических модулей и позиционирование группы БВС путём построения траекторий движения для беспроводного съема данных с сейсмических модулей с учетом особенностей подстилающей поверхности. На первом этапе метода осуществляется подготовка входных данных, формируется трехмерная карта местности на основе информации, полученной с лидара, установленного на БВС. На полученную карту вносятся данные о расположении сейсмических модулей и происходит построение модели распространения сигнала с учетом геометрических параметров подстилающей поверхности и объектов на ней. Для формирования бесколлизонных траекторий движения, обеспечивающих наименьшее время сбора данных с сейсмических модулей, выбранный участок местности разбивается на области, распределяется среди агентов группы, и производится расчет времени необходимого для съема данных с каждого модуля. Планирование траекторий происходит

с учетом модели распространения сигнала, текущего местоположения БВС, расположения сейсмических модулей и энергетических ресурсов каждого БВС. Апробация разработанного метода была проведена в симуляторе Gazebo. По результатам апробации был сделан вывод, что предложенный метод обеспечивает значительное уменьшение времени, затрачиваемого на съем данных с сейсмических модулей по сравнению с наземными средствами и использованием одиночных БВС.

6.1 моделирование сигнала на открытой местности с учетом рельефа

Для моделирования распространения сигнала Wi-Fi в условиях сложного рельефа можно использовать модель Окумура-Хата, которая учитывает влияние помех рельефа:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_p - L_{p2} + F,$$

где: P_r – мощность принимаемого сигнала (в децибелах), P_t – мощность передаваемого сигнала (в децибелах), G_t – коэффициент усиления антенны передатчика (в децибелах), G_r – коэффициент усиления антенны приемника (в децибелах), L_p – потери от преград (в децибелах), L_{p2} – дополнительные потери от преград (в децибелах), F – фактор, учитывающий влияние поверхности земли и рельефа.

Фактор F зависит от типа поверхности земли и рельефа, и может быть определен с использованием эмпирических данных или с помощью математических моделей.

Для расчета потерь сигнала L_p (Path Loss) может быть выражена следующей формулой:

$$L_p = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + C,$$

где d – расстояние между источником сигнала и приемником; f – частота сигнала; C – коэффициент потерь на учет преград, диффракции и других факторов.

L_{p2} (two-ray ground reflection loss) – это модифицированная формула для учета ситуации, когда сигнал отражается от земной поверхности перед приходом к приемнику. Формула L_{p2} имеет вид:

$$L_{p2} = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) - 20 \log_{10}(H_b) - 20 \log_{10}(H_m),$$

где H_b – высота базовой станции (источника сигнала) над землей; H_m – высота мобильного устройства (приемника) над землей.

Формула для определения фактора F на основе среднего значения крутизны поверхности рельефа:

$$F = (MSB / MSW) / (n - 1) / (p - 1),$$

где F – фактор, MSB – сумма квадратов межгрупповой изменчивости (межгрупповая сумма квадратов), деленная на количество степеней свободы между группами; MSW – сумма квадратов внутригрупповой изменчивости (внутригрупповая сумма квадратов), деленная на количество степеней свободы внутри группы; n – общее количество точек на поверхности рельефа; p – количество параметров, учитываемых при оценке крутизны поверхности рельефа.

6.2 Метод позиционирования группы БВС для организации устойчивых беспроводных каналов связи между БВС и сейсмическими модулями в процессе функционирования беспроводной нодальной сейсмической системы в условиях динамически изменяющегося внешнего окружения

Разработанный метод представляет включает в себя комплекс алгоритмов: целеполагания, целераспределения, планирования траекторий и разрешения конфликтов.

Этапы данного метода следующие:

1. Формирование исходных данных: карта высот, тепловая карта распространения сигнала, координаты БВС;
2. Построение битовых участков, доступных для движения БВС на карте высот;
3. Наложение битовой маски на тепловую карту распространения сигнала;
4. Построение битовой маски региональных максимумов на тепловой карте
5. Определение координат центров единичных ячеек;
6. Распределение координат БВС в группе;
7. Построение маршрутов до цели;
8. Разрешение коллизий в группе БВС.

Исходными данными для работы метода являются карта высот для определения доступности участков для осуществления движения БВС, тепловая карта для выявления участков с максимальным уровнем сигнала и координаты БВС для планирования движения и разрешения конфликтных ситуаций.

На втором этапе производится построение битовой маски согласно доступности участков на карте высот с учетом необходимой высоты полета БВС, где 1 — соответствует доступному участку. 0 — недоступному участку.

На третьем этапе происходит наложение битовой маски на тепловую карту для обнуления уровня сигнала на участках тепловой карты, соответствующих недоступным

участкам согласно карте высот, чтобы недопустить образования целей БВС, находящихся в недоступных участках.

На третьем этапе производится анализ тепловой карты. Для этого строится битовая маска, определяющая региональные максимумы на тепловой карте, где региональные максимумы представляют собой связанные компоненты пикселей с постоянным значением интенсивности, окруженные пикселями с меньшим значением. Пример проанализированной тепловой карты приведен на рисунке 24.

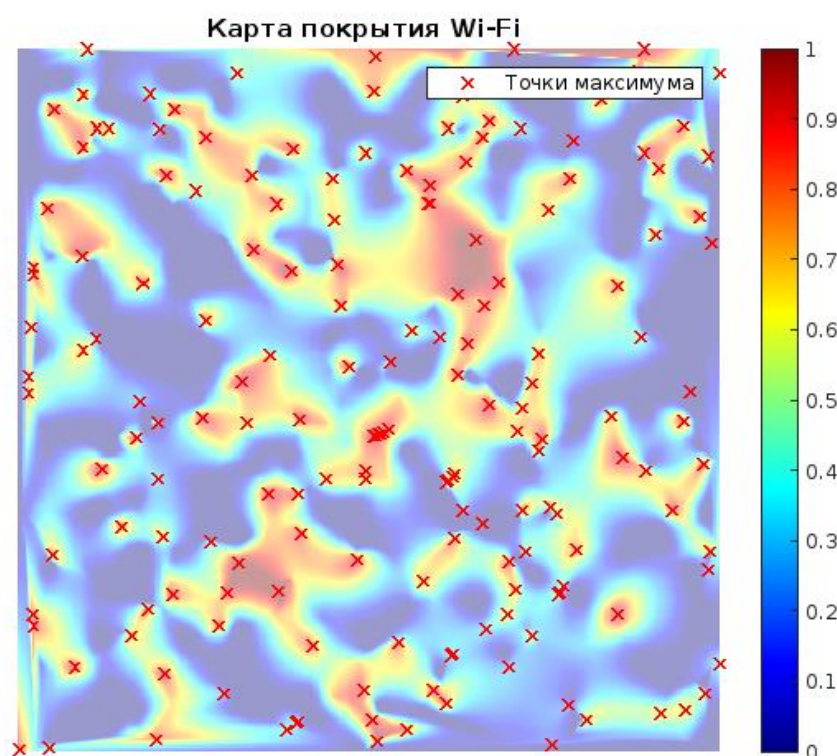


Рисунок 24 – Тепловая карта с региональными максимумами

Затем происходит вычисление координат центров единичных ячеек, вычисляется расстояние между каждым БВС и полученными целями для распределения задач.

Распределение задач для БВС является оптимизационной задачей сводится к решению несбалансированной задачи о распределении [Spivey M. Z., Powell W. B. The dynamic assignment problem //Transportation science. – 2004. – Т. 38. – №. 4. – С. 399-419.]:

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij}$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \geq 1, i = 1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, n$$

$$X_{ij} \in \{0,1\}$$

Имеется группа из m беспилотных летательных аппаратов и n задач. Каждый беспилотный аппарат может выполнять несколько задач, и каждая задача может быть поручена только одному аппарату. Стоимость выполнения каждой задачи БВС обозначается как C_{ij} , где $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$.

В качестве самого оптимального варианта предполагается использовать модифицированный венгерский метод [Rabbani Q., Khan A., Quddoos A. Modified Hungarian method for unbalanced assignment problem with multiple jobs //Applied Mathematics and Computation. – 2019. – Т. 361. – С. 493-498.], имеющий полиномиальную временную сложность. Пример работы алгоритмы по распределению задач приведен на рисунке 25.

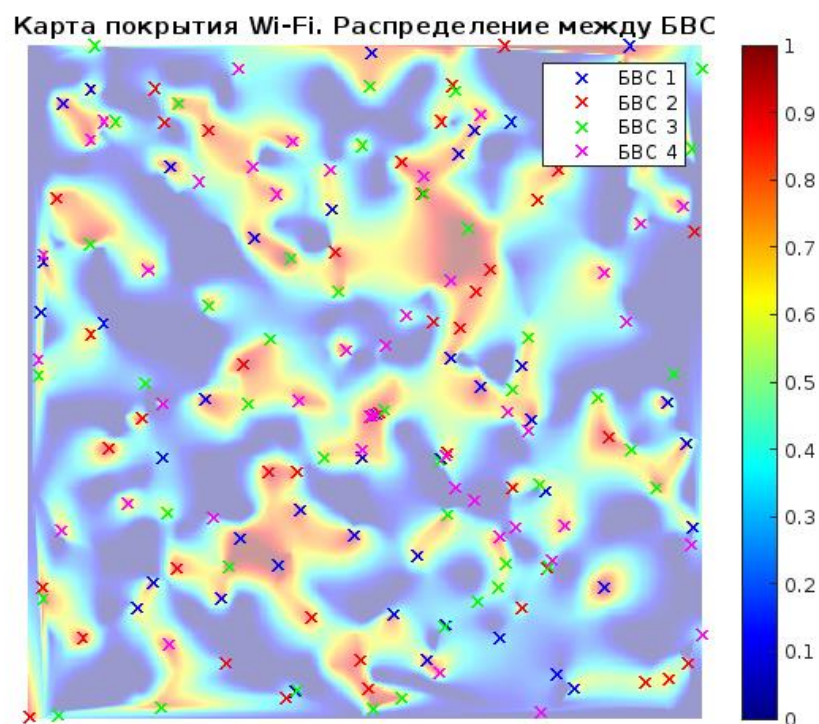


Рисунок 25 – Пример распределения задач

После распределения задач начинается процесс планирования траектории. Здесь рассматривается два случая:

1. Уровень заряда выше критического. Планируется траектория от достигнутой цели до следующей.
2. Уровень заряда ниже критического. Планируется траектория до точки посадки с целью перезарядки, затем планируется траектория до следующей цели.

В качестве планировщика предлагается использовать ADRRT*-Connect, основанный на RRT* (Rapidly-Exploring Random Trees), который обеспечивает построение оптимального маршрута и автоматическое перепланирование при обнаружении динамических препятствий. Он включает в себя механизм обрезки-пересоединения

деревьев для эффективного обхода динамических препятствий, а также механизм адаптивной выборки состояний в пространстве состояний для более эффективного планирования.

После генерации очередной траектории идет процесс отслеживания конфликтных ситуаций, схематично представленный на рисунке 26.

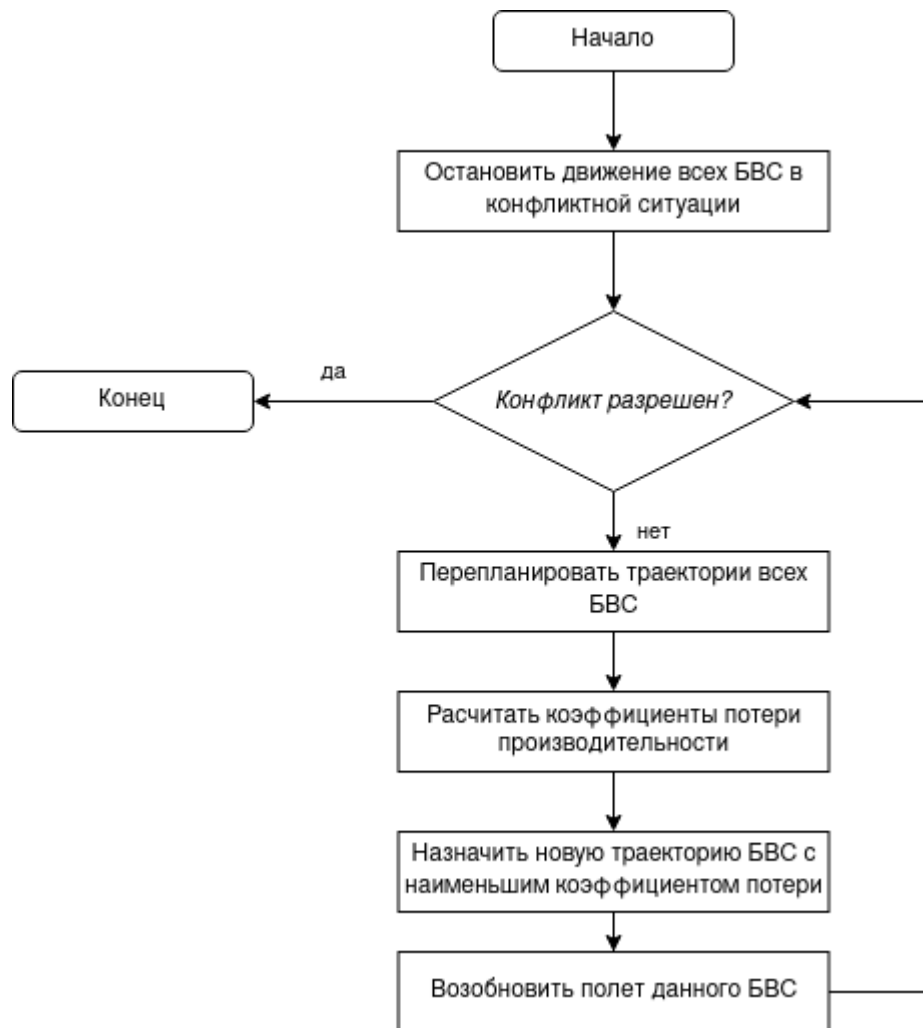


Рисунок 26 – Алгоритм предотвращения конфликтных ситуаций

В случае возникновения коллизий движение беспилотных летательных аппаратов (БВС) приостанавливается. Затем начинается итеративный процесс коррекции траекторий, количество итераций которого соответствует числу БВС в группе.

На каждой итерации проводится расчет новой траектории для каждого БВС, находящегося в конфликтной ситуации. Далее вычисляется коэффициент уменьшения производительности λ , который определяется путем сравнения длины новой траектории L_{new} с текущей длиной траектории $L_{current}$.

Выбирается БВС с минимальной потерей производительности, присваивается ему новая траектория, и ему отправляется команда на продолжение движения. Конфликт считается разрешенным, когда в группе остается только один БВС, который может продолжить следовать своей первоначальной траектории.

7. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАЗМЕТКИ ОБУЧАЮЩИХ НАБОРОВ ДАННЫХ АЭРОМОНИТОРИНГА ДЛЯ МОДЕЛЕЙ СЕГМЕНТАЦИИ МЕСТНОСТИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ЗОН, ПРИГОДНЫХ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

Сейсморазведка является актуальной и развивающейся дисциплиной геофизики, и имеет ряд как научных, так и чисто практических приложений. Сейсморазведка применяется при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых [Malehmir A. et al. Seismic methods in mineral exploration and mine planning: A general overview of past and present case histories and a look into the future //Geophysics. – 2012. – Т. 77. – №. 5. – С. WC173-WC190.], [Manzi M., Malehmir A., Durrheim R. The value of seismics in mineral exploration and mine safety //81st EAGE Conference and Exhibition 2019. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2019. – Т. 2019. – №. 1. – С. 1-5.], [Heinonen S. et al. Cost-effective seismic exploration: 2D reflection imaging at the Kylylahti massive sulfide deposit, Finland //Minerals. – 2019. – Т. 9. – №. 5. – С. 263.] [Patanè D. et al. The Urban Seismic Observatory of Catania (Italy): A real-time seismic monitoring at urban scale //Remote Sensing. – 2022. – Т. 14. – №. 11. – С. 2583.], мониторинге городских и промышленных объектов [АНТОНОВСКАЯ Г. Н., КАПУСТЯН Н. К., РОГОЖИН Е. А. Сейсмический мониторинг промышленных объектов: проблемы и пути решения //Сейсмические приборы. – 2015. – Т. 51. – №. 1. – С. 5-15.], [Butenweg C. Seismic design and evaluation of industrial facilities //European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. – Cham: Springer International Publishing, 2022. – С. 449-464.], [Tabandeh A., Sharma N., Gardoni P. Seismic risk and resilience analysis of networked industrial facilities //Bulletin of Earthquake Engineering. – 2023. – С. 1-22.], при строительстве крупных сооружений (плотины, мосты, здания) [Dolce M. et al. Osservatorio sismico delle strutture: the Italian structural seismic monitoring network //Bulletin of Earthquake Engineering. – 2017. – Т. 15. – С. 621-641.], [Oliveira S. et al. Seismic and structural health monitoring systems for large dams: theoretical, computational and practical innovations //Bulletin of Earthquake Engineering. – 2022. – Т. 20. – №. 9. – С. 4483-4512.], выборе трасс для строительства дорог, трубопроводов, тоннелей метро и т.п [Nguyen D. D. et al. Seismic vulnerability assessment of rectangular cut-and-cover subway tunnels //Tunnelling and Underground Space Technology. – 2019. – Т. 86. – С. 247-261.], [Martínez, K., & Mendoza, J. A. (2011). Urban seismic site investigations for a new metro in central Copenhagen: Near surface imaging using reflection, refraction and VSP methods. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 36(16), 1228-1236.]. Кроме того, сейсморазведка может быть применена для поиска подходящих локаций для станций сейсмического мониторинга [Karapetyan J. et al. Site

survey and assessment for the planned seismogeodynamic monitoring network in the Republic of Armenia //Earthquake Science. – 2022. – Т. 35. – №. 6. – С. 510-518.].

В настоящее время в сейсморазведке получило распространение применение беспроводных нодальных сейсмических систем. Очевидные преимущества таких подходов по сравнению с проводными системами (автономное функционирование, более лёгкий монтаж и демонтаж) обосновывают перспективность их применения в сейсморазведке. Конструкционные особенности беспроводных сейсмических сенсоров [Anikonov I. U. I. U. E., Bubnov B. A., Erokhin G. N. Inverse and ill-posed sources problems. – Vsp, 1997. – Т. 9.][Popovici A. M., Sturzu I., Moser T. J. High resolution diffraction imaging of small scale fractures in shale and carbonate reservoirs //SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference. – URTEC, 2015. – С. URTEC-2153238-MS.] позволяют осуществлять операцию монтажа с гораздо меньшими временными и трудовыми затратами по сравнению с монтажом проводной системы: для функционирования модуля достаточно обеспечить контакт считывающих датчиков модуля с грунтом. Однако, сложности в установке может вызвать сложная транспортная доступность местности, на которой планируется выполнение сейсморазведки. В этом случае наиболее перспективным является применение автономных БВС, получивших широкое распространение в последние годы. БВС способны доставлять модуль в требуемую локацию и осуществлять установку модуля на поверхность.

Процедура доставки и установки модулей нодальной сети посредством БВС актуализирует другую ключевую задачу поиска локаций, которые доступны для установки сейсмических модулей. При этом конструкционные особенности распространённых модулей определяют специфические свойства поверхностей, пригодных для монтажа модулей, что, в свою очередь, определяет типы поверхностей, пригодных для установки. Поиск локаций, доступных для установки модулей, может быть выполнен посредством анализа доступных данных о поверхности в конкретной географической локации, на которой планируется развертывание беспроводной нодальной сет. К таким данным относятся ГИС информация об объектах, расположенных на местности, информация о профиле рельефа (Digital Elevation Model – DEM), а также анализ геопространственных изображений подстилающих поверхностей, полученных со спутника или посредством аэрофотосъёмки. Наиболее перспективными для анализа изображений подстилающих поверхностей и идентификации областей, пригодных для установки сейсмических модулей, являются методы машинного обучения, которые требуют выборки репрезентативных данных, которые содержат признаки, релевантные тому или иному

классу подстилающей поверхности. Это актуализирует задачу сбора и разметки таких выборок.

Обозначенное условие релевантности данных является необходимым. Оно заключается в обеспечении точного соответствия границ и геометрических форм объектов их положению на геопанственных изображениях, а также в обеспечении соответствия постоянства классов поверхностей. Поэтому, необходима выработка специализированных методик сбора и разметки геопанственных изображений, обеспечивающих соблюдение этих условий. К сопутствующим требованиям к таким методикам необходимо также отнести обеспечение репрезентативности классов поверхностей (должны быть представлена, географической репрезентативности (должны быть представлены различные географические локации), а также репрезентативности с точки зрения времени (должны быть представлены изображения одних и тех же поверхностей в различное время). Кроме того, необходимо соблюдение одинаковых условий освещенности при съемке различных географических участков местности.

Несмотря на то, что аэрофотоснимки будут содержать более детальную информацию о расположенных на местности классах поверхностей, получение аэрофотоснимков сопряжено с трудностями, связанными с организацией полета беспилотного или пилотируемого воздушного средства. Это становится особенно очевидно, в случае необходимости получения снимков одной и той же местности в разные моменты времени. С другой стороны, получение спутниковых снимков в различных спектральных диапазонах на данный момент является широкодоступным в различные моменты времени. Поэтому рассматривается создание (сбор и разметка) выборки спутниковых мультиспектральных снимков поверхности Земли. Кроме того, сбор и разметка мультиспектральных снимков определённой местности в разные моменты времени может служить предварительным этапом сбора и разметки аэрофотоснимков этого же участка местности.

Широкий спектр задач и приложений сейсморазведки определяет также широкую географию локаций, на которых возможна установка беспроводной нодальной сейсмической системы, и, соответственно, широкий диапазон классов подстилающих поверхностей. Это обосновывает необходимость выработки универсальной системы классов поверхностей для различных географических локаций, определяющейся свойствами пригодности поверхностей для установки и обеспечивающей возможность корректной разметки.

Следует также отметить, что классы пригодных или непригодных для установки сейсмических модулей поверхностей представляют по своей сути классы поверхностей на местности, к которым относятся лесистая местность, различные виды грунта,

сельскохозяйственные угодья, городская застройка и пр. Поэтому сбор данных этих поверхностей для их дальнейшего исследования (например, на предмет соответствия какого-либо признака тому или иному классу поверхности) представляет самостоятельный исследовательский интерес, а сами данные могут быть использованы в широком диапазоне других задач анализа местности по геопространственным изображениям.

Сейсморазведка обычно производится на обширных территориях (порядка нескольких десятков кв. км). На таких территориях обычно расположено большое множество разнообразных объектов, которые необходимо размечать с высокой точностью географической привязки. Эта процедура достаточно трудоемка, поэтому требует автоматизации. Современные геоинформационные системы (ГИС) содержат обширные базы данных геопривязок объектов на местности. При этом, геопривязки объектов осуществляются с высокой точностью. Другим преимуществом ГИС является наличие геопривязок важнейших объектов (жилых поселений, промышленной и транспортной инфраструктуры) даже для малонаселенных и труднодоступных локаций. Поэтому применение ГИС-информации является перспективным для автоматизации процесса разметки. С другой стороны, системы классов объектов ГИС разрабатывались исходя из нужд логистического, коммерческого и гражданского использования, а потому требуют построения отображения на систему классов поверхностей, пригодных для установки сейсмических модулей.

7.1 Описание шагов методики сбора и разметки спутниковых снимков

Методика сбора и разметки спутниковых снимков состоит из следующих шагов:

1. Анализ предметной области и разработка системы классов поверхностей, пригодных для установки сейсмических модулей.
2. Анализ системы классов OSM и разработка процедуры отображения объектов и классов OSM в систему классов пригодных поверхностей.
3. Определение требований к геопространственным изображениям, отвечающим условиям релевантности задаче идентификации участков местности, подходящих для установки сейсмических модулей.
4. Сбор данных OSM о геопривязке объектов на местности для использования их в качестве разметки.
5. Сбор спутниковых снимков.
6. Выполнение отображения разметки OSM в систему классов поверхностей, пригодных для установки датчиков.
7. Выполнение анализа разметки.

7.2 Разработка системы классов поверхностей, пригодных для установки сейсмических модулей

Для того, чтобы выборки спутниковых снимков содержали данные, релевантные задаче идентификации пригодной поверхности для установки сейсмических модулей, необходимо определить основные классы и свойства поверхностей, соответствующие этой задаче. Для этого целесообразно разработать специфическую систему классов поверхностей, пригодных и не пригодных для установки сейсмических модулей. Система классов выводится на основе анализа экспертной информации (опрос экспертов), конструкционных особенностей беспроводных сейсмических модулей, а также анализа информации о конкретной местности, на которой планируется установка беспроводной нодалной сейсмической системы.

В рамках данной работы мы рассматриваем распространенные типы поверхностей, выявленные на основе опроса экспертов и анализа конструкционных особенностей распространенных сейсмических модулей на рисунке 27, где стрелки АКО (A Kind Of) выражают отношение принадлежности класса к более общему классу.



Рисунок 27 – Рассматриваемые типы поверхностей

Приведем краткое раскрытие содержания рассматриваемых классов.

1. Класс «Транспортная инфраструктура» содержит автомобильные дороги с различным покрытием, а также железные дороги.
2. Класс «Застройка» содержит участки городской, промышленной, коммерческой застройки
3. Класс «Водная поверхность» содержит участки натуральных и искусственных водоемов.

4. Класс «Низкая заросль» содержит участки, покрытые низкой растительностью кустарником и травами.
5. Класс «Лес» содержит участки, покрытые деревьями.
6. Класс «Открытый грунт» содержит участки, покрытые песком, открытой почвой скальные и каменистые поверхности.
7. Класс «Заболоченные поверхности» содержит участки поверхности болот – топей, торфяников.

Техническую возможность установки сейсмического модуля на поверхность в разрабатываемой системе отражает специальное бинарное свойство пригодности, которое определяет каждый конкретный экземпляр подстилающей поверхности как подходящую либо неподходящую для установки сейсмического модуля. Большой интерес здесь представляет подкласс непригодных поверхностей. Здесь можно выделить следующие признаки, по которым выполняется различие непригодных и пригодных поверхностей (рисунок 28):

1. Непосредственно свойства поверхностей, определяющие возможность установки на нее сейсмических модулей. Примером таких непригодных поверхностей служат водные поверхности.

2. Наличие хозяйственной деятельности на данном участке местности. Этот признак служит для того, чтобы различать те поверхности, свойства которых позволяют устанавливать сейсмические датчики. Однако, наличие активной хозяйственной деятельности делает невозможным использование этой поверхности для установки. Кроме того, определенный интерес представляет выделение таких поверхностей с целью исследования различий свойств, которые можно извлечь из изображений, для тех поверхностях, на которых ведется хозяйственная деятельность, и тех, на которых она не ведется.

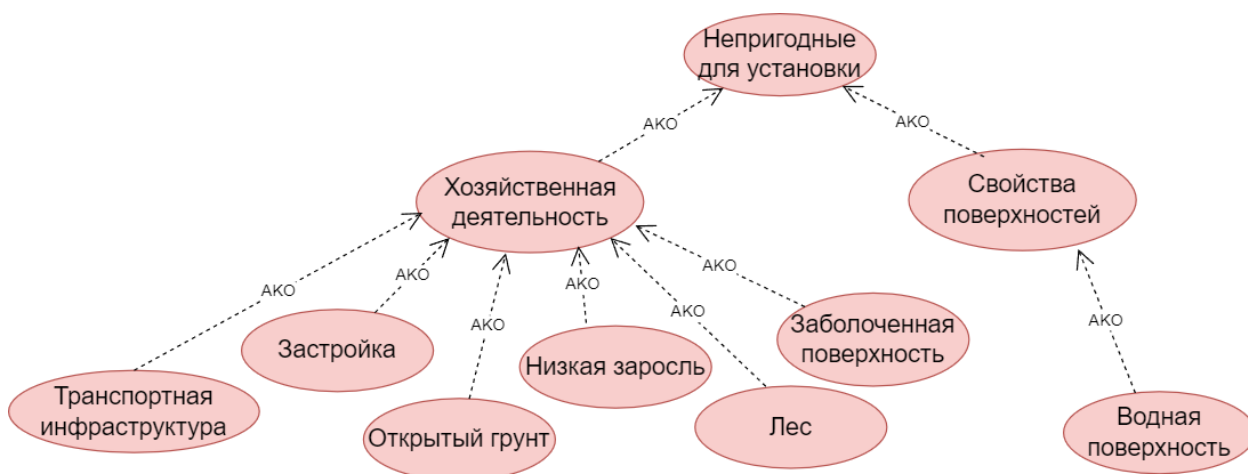


Рисунок 28 – Классы непригодных поверхностей

Пригодные поверхности, с другой стороны, в разрабатываемой системе классов характеризуются бинарным свойством пригодности и отсутствием хозяйственной деятельности на них (рисунок 29).



Рисунок 29– Классы пригодных поверхностей

На рисунках 28 и 29 видно, что некоторые классы поверхностей: «Открытый грунт», «Низкая заросль», «Лес», «Заболоченная поверхность» пересекаются для пригодных и непригодных поверхностей, что определяется признаком «Хозяйственная деятельность». Выделение для этих классов дополнительных подклассов пригодных и непригодных поверхностей целесообразно, в первую очередь, с точки зрения

Рассмотрим теперь признаки, которые могут характеризовать обозначенные выше пригодные и не пригодные для установки сейсмических модулей классы поверхностей. В приведенных исключаяющих друг друга списках присутствуют одни и те же имена классов (грунт, скальные поверхности, сельскохозяйственные угодья, которые также можно отнести к грунту). Поэтому, для их дифференцировки необходимы дополнительные признаки. К этим признакам можно отнести:

1. Принадлежность к неподходящей поверхности, определяемая ГИС данными (области, принадлежащие жилой застройке, промышленным объектам и т.д.).
2. Данные, получаемые непосредственно из мульти- или гиперспектрального изображения местности. К этим данным относятся коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) пикселей, принадлежащих к соответствующим диапазонам мульти- и гиперспектра. Различные значения из различных диапазонов мульти- или гиперспектра могут, как сами по себе характеризовать тот или иной класс поверхности, так и использоваться для вычисления специализированных спектральных индексах (NDVI, NDBI и т.д.),

характеризующих поверхности. В данной работе рассматривается мультиспектральный диапазон спутниковых снимков из набора Sentinel-2.

7.3 Анализ системы классов OSM

Система классов OSM (OSM Map Features) [https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Map_features] (рисунок 30) представляет собой иерархию вида (class, subclass). При этом глубина этой иерархии строго не ограничена.

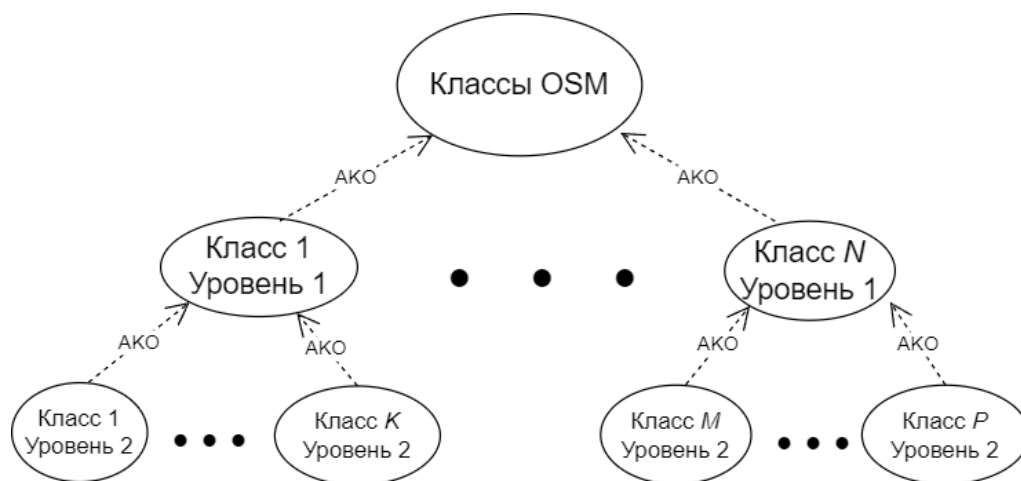


Рисунок 30 – Структура классов OSM

Система классов OSM разрабатывалась исходя из потребностей коммерческого, муниципального, логистического использования, а не с точки зрения подходящих или неподходящих для установки модулей поверхностей. Классы структуры OSM не могут быть напрямую отображены в другую систему классов без тщательной проверки соответствия свойствам целевой системы классов. Кроме того, особенности иерархии классов OSM показывают совершенно недостаточным отдельное (Separate) рассмотрение классов в пределах одного уровня иерархии при поиске соответствий с другими системами классов. Например, невозможно однозначно отобразить все подклассы класса “Natural” [<https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Natural>] в класс поверхностей, пригодных для установки модулей. Поэтому целесообразнее будет рассматривать пары (Class, Subclass), например, (Natural, Scrub) как единицу отображения в класс пригодности из иерархии. Кроме того, инспекция реальных сочетаний показала, что не все пары (Class, Subclass) могут быть напрямую отображены в систему классов пригодных поверхностей. Поэтому в случае, если не все объекты, обозначенные парой (Class, Subclass), можно отобразить в единственный класс пригодных для установки поверхностей, необходимо отображение каждого объекта, помеченного этой парой в соответствующий класс поверхностей.

Следующей важной особенностью является то, что классы в иерархии OSM не исключают друг друга. Это означает, что один и тот же объект может быть обозначен различными классами. Например, дублируются различные классы для одних и тех же объектов (Amenity и Building, или Shop и Building). При этом количество классов, которые можно присвоить одному и тому же объекту, не ограничено.

Разметка в OSM выполняется сообществом, поэтому часто возникают следующие проблемы: несоответствие рекомендуемой структуре иерархии классов, большое количество пользовательских (User Defined) классов, которые не соответствуют рекомендованной структуре OSM, что также затрудняет обработку иерархии классов при отображении. Здесь же стоит отметить возможные ошибки в разметке, допускаемые пользователями, которые также необходимо обрабатывать при построении отображения системы классов OSM в систему классов пригодных поверхностей.

Все обозначенные особенности системы классов OSM (несоответствия иерархий классов, множественная разметка, ошибки в разметке) определяют основные принципы обработки системы классов OSM:

1. Рассмотрение сочетаний классов OSM, полученных в конкретных географических локациях, спутниковые изображения которых мы получаем. Это обусловлено необходимостью ограничения общего числа объектов OSM.
2. Необходима детальная инспекция отдельных объектов для выявления действительных соответствий между классами OSM и классами пригодных поверхностей, а также для обработки возможных ошибок разметки (Labelling) OSM.
3. Необходимо получение всех возможных различных значений классов OSM, которыми помечен отдельный объект для обработки множественной разметки OSM и избегания коллизий при приведении ее к системе классов пригодных поверхностей.

7.4 Процедура построения отображений классов OSM на систему классов доступных поверхностей

Для того, чтобы обеспечить возможность использования разметки OSM, обладающей высокой точностью с точки зрения геопривязки объектов, в задачах анализа изображений подстилающих поверхностей в задачах идентификации локаций, подходящих для установки сейсмических модулей, необходимо выполнить отображение классов и объектов OSM в разработанную систему классов поверхностей. Процедура отображения состоит из следующих шагов:

1. Получение геопространственной информации OSM о размеченных объектах на конкретных участках местности посредством Overpass API [<http://overpass-api.de/>].

- Фильтрация объектов-точек (Nodes) [<https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Node>], т.к. такие объекты не несут существенной информации об объектах на местности, которые имеют некоторую площадь
- Придание линейным объектам OSM (реки, дороги) площади исходя из установленных значений ширины (исходя из принятых максимальных значений ширины полосы в 3.75 м, а также значений ширины железнодорожного полотна, равного 7 м). Это необходимо для определения маски покрытия этого класса реального объекта на мультиспектральном изображении для выделения свойств этих объектов.

2. Построение всех сочетаний классов верхнего и второго уровня (Class, Subclass) OSM. В рамках данной работы мы ограничились только первыми двумя уровнями вследствие того, что иерархии более глубокого уровня, в совокупности с множественной разметкой, больше затрудняют отображение классов, чем облегчают его.

3. Анализ сочетаний классов OSM (Class, Subclass) на предмет соответствия системе классов пригодных поверхностей. Выполняется детальная инспекция объектов каждого из выявленных сочетаний (Class, Subclass) и определение соответствия между каждым объектом и классом пригодной поверхности. Если все без исключения объекты определенного сочетания (Class, Subclass) OSM можно отобразить в какой-либо класс пригодных поверхностей, то строится прямое отображение (Class, Subclass) в соответствующий класс пригодных поверхностей.

4. Обработка множественной разметки OSM.

- Выявление коллизий – несоответствий результатов отображения из классов OSM в классы пригодных поверхностей.
- Разрешение коллизий на уровне отдельных объектов ввиду возможных ошибок в разметке OSM.

5. Выполнение отображения всех объектов в целевые классы из иерархии классов пригодных поверхностей

6. Объединение всех объектов всех однотипных классов.

В результате приведенной процедуры выполняется отображение каждого объекта OSM в определенный класс, а также разрешаются возможные коллизии, вызванные

7.5 Требования, предъявляемые к собираемым растровым данным

Для того, чтобы удовлетворить требования репрезентативности данных, необходима выработка критериев, которые необходимо соблюдать

1. Ориентированность на специфику конкретной задачи идентификации зон, пригодных для установки сейсмических модулей. Это означает, что изображения в выборке должны содержать классы подходящих поверхностей, определенные в ходе анализа предметной области. Другой важной особенностью является соответствие размеров участков местности, на которых проводится сейсморазведка, и размера геопространственного изображения подстилающей поверхности с учетом пространственного разрешения доступных спутниковых снимков. При выполнении сейсморазведки с применением беспроводной нодальной сети обычно рассматриваются участки местности площадью около 100 кв. км. (участки размером 10×10 км).

2. Географическая вариативность. Для того, чтобы иметь возможность выполнять корректные исследования свойств различных классов поверхности, необходимо, чтобы в выборке были представлены снимки местности, на которой находятся одни и те же классы поверхностей, в различных географических локациях.

3. Однородные условия съемки для различных (расположенных в различных географических локациях) участков местности. Предыдущие работы авторов [Astapova M., Uzdiaev M. Classification and Segmentation of Agricultural Land Using Linear Discriminant Analysis for Soil Sensors Installation //International Conference on Agriculture Digitalization and Organic Production. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. – С. 247–256.] показали, что различные признаки, которые можно получить из геопространственных изображений местности для одного и того же определенного класса местности, могут существенно различаться в зависимости от условий съемки, к которым в первую очередь относятся условия освещенности. Поэтому для того, чтобы данные выборки можно было использовать для корректного исследования различий свойств поверхностей, необходимо соблюдение постоянства условий освещенности местности при съемке. Этого можно достичь только в случае получения спутниковый снимок двух различных локаций на местности в одно и то же время. Стоит отметить, что это условие существенно ограничивает географическую вариативность той площадью, которую может покрыть фотоаппаратура спутника. Это значение обычно ограничено 10000 кв. км. Тем не менее, это условие является более значимым с точки зрения корректного сравнения свойств поверхностей, т.к. в случае широкого географического охвата, но несоблюдения одинаковых условий съемки пропадает и само необходимое условие корректного сравнения свойств поверхностей.

4. Вариативность во времени. Для возможности применения данных для исследования изменений свойств поверхностей в зависимости от времени база данных должна содержать изображения одних и тех же участков местности, полученных в разное время.

5. Наиболее полная представленность признаков. Это требование определяет диапазоны мультиспектра, которые должны содержаться в базе данных.
6. Однородность времен года, когда осуществляется съемка участков местности. Данное условие необходимо для обеспечения
7. Отсутствие перекрытий на изображениях (например, в виде облаков).

7.6 Описание баз данных SENTINEL

Важнейшим критерием выбора набора признаков, представленных в выборке, является возможность получить спутниковые снимки из доступных источников. Наиболее доступным на данный момент является база спутниковых снимков Sentinel 2 [<https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>]. Эта база содержит спутниковые снимки всей земной поверхности начиная с 2017 года. Имеется возможность фильтрации изображений по уровню облачности. В данной базе содержатся мультиспектральные снимки разрешением от 10 до 60 метров на пиксель (в таблице 7 указаны доступные для получения диапазоны мультиспектра, а также доступные разрешения для каждого диапазона).

Таблица 7 – Параметры спектра излучения Sentinel 2

Группа	Разрешение	Центральная длина волны	Полоса пропускания	Описание
B01	60 м/px	443 nm	20 nm	Ультрасиний
B02	10 м/px	490 nm	65 nm	Синий
B03	10 м/px	560 nm	35 nm	Зеленый
B04	10 м/px	665 nm	30 nm	Красный
B05	20 м/px	705 nm	15 nm	Red Edge
B06	20 м/px	740 nm	15 nm	VNIR
B07	20 м/px	783 nm	20 nm	VNIR
B08	10 м/px	842 nm	115 nm	NIR
B8A	20 м/px	865 nm	20 nm	NIR
B09	60 м/px	945 nm	20 nm	SWIR
B10	60 м/px	1375 nm	30 nm	SWIR
B11	20 м/px	1610 nm	90 nm	SWIR 1
B12	20 м/px	2190 nm	180 nm	SWIR 2

Получение геопространственных изображений Sentinel 2 возможно, как через web-интерфейс [<https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>], так и посредством гибкого API [<https://docs.sentinel-hub.com/api/latest/reference/>], предоставляющего различные режимы доступа к данным и различные объемы получаемых данных [<https://www.sentinel-hub.com/pricing/>] с возможностью бесплатного пробного периода, равного 29 календарным дням. Данный ресурс также предоставляет доступ к данным высоты поверхности (Digital Elevation Model – DEM). Исходя из предоставляемой информации [<https://www.sentinel->

[hub.com/faq/#which-typical-conversions-between-processing-units-and-km](https://pro.arcgis.com/en/pro-app/faq/#which-typical-conversions-between-processing-units-and-km)], пробный период позволяет получить доступ суммарно к 5000 кв. км снимков всех диапазонов мультиспектра (таблица 7). За пределами пробного периода доступ к снимкам может быть осуществлен только через web-интерфейс и ограничен 833 кв. км мультиспектральных изображений местности в месяц. В Sentinel-2 осуществляется доступ к изображениям, согласно квадратам координатной системы MGRS [<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/layouts/mgrs-grids.htm>] со сторонами 100000 м. Эти участки являются едиными изображениями, полученными в один и тот же день, что обеспечивает одинаковые условия освещения поверхностей.

8. РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К РАСПРЕДЕЛЕНИЮ СЕЙСМИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ НА МЕСТНОСТИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ БЕСПРОВОДНОЙ НОДАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ РЕЗУЛЬТАТОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЗОН, ПРИГОДНЫХ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

В настоящее время существует ряд технических решений применения БВС в сейсморазведке. Так в работах команды университета Хьюстона [Robert Stewart , Li Chang ,Srikanth Sudarshan, Aaron Becker , and Li Huang , An unmanned aerial vehicle with vibration sensing ability (seismic drone) SEG Technical Program Expanded Abstracts 2016 <https://doi.org/10.1190/segam2016-13973407.1>] представлена модель неуправляемого воздушного устройства для обеспечения сбора данных, приводятся сравнительные сейсмические записи полученные с помощью дронов со стандартно установленными ручным способом. Перспективы использования БВС описаны в публикации компании WSI [JANE WHALEY DARTs and Drones: The Future of Onshore Seismic, GEOExPro May 2018]. Аналогичные исследования опубликованы в работе [Srikanth K. V. Sudarshan Li Huang , Li Chang, Robert R. Stewart, Seismic surveying with drone-mounted geophones August Conference: 2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) DOI:10.1109/COASE.2016.7743566].

Хотелось бы отметить, что приемники при проведении работ располагают по регулярной сетке с разными шагами по пространственным координатам латерали, так же как источники. Такая расстановка вызвана, с одной стороны, использованием проводных приемников и техническое выстраивание их в линию. С другой стороны, в силу экономических причин, расстояние между линиями, как правило, больше, чем между приемниками в линиях. В итоге получаем относительно регулярную систему регистрации сейсмических откликов. Отметим, что реальный ландшафт местности редко позволяет выстроить равноудаленное расположение приемников в линии и самих линий.

Использование беспроводных приемников позволяет отойти от привычной регулярной сетки. В рамках проводимых исследований были выполнены численные эксперименты по фильтрации количества используемых приемников на квадрантный километр для расчета распространения волны в обратном времени (рисунок 31).

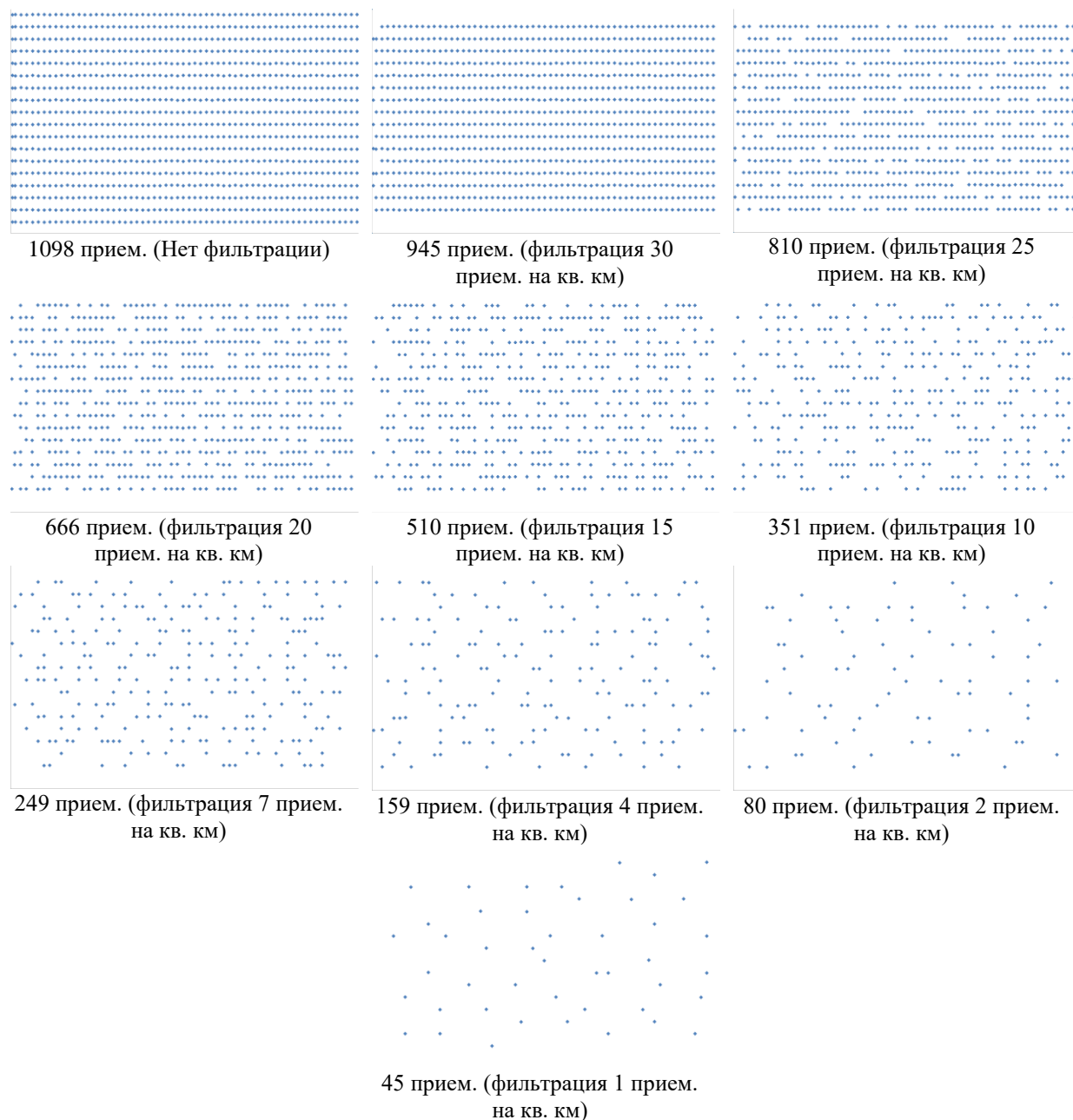


Рисунок 31 – Используемые приемники для различных уровней фильтрации

Проведенный анализ полученных результатов показал, что несущественная деградация наблюдается, начиная с уровня фильтрации равного 10, а ниже уровня равного 7 происходит развал вычислительных схем (рисунок 32). Это четко можно наблюдать в центре представленных изображений, где до уровня фильтрации 7 наблюдается четкая линейная структура слоев, на уровне 4 она еще частично сохраняется, а при большем уменьшении плотности слоистая структура полностью разваливается. Основываясь на полученных результатах численных экспериментов, можно сделать вывод о том, что стохастичная расстановка приемников на местности возможна при некоторой минимальной плотности, в данном случае при плотности не менее 7 приемников на кв. км.

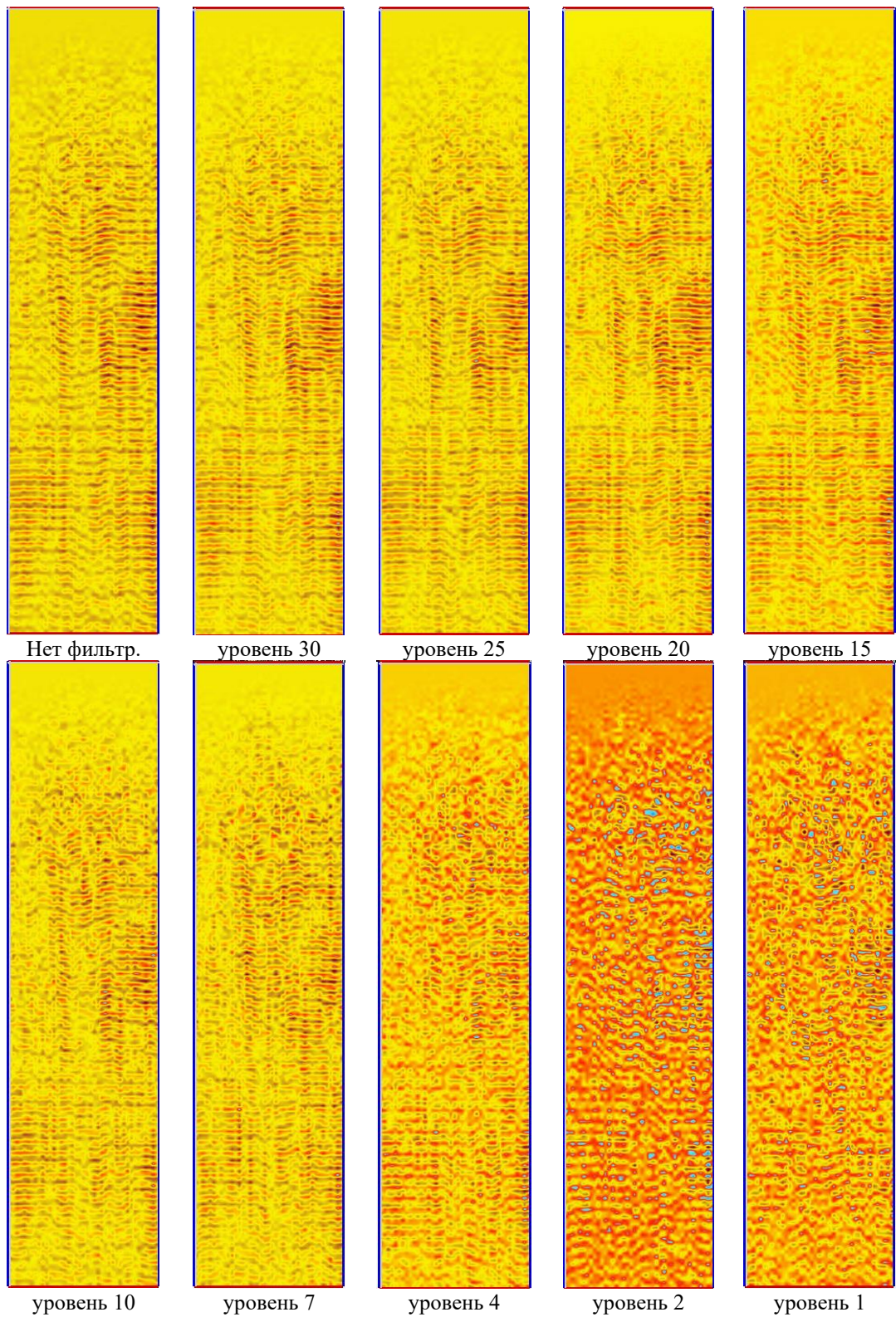


Рисунок 32 – Сечение куба вдоль линии Crossline сейсмического атрибута RTN RTM

Как показано выше, в отличие от обычных методов миграций метод RTN, в силу своего стохастической природы способен давать результаты для запредельно малых плотностей как приемников, так и источников. Вследствие этого использование БВС при инсталляции систем регистрации для задач сейморазведки на рассеянных волнах, будет

значительно проще технически, а также будет экономически более выгодно, чем расстановки аналогичных систем для традиционной сейсморазведки на отраженных волнах с системами типа «крест» и с плотностью приемников от 60 приемников на кв.км. К тому же в расстановках для традиционных методов обработки важно соблюдать пространственную регулярность расстановки, как приемников, так и источников. Это связано с алгоритмами синфазного накопления сигналов в методе ОГТ – главного, до сих пор, метода обработки в сейсморазведке.

Для систем регистрации в методе RTH регулярность противопоказана в принципе. Чем более хаотична система сбора и система возбуждения сигнала, тем более это оптимально для RTH. Вследствие этого в задачах планирования в рамках RTH основной упор необходимо делать на соблюдение некоторых пространственных параметров расстановок с точки зрения их статистических оценок: средняя плотность сенсоров на единицу площади; отклонения расстановок от нормального распределения; минимальное и максимальное расстояние между источниками, приемниками и источниками-приемниками. В этом плане пространственная точность установки каждого сенсора не столь важна – главное соблюсти статистические параметры всей расстановки в целом. При этом необходимо учитывать области не пригодные для установки приемников и источников, установка которых приводит к необходимости более плотной расстановки источников и приемников по краям областей для соблюдения основного критерия установки – минимальная плотность на кв. км. Заметим, что параметр плотности рассчитывается не в целом по площади, а проходится вся заданная площадь «скользящим окном» в 1 кв. км. с шагом смещения в 100 м. Такой способ оценки позволяет более равномерно выполнять расстановку источников и приемников на местности в условиях случайной генерации положения нового объекта.

На рисунке 33 представлены варианты расстановок систем регистрации для площади размерности 10 на 8 км (80 кв. км). Для всех вариантов, кроме базового, плотность сенсоров составляет 7 сенсоров на кв. км. Проведена серия численных экспериментов по расстановке приемников на местности с различными вариантами плотности, а также различными областями, в которых невозможно установить приемники. Результаты экспериментов представлены в Таблице 8 и на рисунке 33.

Таблица 8 – Характеристики численных экспериментов по расстановке приемников

№	Минимальное количество приемников на кв. км	Среднее расстояние между ближайшими приемниками	Отклонение расстояний в нормальном распределении	Количество используемых приемников
1	30	169	240	2037
2	7	228	326	736
3	7	226	323	725
4	7	213	305	760
5	7	222	318	740
6	7	223	319	726

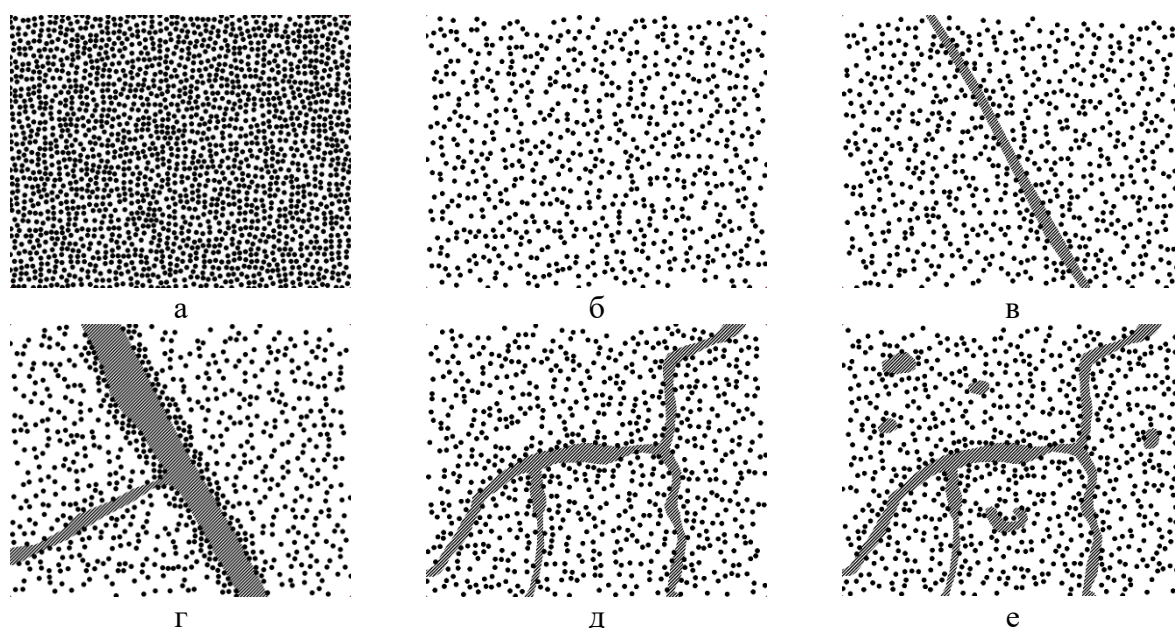


Рисунок 33 – Результаты численных экспериментов расстановки приемников с различными вариантами плотности и областями ландшафта не пригодными для расстановки приемников: а) плотность 30, непригодные области отсутствуют; б) плотность 30, непригодные области отсутствуют; в) плотность 7, наличие узкой реки; г) плотность 7, наличие широкой реки со слиянием; д) плотность 7, наличие слияния нескольких рек; е) плотность 7, наличие слияния нескольких рек и несколько озёр

Анализ результатов моделирования расстановок приемников с различными вариантами ландшафта, но с одним и тем же значением плотности сенсоров равным 7 (рисунок 33в-33д) демонстрирует устойчивость систем наблюдения при этих параметрах с точки зрения показателей статистического распределения: среднего расстояния между сенсорами и значениями отклонений в сравнении с вариантом, когда отсутствуют непригодные для расстановки области (рисунок 38б) и когда приемников в три раза больше (рисунок 33а).

На рисунке 35 приведен пример расчета генерации сейсмического сигнала на основе базовой скоростной модели и результат расчета по методу RTM с использованием стандартной (рисунок 34а) и стохастической (рисунок 34б) расстановки источников и

приемников. При стандартной расстановке источники располагаются в линиях через 100 м друг от друга и 300 м между линиями. Приемники располагаются аналогичным образом, но через 50 м друг от друга и линии приемников расположены перпендикулярно линиям источников. При стохастическом подходе расположение источников и приемников происходит случайным образом по заданным критериям плотности и расстояний (плотность – 15, расстояние между приемниками и источниками не менее 150 м).

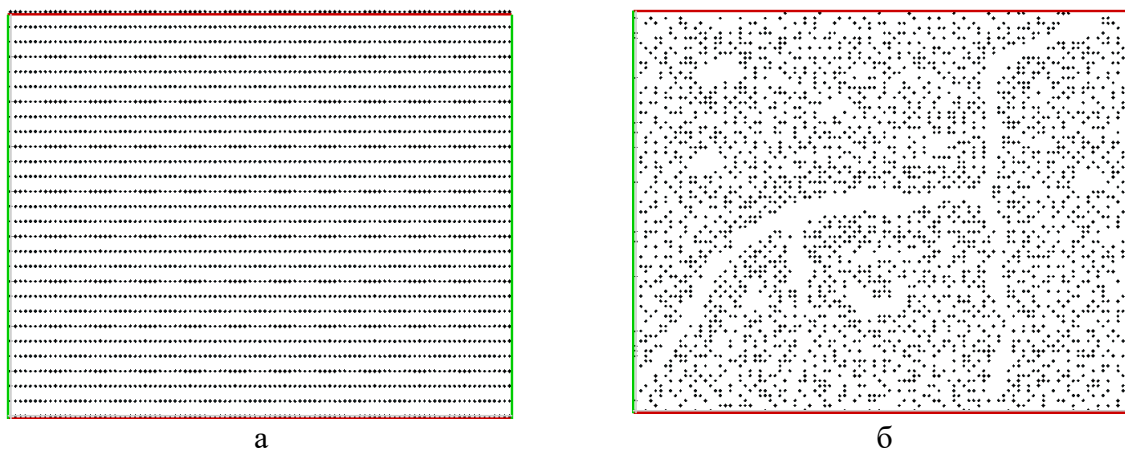


Рисунок 34 – Расположение источников на участке 10x8 км (а – стандартная модель расстановки источников; б – стохастическая модель с непригодными зонами)

Как видно из рисунка 35а красным представлена некоторая высокоскоростная область, расположенная внутри градиентной скоростной среды. В реальности такие перепады скорости могут наблюдаться при соляных куполах. Численный эксперимент, в данном случае, состоит из 2 этапов:

1. Генерация сейсмических сигналов для заданной расстановки приемников и источников на основе базовой скоростной модели и методов «прямой» волны
2. Расчет обратной миграции и угловой декомпозиции волн на основе заданной упрощенной скоростной модели (константная или градиентная среда).

Критерием оценки качества эксперимента является точность восстановления первоначальной скоростной среды, которое фактически невозможно получить в реальных условиях.

Хотелось бы отметить, что при расчетах с использованием стандартной расстановки источников/приёмников наблюдаются признаки, так называемых, «футпринтов», т.е. некоторых артефактов связанных регулярностью расстановки (рисунок 35б). В то же время при стохастической расстановке такие артефакты практически отсутствуют. При этом сами контуры базовых объектов геологической среды восстановлены с высокой точностью, что может говорить о целесообразности использования стохастической расстановки, которая позволяет сократить количество источников/приемников в 2/10 раз (5629 источников и

19582 приёмников – стандартная расстановка, 2667 источников и 1823 приёмников – стохастическая модель). Безусловно, необходимо продолжить проведение численных экспериментов для оценки еще большего сокращения количества источников при стохастической расстановке.

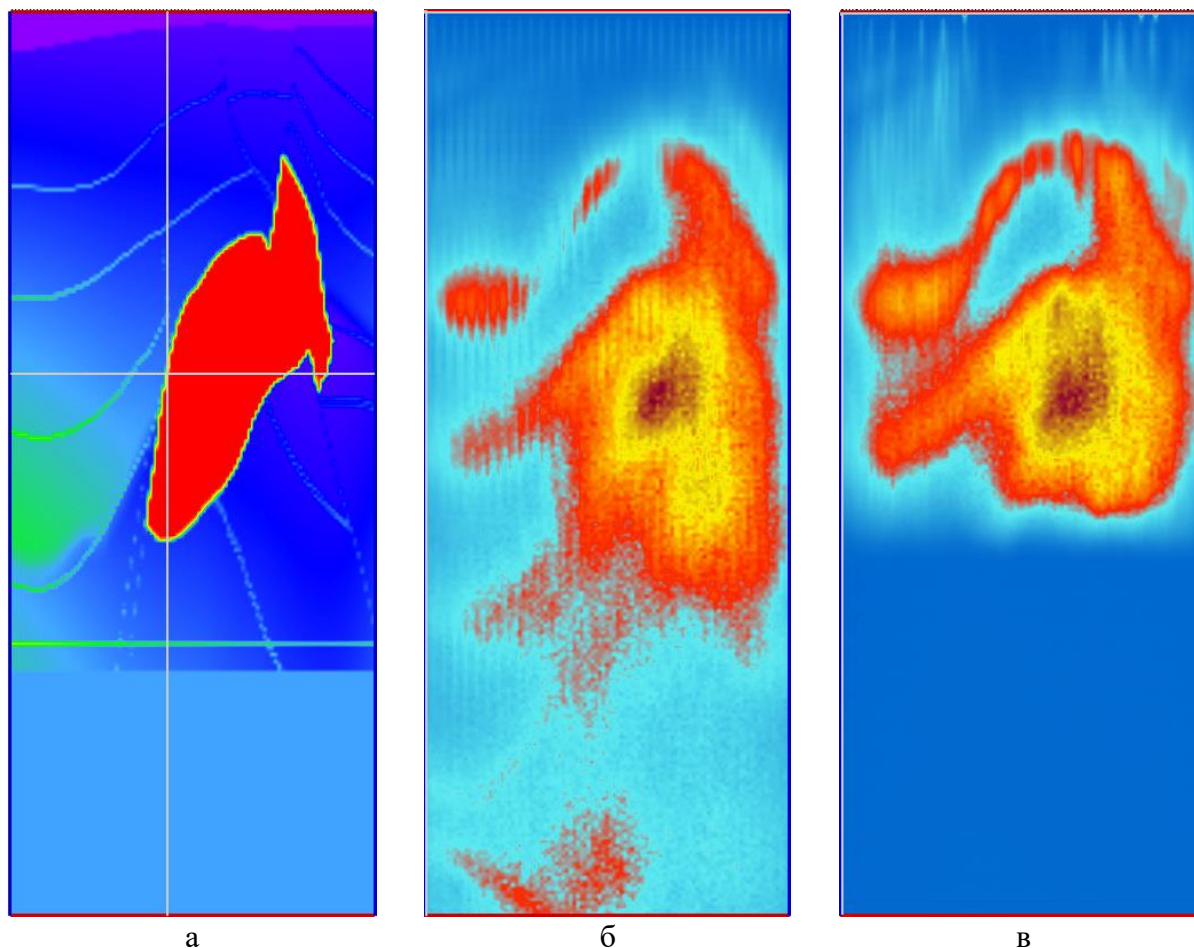


Рисунок 35 – Расчет по методу RTM на основе базовой скоростной модели (а – базовая скоростная модель; б – расчётный атрибут RTH Amplitude2/Back для стандартной модели; в – расчётный атрибут RTH Amplitude2/Back для стохастической модели)

Проведенные численные эксперименты показали, что использование стохастической расстановки источников и приёмников позволяет объем вычислений в несколько раз при неизменном качестве обработки сейсмических данных.

С точки зрения условий функционирования сейсмических модулей и искажений в принимаемых сигналах критическим является обеспечения необходимого контакта с грунтом (ground coupling). Условия контакта зависят от свойств грунта, массы модуля, площади контакта, наличия и размеров установочных штырей.

Влияние условий контакта наиболее существенно при измерении высокочастотных сигналов. В работе [B. Q. Zhang, H. Zhou, G. F. Li, and J. Q. Guo, “Geophone-seabed coupling

effect and its correction,” *Appl. Geophys.*, vol. 13, no. 1, pp. 145–155, 2016.] предложено следующее математическое выражение для описания влияния контакта с грунтом:

$$W(f) = \frac{1+2i\zeta\frac{f}{f_0}}{1+2i\zeta\frac{f}{f_0}-\frac{f^2}{f_0^2}},$$

где f_0 – собственная частота колебаний модуля, расположенного на грунте, который рассматривается как упругий элемент, ζ – демпфирование соответствующих колебаний.

Наибольшие погрешности возникают на частотах вблизи и выше собственной f_0 . Значение собственной частоты зависит от массы приемника, площади контакта с грунтом, свойств грунта и способа контакта. Различают два основных метода обеспечения контакта – за счет собственного веса датчика и за счет трения между грунтом и установочным штырем датчика [K. T. Spikes, D. W. Steeples, C. Schmeissner, R. Prado, and M. Pavlovic, “Varying the effective mass of geophones,” *2000 SEG Annu. Meet.*, vol. 66, no. 6, pp. 1850–1855, 2000].

При расстановке датчиков с помощью БВС их заглубление представляется достаточно сложной задачей. Рассматривались варианты сброса датчика для использования кинетической энергии датчика для проникновения установочного штыря в грунт, а также использование обратной тяги БВС. Оба эти метода не гарантируют результата, поэтому было принято решение устанавливать датчик на поверхности за счет собственного веса.

В этом случае, согласно анализу, проведенному в классической работе [Wolf, A., 1944, The equation of motion of a geophone on the surface of an elastic earth: *Geophysics*, 9, 29–35.] и последующих исследованиях [Hoover, G. M., and O’Brien, J. T., 1980, The influence of the planted geophone on seismic land data: *Geophysics*, 45, 1239–1253] установлены две основные закономерности: (1) собственная частота f_0 тем выше, чем меньше масса датчика; (2) собственная частота f_0 тем выше, чем больше площадь контакта датчика с грунтом.

Отметим, что большее f_0 означает меньшее искажение сигналов в рабочем частотном диапазоне. В то же время допущения, принятые в [K. T. Spikes, D. W. Steeples, C. Schmeissner, R. Prado, and M. Pavlovic, “Varying the effective mass of geophones,” *2000 SEG Annu. Meet.*, vol. 66, no. 6, pp. 1850–1855, 2000] и [Wolf, A., 1944, The equation of motion of a geophone on the surface of an elastic earth: *Geophysics*, 9, 29–35], выполняются далеко не всегда, а именно, поверхность, на которой установлен датчик, отличается от плоской. Помимо этого, на практике существенное влияние имеет наличие и характеристики травяного покрова в точке выбранной для размещения датчика [C. R. Miller, C. A. Link, and M. A. Speece, “Modified Land Streamer Configuration for Shallow Seismic Data Acquisition,” no. January 2003, pp. 857–865, 2003]. Фактически, травяной покров изменяет ситуацию с

влиянием массы датчика на условия установки на противоположную. Для легкого датчика, его масса оказывается недостаточной, чтобы примять травяной покров, а собственная частота оказывается довольно низкой из-за малой упругости среды, поддерживающей датчик. Если масса датчика оказывается достаточно большой, то трава будет примята, что обеспечит лучшие условия контакта.

Таким образом, оптимальным в подходе к распределению сейсмических сенсоров на местности при формировании беспроводной нодальной системы является выделение зон, не содержащих травяного покрова. Предпочтительно, распределить датчики на таких участках. Если же таких участков окажется недостаточно, то целесообразным является выделить зоны с невысокой и относительно редкой растительностью, а датчики, используемые при расстановке утяжелить, чтобы обеспечить примятие травяного покрова и лучший контакт с грунтом.

Для обеспечения анализа подстилающей поверхности была разработана методика, которая представлена в разделе 7.

Процесс идентификации зон, пригодных для размещения сейсмических модулей заключается в определении маски (изображения) с геопространственной привязкой, на которой содержатся области, принадлежащие одному и тому же классу поверхности, пригодной либо непригодной для установки модулей изображен посредством блок-схемы на рисунке 41 и состоит из следующих шагов:

- 1. Анализ ГИС информации из открытых источников.** ГИС данные, описывающие объекты на местности, занимающие некоторую площадь, представляют собой замкнутые многоугольники с географической привязкой в той или иной системе координат. Наличие актуальных ГИС-данных позволяет непосредственно определять области, пригодные для установки сейсмических модулей и формировать маску, содержащую эти области. Сама маска, содержащая области, пригодные для установки модулей, может быть определена известными программными средствами обработки геопространственных изображений, такими как QGIS [<https://qgis.org>] и др. с высокой скоростью, и без необходимости сложной обработки спутниковых или аэрофотоснимков, требующей значительных вычислительных затрат. Однако, при анализе ГИС данных может возникнуть ряд существенных проблем: отсутствие информации об объектах, расположенных на местности, что особенно актуально для труднодоступных мест, а также несоответствие имеющихся ГИС-данных сведениям об актуальном расположении объектов на местности.

2. **Анализ геопространственных изображений подстилающих поверхностей – спутниковых или аэрофотоснимков.** Данный этап необходим ввиду возможного отсутствия или несоответствия действительности ГИС данных об интересующей нас географической локации. Анализ геопространственных изображений, в свою очередь, подразделяется на два подвида. Первый подвид – анализу подвергаются изображения однородных поверхностей, т.е. таких поверхностей, для которых не характерны существенные изменения значений яркостей отдельных пикселей на рассматриваемых поверхностях. Примеры таких поверхностей – водная гладь, пустыня, ледяная поверхность, сельскохозяйственные угодья и пр. Для анализа таких поверхностей наилучшим образом подходят спектральные индексы, такие как NDVI [Dalezios, N. R., Domenikiotis, C., Loukas, A., Tzortzios, S. T., & Kalaitzidis, C. (2001). Cotton yield estimation based on NOAA/AVHRR produced NDVI. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 26(3), 247-251.], NDWI [Chouari W. Contributions of multispectral images to the study of land cover in wet depressions of eastern Tunisia // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. – 2021. – Т. 24. – №. 3. – С. 443-451.], NDBI [Chen X. L. et al. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes // *Remote sensing of environment*. – 2006. – Т. 104. – №. 2. – С. 133-146.], SAVI [Qi J., Kerr Y., Chehbouni A. External factor consideration in vegetation index development // *CNES, proceedings of 6th international symposium on physical measurements and signatures in remote sensing*. – 1994.] и др. Диапазоны этих индексов отражают определенные типы однородных поверхностей и не требуют больших вычислительных затрат. Другой вид поверхностей содержит сложные неоднородные объекты городской, промышленной, транспортной инфраструктуры. Обработка геопространственных изображений таких поверхностей требует применения сложных методов, включая вейвлет-анализ, использование специализированных дескрипторов, таких как SIFT [Ng P. C., Henikoff S. SIFT: Predicting amino acid changes that affect protein function // *Nucleic acids research*. – 2003. – Т. 31. – №. 13. – С. 3812-3814.], SURF [Bay H. et al. Speeded-up robust features (SURF) // *Computer vision and image understanding*. – 2008. – Т. 110. – №. 3. – С. 346-359.], ORB [Ruble E. et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF // *2011 International conference on computer vision*. – Ieee, 2011. – С. 2564-2571.] и пр., а также нейронных сетей, обученных решению задач семантической [Mo Y. et al. Review the state-of-the-art technologies of semantic segmentation based on deep learning // *Neurocomputing*. – 2022. – Т. 493. – С. 626-646.], объектной [Gu W., Bai S., Kong L. A review on 2D instance segmentation based on deep neural networks // *Image and Vision Computing*. – 2022. – Т. 120. – С. 104401.] и паноптической [Kirillov A. et al. Panoptic segmentation // *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*. – 2019. –

С. 9404-9413.] сегментации. При этом необходимо иметь в виду, что нейронные сети для корректной работы требуют сбора и разметки больших репрезентативных выборок, содержащих релевантные изображения интересующим нас классам поверхностей.

Опрос экспертов выявил перечень классов поверхностей, на которых возможна установка сейсмических модулей, а также перечень классов поверхностей, на которых установка сейсмических модулей невозможна. К классам поверхностей, на которые возможна установка сейсмических модулей, относятся следующие:

- Заболоченная поверхность.
- Грунт, имеющий допустимый уровень уклона (до 50 промилле).
- Скальная поверхность, имеющая допустимый уровень уклона (до 50 промилле).

К классам поверхностей, на которые невозможна установка сейсмических модулей, относятся следующие:

- Водная поверхность
- Объекты городской, промышленной, транспортной инфраструктуры
- Сельскохозяйственные угодья
- Грунт, имеющий недопустимый уровень уклона (свыше 50 промилле).
- Скальная поверхность, имеющая недопустимый уровень уклона (свыше 50 промилле).

3. Сопоставление и объединение результатов анализа ГИС-данных и результатов анализа спутниковых снимков. Ввиду того, что в задаче расстановки сейсмических модулей в первую очередь необходимо идентифицировать неподходящую для установки поверхность, чтобы однозначно исключить ее из области установки, а ложная идентификация неподходящей поверхности несет гораздо меньше издержек с точки зрения временных, трудовых и прочих ресурсных затрат, включая потерю и порчу самих сейсмических модулей) на установку датчиков (очевидно, что более предпочтительно не затрачивать ресурсы на установку модулей на подходящую поверхность, чем тратить ресурсы на установку модулей на неподходящую поверхность). Поэтому при сопоставлении и объединении масок, содержащих подходящие и неподходящие для установки области, полученных посредством анализа ГИС-информации и полученных посредством анализа спутниковых или аэрофотоснимков, в приоритете оказываются области, определенные как неподходящие для установки. В этом случае общая область, не подходящая для установки модулей, определяется как объединение всех отдельных областей, полученных как посредством обработки ГИС информации, так и посредством обработки геопространственных изображений:

$$S_{neg} = (\cup_{i=1}^N S_{neg GIS}^i) \cup (\cup_{j=1}^M S_{neg Img}^j),$$

где $S_{neg GIS}^i$ – i -я непригодная для установки область, полученная посредством анализа ГИС данных, $S_{neg Img}^j$ – j -я непригодная для установки область, полученная посредством анализа геопространственных изображений, N и M – количество идентифицированных неподходящих областей, полученных посредством анализа ГИС данных и геопространственных изображений соответственно. Области, пригодные для установки составляют оставшееся на рассматриваемом участке местности пространство, а потому может быть определено посредством операции дополнения всей области рассматриваемого изображения до множества общей области, не пригодной для установки:

$$S_{pos} = S \setminus S_{neg}$$

где S – рассматриваемая область интереса, S_{pos} – область, пригодная для установки.

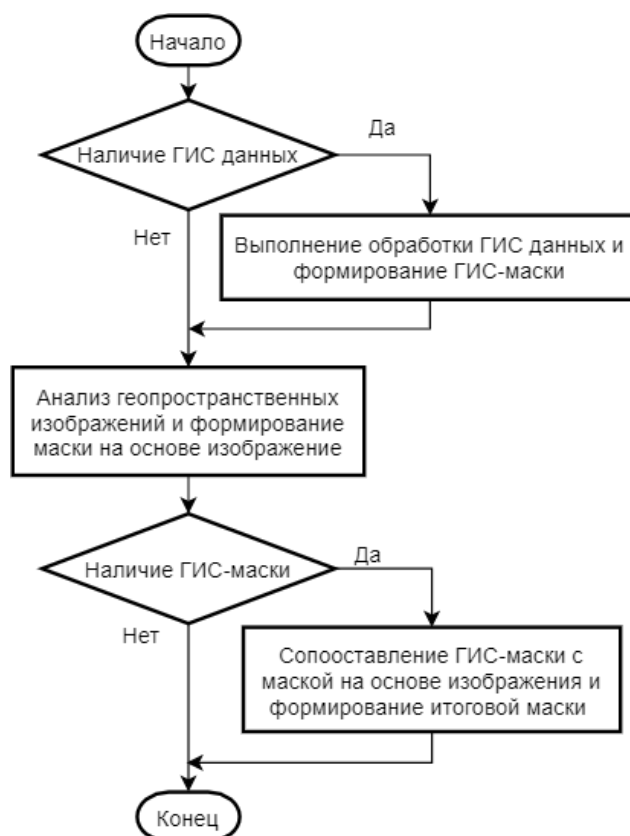


Рисунок 36 – Алгоритм идентификации зон, пригодных для установки сейсмических модулей

На рисунке 36 представлен алгоритм, который объединяет два типа масок для финальной сегментации зон подстилающей поверхности, которые пригодны для установки сейсмических модулей:

1. Для формирования исходных данных выбирается многоугольник (в большинстве случаев прямоугольник) где вершины данной фигуры имеют определенные географические координаты.

2. Вся заданная площадь проходится «скользящим окном» в 1 кв. км с шагом смещения в 100 м.

3. В каждом полученном окне анализируются спектральные данные о подстилающих поверхностях для сегментации зон, которые пригодны к установке сейсмических сенсоров. Данный анализ производится на основе методики, представленной выше.

4. В полученных сегментированных областях производится анализ карты высот для выявления областей, оптимальных с точки зрения наклона датчика, устанавливаемого посредством БВС. Алгоритм, обеспечивающий анализ подстилающей поверхности представлен в работе [Ерашов А.А., Аникин Д.А., Черских Е.О., Савельев А.И., Брыскин В.М., Агафонов В.М. Алгоритмы оценивания параметров неоднородной поверхности и управления беспилотным летательным аппаратом при установке сейсмического датчика // Труды МФТИ – 2023. – Т. 15. – № 4(60)].

5. На основе объединения данных о неоднородной поверхности и обработанных мультиспектральных изображений поверхности формируется итоговая маска сегментации зон подстилающей поверхности с привязкой к ГИС системе для установки сенсоров.

6. На основе выработанного критерия расстановки – 7 датчиков на 1 кв. км и финальной маски, создается множество геопростраственных координат для установки сейсмических сенсоров.

Полученная карта местности с координатами установки сенсоров позволяет осуществлять планирование бесколлизонных траекторий движения и распределение БВС из группы для расстановки сейсмических сенсоров в определенных координатах. Стоит отметить, что также в ходе функционирования и снижения над точкой установки БВС производит дополнительное сканирование подстилающей поверхности на предмет перепадов высот, которые не соответствуют допустимым значениям наклона датчика. Алгоритм планирования посадки БВС для установки датчика представлен в работе [Ерашов А.А., Аникин Д.А., Черских Е.О., Савельев А.И., Брыскин В.М., Агафонов В.М. Алгоритмы оценивания параметров неоднородной поверхности и управления беспилотным летательным аппаратом при установке сейсмического датчика // Труды МФТИ – 2023. – Т. 15. – № 4(60)].

9. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ МЕХАНИЗМОВ БВС, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ И СБОРА СЕЙСМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

Задачей проектирования является создание электромеханической части устройства захвата груза, в качестве которого выступает датчик сейсмической активности в специализированном корпусе. Устройство захвата должно монтироваться на определенный БВС и соответствовать следующим требованиям.

На рисунке 37 изображен корпус датчика сейсмической активности и отмечены основные размеры.



Рисунок 37 – Размеры корпуса датчика сейсмической активности

В таблице 9 представлены общие требования к устройству захвата

Таблица 9 – Общие требования к устройству захвата

Параметр	Значение
Масса не более, кг	1
Общая высота (ось Z) в открытом состоянии не более*, мм	150
Общая высота (ось Z) в состоянии захвата не более, мм	220
Общая длина/ширина устройства не более, мм	370
Сила сведения губок захвата не менее, Н	34
Время смены состояния захвата не более, с	10
Расположение на БВС	Между посадочных опор БВС

* в области размерами 240 x 240 мм относительно центра БВС

В качестве допустимых материалов для реализации конструктивных элементов устройства захвата могут применяться: алюминий и сплавы на его основе, стеклотекстолит, листовые и профильные материалы на основе карбонового волокна, ABS-пластик, PETG-пластик. Допустимо использование стандартных стальных крепежных изделий.

Обобщенное описание принципа эксплуатации разрабатываемого устройства следующее. Перед посадкой выполняется идентификация и определение положения сейсмодатчика. Если сейсмодатчик идентифицирован выполняется процесс посадки. В процессе посадки, на основе данных с камеры технического зрения осуществляется позиционирование БВС относительно сейсмодатчика. В случае успешной посадки сейсмодатчик попадает в зону функционирования устройства захвата. После успешного захвата сейсмодатчик фиксируется захватным устройством, и БВС может покинуть зону установки груза. Процесс съема груза с БВС в аналогичен установке, с той разницей, что в месте посадки устройство захвата раскрывается и БВС покидает место установки сейсмодатчика.

9.1 Анализ кинематических схем для конструкций устройства захвата

На текущий момент известна классификация устройств захвата, применяемых в робототехнике по принципу действия. Данная классификация разделяет устройства захвата на следующие группы: механические, вакуумные, магнитные, с эластичными камерами, комбинированные. Захваты с магнитным принципом предполагают изготовление с применением ферромагнитных материалов, имеющих большой удельный вес. В соответствии с требованиями захват должен быть управляемым, а значит реализация потребует применять электромагнит, что сопряжено с постоянными расходами энергии на удержание объекта. Таким образом данный вариант плохо подходит для применения в составе БВС. Вакуумные и захваты с эластичными камерами требуют для функционирования соответствующих воздушных компрессоров, и предназначены для захвата объектов при высокой точности предварительного позиционирования, что не подходит для решаемой задачи. Таким образом для захвата датчика сейсмической активности актуально применение механического захвата с электроприводом. Механический захват с применением соответствующей конструкции позволит захватывать объект транспортировки при низкой точности предварительного позиционирования. Источником питания БВС является аккумуляторная батарея, в виду чего при применении электропривода для управления захватом не требуется дополнительных преобразований энергии. Место предполагаемой установки и доступный объем для устройства захвата на БВС сопоставимы с размером объекта транспортировки. Соответственно необходимо

рассмотреть кинематические схемы механических захватов, которые конструктивно позволяют реализовать ход губок схвата сопоставимый с собственными геометрическими размерами.

Кинематическая схема многозвенного захвата представлена на рисунке 38. На данном рисунке, а также на всех последующих кинематических схемах, отмечены основные связанные между собой размеры захвата. Данные параметры позволяют установить зависимости между геометрическими размерами захвата в различных состояниях.

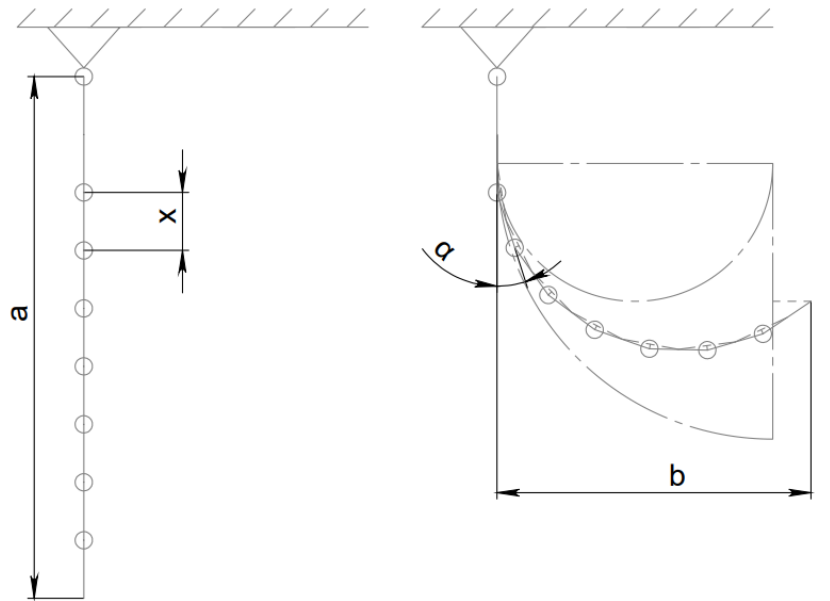


Рисунок 38 – Кинематическая схема многозвенного захвата

Многозвенное устройство захвата функционирует следующим образом. Привод захвата перемещает гибкую тягу, имеющую неподвижное крепление к последнему звену и подвижные крепления в промежуточных. Вращение звеньев в одну сторону ограничено их конструкцией, вращение звеньев на определённый угол друг относительно друга в противоположную сторону происходит свободно. Таким образом перемещение гибкой тяги меняет состояние захвата. Размер a показывает высоту захвата в открытом состоянии. Если число подвижных звеньев захвата обозначить k , порядковый номер звена n , и принять что при смене состояния захвата угол α между звеньями изменяется равномерно то b возможно вычислить следующим образом:

$$b = \sum_{n=1}^k x \sin n\alpha .$$

При смене состояния захвата одновременно меняются размеры a и b , что также видно из рисунка 39. Расстояние от транспортировочного крепления до корпуса датчика составляет 60 мм, при смене состояния захвата конечное звено должно пройти под

транспортным креплением. Соответственно для успешного захвата сейсмодатчика, необходима высокая точность посадки БВС, что не соответствует требованиям. Принцип функционирования данного захвата не позволяет применить его для решения поставленной задачи.

Кинематическая схема захвата с поступательным движением губок схвата представлена на рисунке 39.

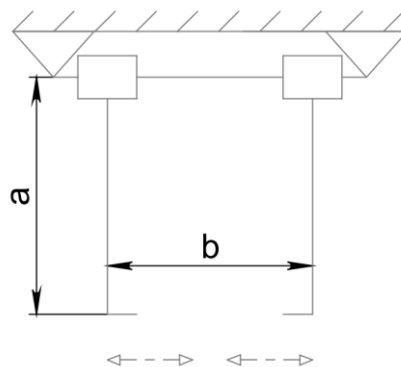


Рисунок 39 – Кинематическая схема захвата с поступательным движением

Каждая губка представленного захвата перемещается ползуном, реализующим поступательное движение. Максимальная высота захвата не изменяется при смене состояний и равна размеру a . Перемещение губок захвата ограничено исключительно размером линейной направляющей, длину которой в общем случае можно принять равной размеру b .

Кинематическая схема захвата с плоскопараллельным перемещением губок схвата представлена на рисунке 40.

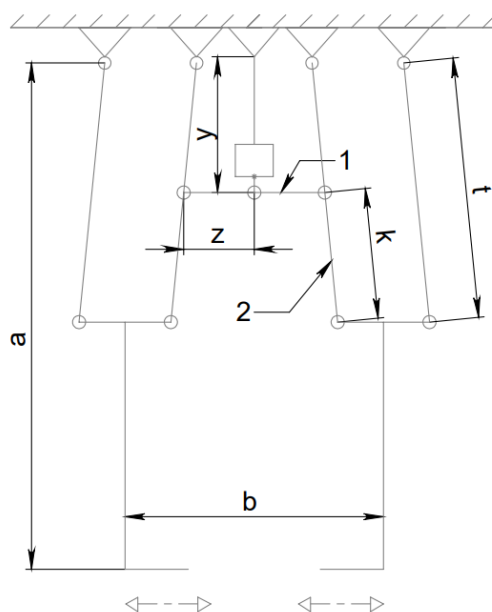


Рисунок 40 – Кинематическая схема захвата с плоскопараллельным движением

Захват с плоскопараллельным перемещением губок схвата приводится в движение перемещением ползуна, связанного с приводом. Через шатуны и кулисы движение передается на губки захвата. Общая высота данного захвата a имеет зависимость от расстояния между его губками b . Ход губок захвата зависит от места крепления шатунов (1) к кулисам (2), от длины кулис и от хода ползуна:

$$b=f(t,y,z,k).$$

За счет наличия кулис в кинематической схеме общая высота захвата будет больше, чем захвата с поступательным движением губок. Конструкция данного захвата будет иметь существенно больше подвижных деталей, и в общем для решаемой задачи не имеет никаких преимуществ перед захватом с поступательным движением губок.

Кинематическая схема захвата с вращательным движением губок схвата представлена на рисунке 41.

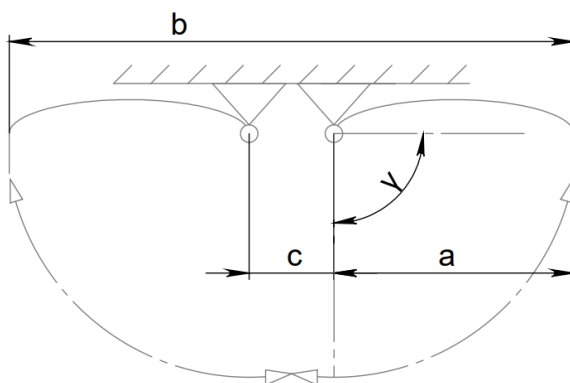


Рисунок 41 – Кинематическая схема захвата с вращательным движением

Каждая губка захвата имеет одну степень свободы и совершает вращательное движение относительно основания. Максимальная высота захвата изменяется при смене состояний. Высота захвата от точки крепления изменяется в соответствии с $a \cdot \cos \gamma$. Расстояние между губками захвата имеет зависимость $b = 2a \cdot \sin \gamma + c$.

Исходя из анализа кинематических схем наиболее пригодными вариантами для решения поставленной задачи являются захваты с поступательным и вращательным перемещением губок. Данные захваты отличаются минимальным количеством звеньев и подвижных соединений, и позволяют реализовать существенный ход губок по отношению к их высоте в открытом состоянии.

9.2 Моделирование вариантов конструкции устройства захвата

Исходя из представленной кинематической схемы захвата с вращательным движением губок и требований разработана геометрическая модель, представленная на рисунке 42.

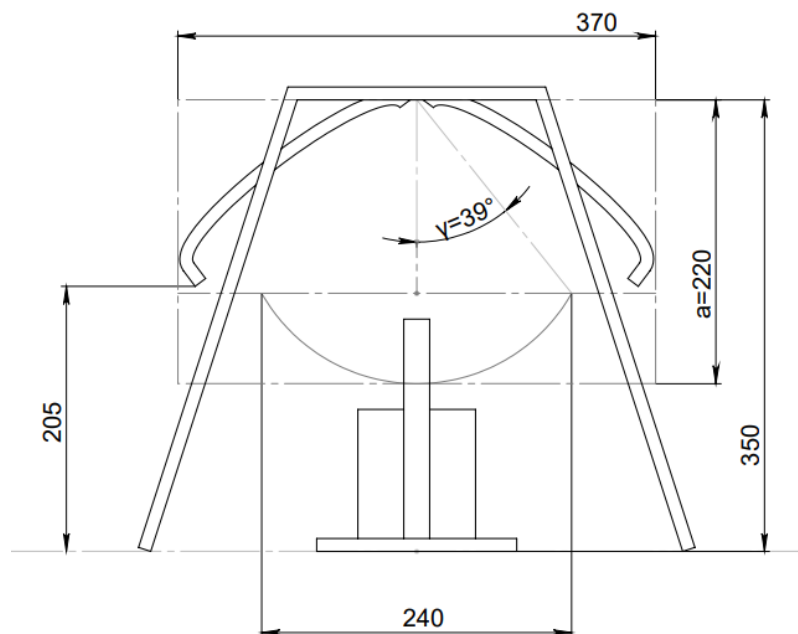


Рисунок 42 – Геометрическая модель захвата с вращательным движением

Геометрическая модель позволяет определить длину губки захвата, которая соответствует значению 220 мм. Ориентировочная мощность привода захвата с вращательным движением губок может быть рассчитана через работу, совершаемую губками захвата. Примем, что при движении губок момент привода будет равномерным, тогда работа, совершаемая губкой захвата, будет равна:

$$A = Fs,$$

где:

$$s = 2\pi a / (360/\gamma).$$

В соответствии с заданными требованиями по времени смены состояния захвата для совершения данной работы требуется мощность $P = 2A/t$. Примем общую эффективность работы привода и механизма равной 30 %, тогда минимальная мощность привода составит $\sim 3,4$ Вт. Вращательный момент привода при его непосредственном соединении с губкой захвата должен иметь значение не менее $\sim 7,5$ Н·м. Конструктивно данный захват может быть выполнен с одним или двумя электроприводами. В случае применения двух приводов

и отсутствии механической связи между губками необходима установка двух датчиков конечного положения для каждой губки захвата. Возможна реализация приводов захвата с червячной передачей в последней ступени редуктора, что позволит исключить расходы энергии на поддержание состояния захвата.

На основе кинематической схемы захвата с поступательным движением губок и требований к размерам разработана геометрическая модель, представленная на рисунке 43.

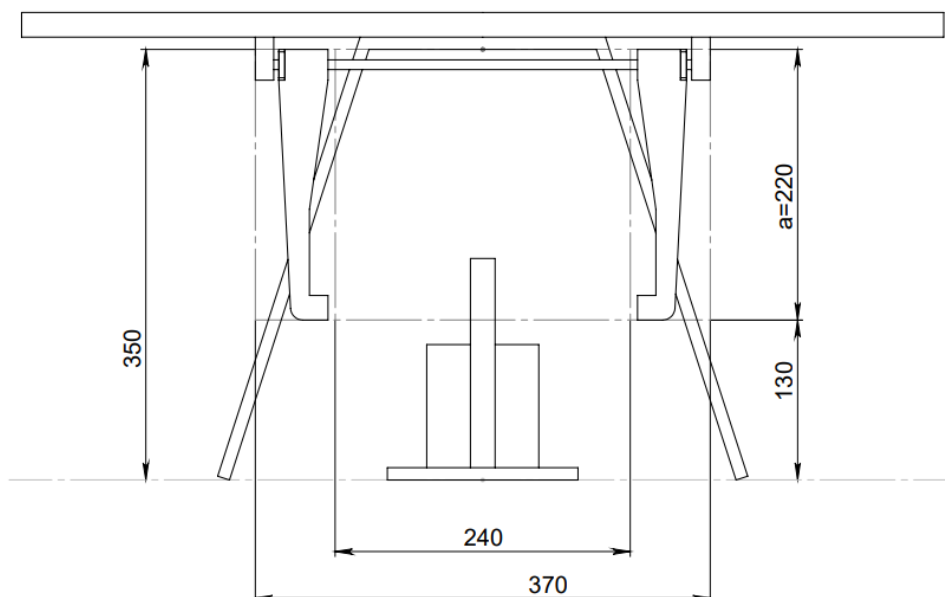


Рисунок 43 – Геометрическая модель захвата с поступательным движением

Ориентировочная мощность привода захвата с поступательным движением губок может быть рассчитана через работу, совершаемую губками захвата. Примем, что при движении губок сила, приложенная к каждой из них, будет равна и одинакова по всей траектории их перемещения, тогда работа, совершаемая губками захвата, будет равна:

$$A = Fs,$$

где s – ход губок захвата, равный 0,22 м.

В соответствии с заданными требованиями по времени смены состояния захвата для совершения данной работы требуется мощность:

$$P = A/t.$$

Примем общую эффективность работы привода и механизма равной 30 %, тогда минимальная мощность привода составит ~ 2,5 Вт. Привод данного захвата может быть выполнен с применением передачи винт гайка. Преимуществом такого решения является отсутствие передачи вращательного момента на приводной вал электродвигателя при

прикладывании силы к губкам захвата, что позволит исключить расходы энергии на поддержание состояния захвата.

С учетом геометрических моделей и параметров сейсмодатчика были разработаны 3D-модели захватов с вращательным и поступательным движением губок. На рисунке 44 представлена модель захвата с вращательным движением губок:

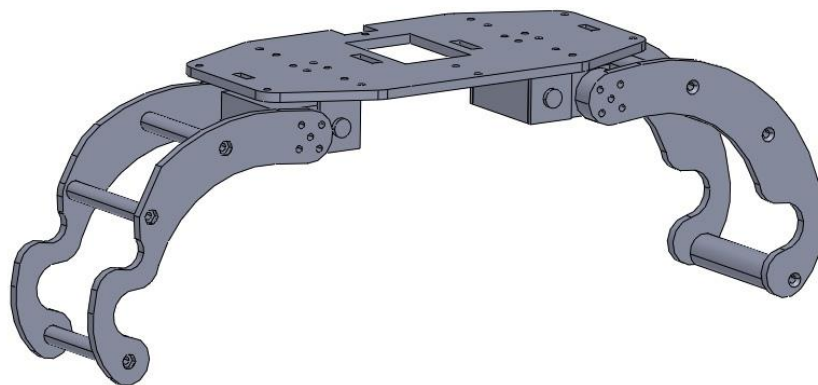


Рисунок 44 – Модель захвата с вращательным движением губок

Захват реализован с использованием двух отдельных сервоприводов с обратной связью по положению, ввиду чего отсутствует необходимость в датчиках конечного положения губок.

На рисунке 45 представлена модель захвата с поступательным движением губок.

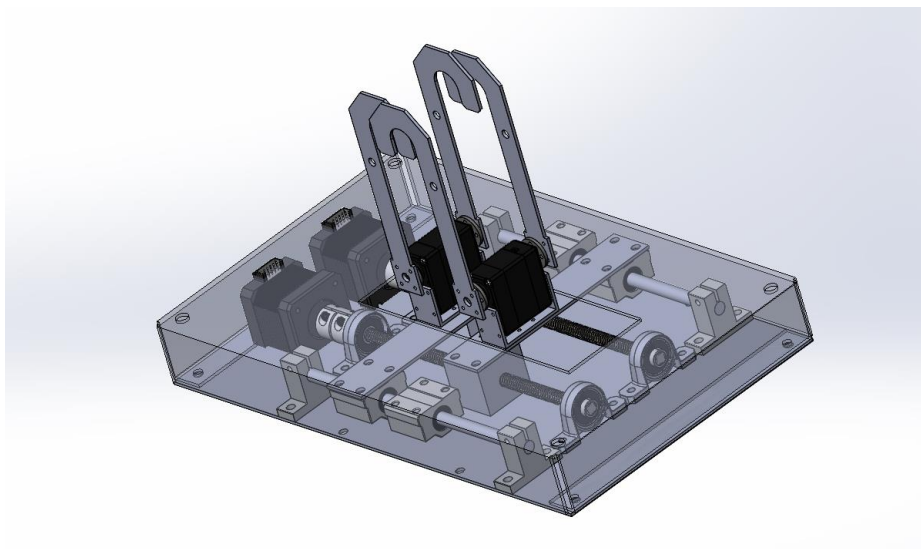


Рисунок 45 – Модель захвата с поступательным движением губок

Захват реализован с применением передачи винт-гайка и отдельными приводами для каждой губки.

Вариант устройства захвата с поступательным движением губок схвата имеет большую массу из-за необходимости применения двух передач винт-гайка материалом изготовления которых является сталь. Так же необходима как минимум одна опорная направляющая с линейным подшипником. Достоинством данного решения является возможность достижения большей силы сведения губок схвата за счет применения передачи винт-гайка. При равных возможностях, относительно устройства захвата с вращательным перемещением губок, данный вариант имеет сравнительно большую массу. В моделирующей среде проведен ряд экспериментов по захвату сейсмодатчика устройством захвата с вращательным движением губок. Успешный захват и фиксация сейсмодатчика происходят при отклонении расположения датчика ± 140 мм от центра захвата, что удовлетворяет заданным требованиям.

10. ФОРМИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЛИКА БВС, ПОЗВОЛЯЮЩЕГО ОБЕСПЕЧИТЬ ВЫПОЛНЕНИЕ ПОСТАВЛЕННЫХ ПЕРЕД БВС ЗАДАЧ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ И ОГРАНИЧЕНИЙ, ВЫЯВЛЕННЫХ В ХОДЕ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА

В таблице 10 приведены параметры, характеризующие БВС на который предполагается установка разрабатываемого устройства захвата.

Таблица 10 – Требования к характеристикам БВС для установки устройства захвата сейсмодатчика

Параметр	Значение
Габариты не более, мм	1100x1100x436
Масса не более, кг	7
Полезная нагрузка не менее, кг	3
Ошибка посадки в плоскости (оси X, Y) не более, мм	±100
Ошибка по углу рыскания при посадке (ось Z) не более, °	±10
Максимальный угол крена при посадке не более, °	30
Размеры пространства для установки дополнительного оборудования не менее, мм	350x250x250
Полетное время с нагрузкой не менее, минут	30

На рисунке 46 представлены основные размеры, рассматриваемого БВС.

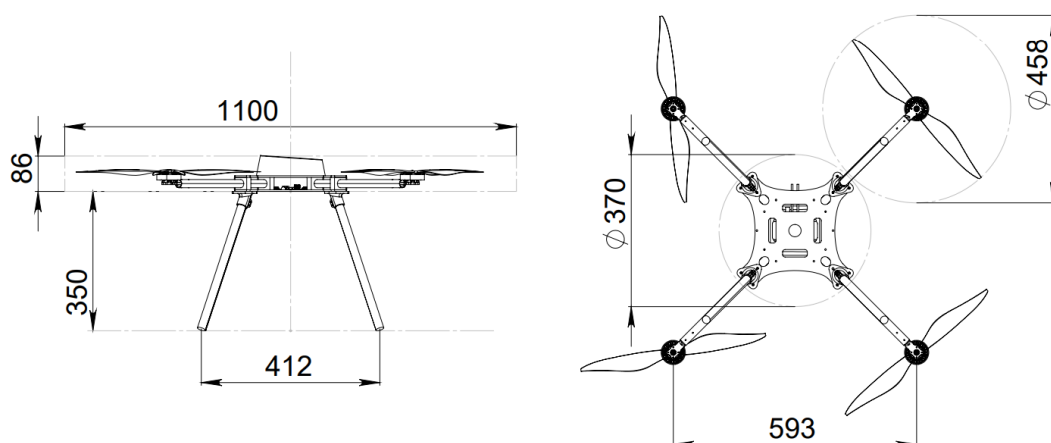


Рисунок 46 – Размеры БВС для установки устройства захвата сейсмодатчика

В таблице 11 представлены параметры корпуса датчика сейсмической активности.

Таблица 11 – Параметры объекта транспортировки

Параметр	Значение
Габаритные размеры, мм	200x200x180
Масса, кг	1,6
Размеры транспортировочного крепления, мм	160x198x20

Моделирование беспилотного носителя разрабатывалась с использованием средств автоматизированного проектирования для создания конструкций, широко применяемым в производстве. САПР позволяет создавать модель объекта максимально схожего с оригиналом, учитывая материалы элементов и их соединения между собой. По трехмерной модели система позволяет определить ее физические характеристики: габаритные размеры, объем, координаты центра тяжести, массу и другие параметры.

10.1 Выбор конфигурации БВС и расположения компонентов

Исходя из требований, представленных к БВС, было решено использовать схему квадрокоптера, с тянущим расположением винтомоторной группы (ВМГ). БВС носитель должен быть устойчив к внешним воздействиям, и при этом сохранять хорошую управляемость. Также немаловажно свойство аппарат точно зависать над необходимыми координатами. Эти задачи успешно выполняют БВС типа квадрокоптер.

Так как БВС будет нести на своём борту полезную нагрузку в виде датчика, расположение которого предполагается в нижней части, между посадочными стойками, центр тяжести аппарата заведомо будет ниже плоскости его винтов, что позволяет вынести аккумуляторы на верхнюю площадку квадрокоптера сохранив при этом устойчивость БВС.

10.2 Подбор винтомоторной группы БВС

После определения компоновки носителя необходимо выбрать винтомоторную группу, которая будет соответствовать требованиям продолжительности полёта и устойчивости аппарата. Зная примерную расчётную нагрузку и массу БВС, возможно осуществить расчёт требуемой тяги ВМГ и энергопотребление всей установки. Это позволяет проверить, соответствует ли разрабатываемый аппарат с данным ВМГ поставленным требованиям. С помощью утилиты xCopter Calc [<https://www.ecalc.ch/>]. — Текст: электронный // xcopterCalc - Калькулятор для Мультикоптеров : [сайт]. — URL: (дата обращения: 13.11.2023).]» (рисунок 47) был проведён расчёт и анализ нескольких типов моторов характеристики, которых максимально подходили к требованиям.

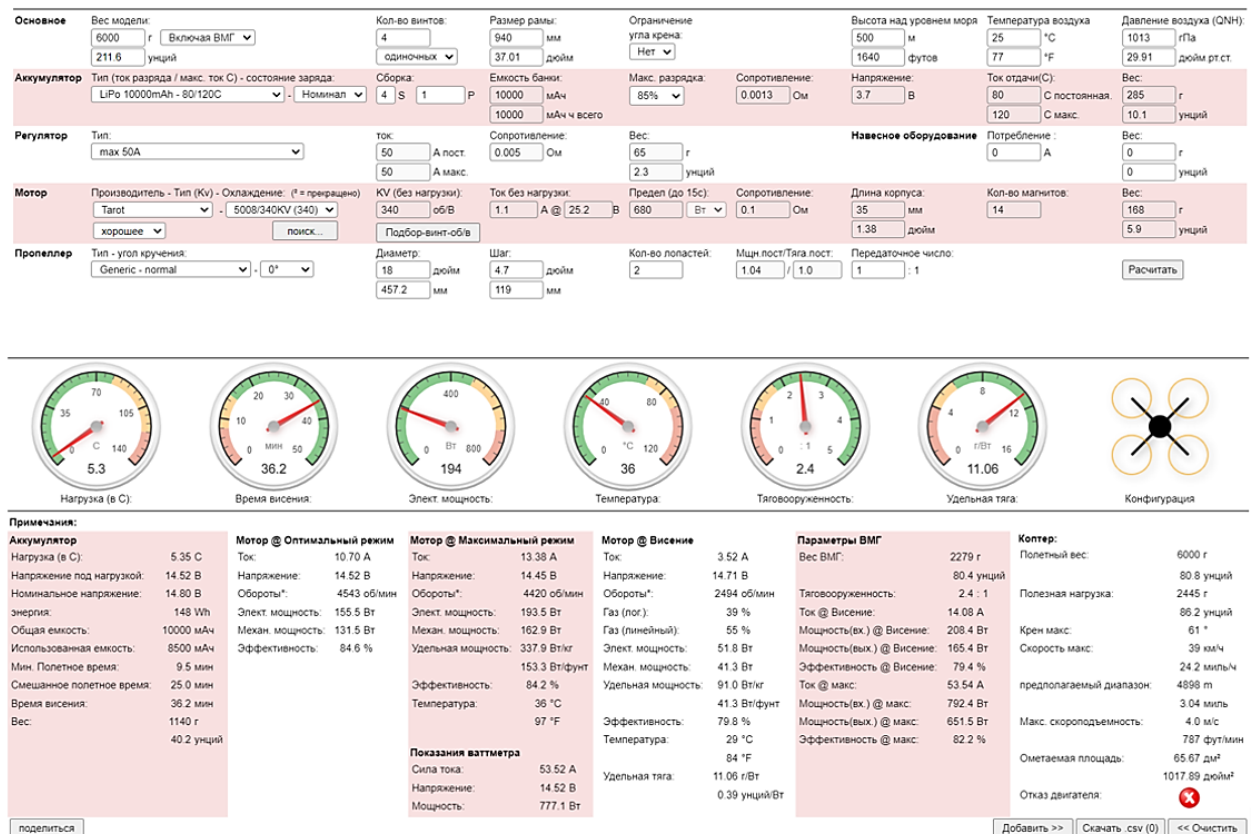


Рисунок 47 – Интерфейс программы XCopter Calc

Было выбрано два мотора, подходящих по характеристикам. Это iFlight XING X4214-400KV и Tarot 5008 340KV.

В дальнейшем данные двигателя в составе винтомоторных групп прошли испытания и тесты на собранном тестовом стенде. Было измерено токопотребление моторов с пропеллерами 16 дюймов при напряжении питания 24 вольта, при тяге 2 кг. По результатам теста мотор Tarot 5008 340KV оказался более энергоэффективным с токопотреблением 10А против 12А у iFlight XING X4214-400KV. Таким образом, при дальнейшем проектировании использовались моторы Tarot 5008 340KV.

10.3 Проектирование корпусных элементов конструкции БВС-носителя

После формирования технического облика БВС носителя, было проведено проектирование и моделирование его узлов в САПР для создания конструкций. На основе данных обо всех комплектующих, используемых в сборке БВС, создаётся 3D-модель каждого элемента опираясь на известные массогабаритные характеристики. Основными требованиями к таким моделям является точность посадочных и крепёжных элементов, соответствие их габаритов реальным компонентам, а также внешний вид с соблюдением должной детализации.

В контексте поставленной задачи необходимо смоделировать: двигатели, пропеллеры, внешние модули и навесное оборудование (GPS-модуль, камера, приемник радиосигналов управления), основные электронные компоненты (полетный контроллер, плата распределения питания, одноплатный компьютер Raspberry Pi4). Все элементы были смоделированы в качестве отдельных файлов для использования в дальнейшую сборку (рисунки 48–55).

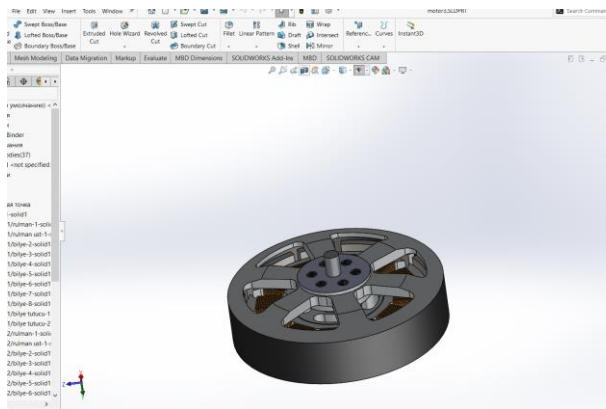


Рисунок 48 – Модель двигателя Tarot 5008

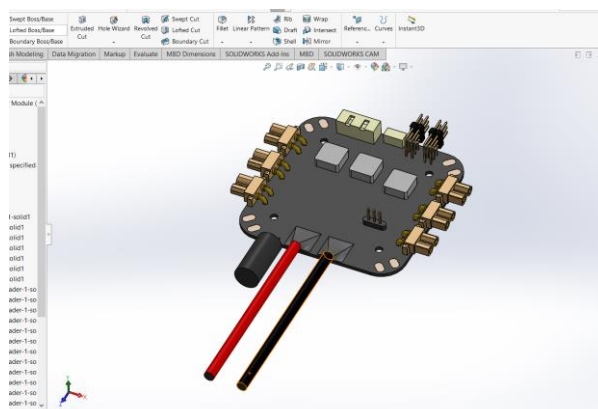


Рисунок 49 – Модель платы распределения питания

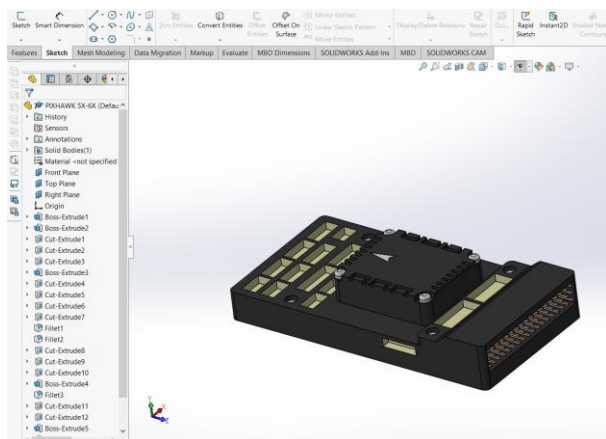


Рисунок 50 – Модель полетного контроллера Pixhawk

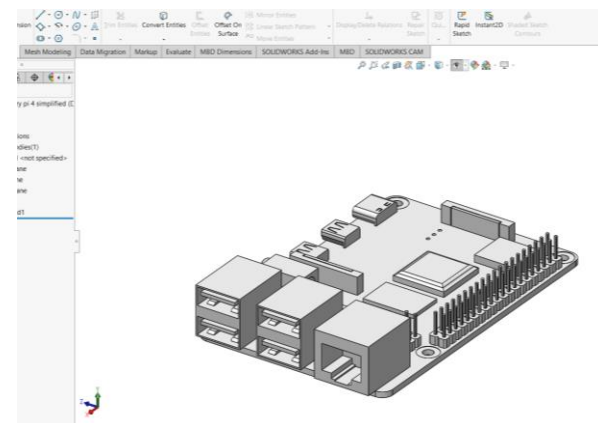


Рисунок 51 – Модель платы Raspberry PI4

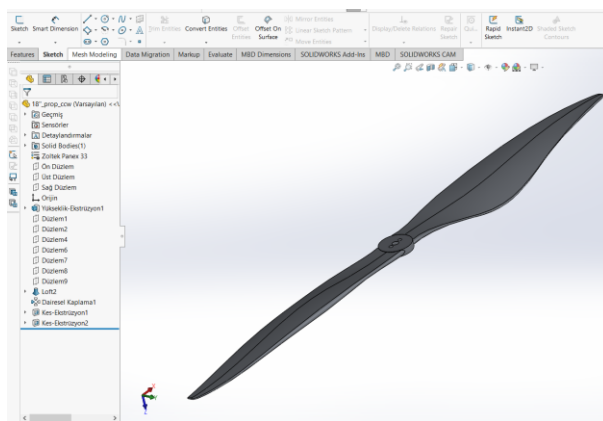


Рисунок 52 – Модель пропеллера

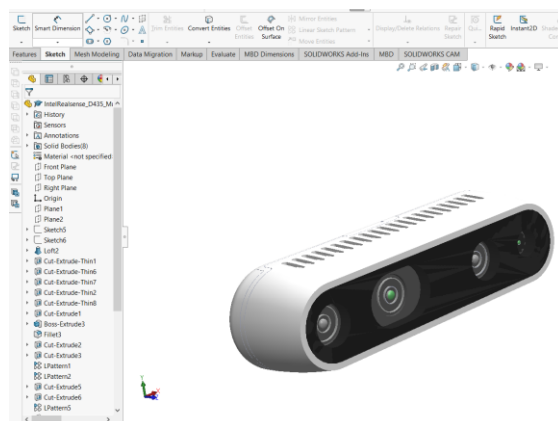


Рисунок 53 – Модель камеры глубины Intel RealSense

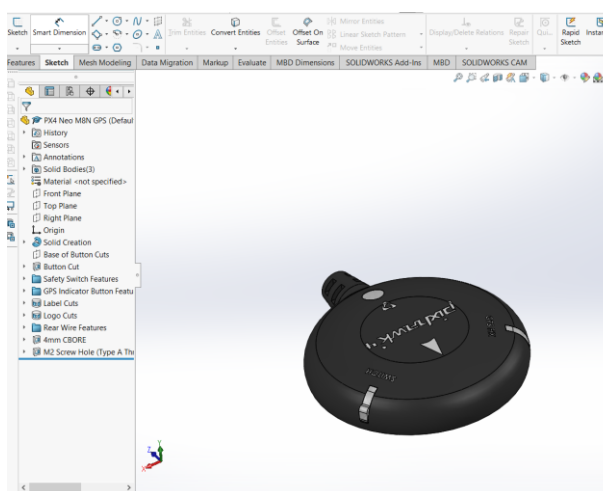


Рисунок 54 – Модель GPS-модуля

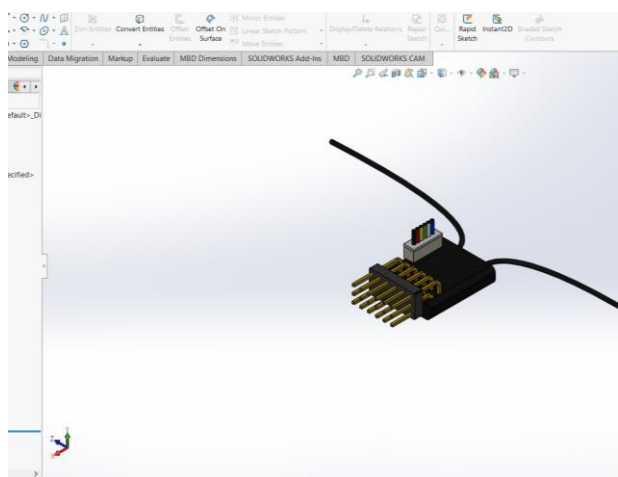


Рисунок 55 – Модель приемника ELRS

10.4 Выбор материалов, проектирование деталей БВС-носителя

На данном этапе была разработана наборная конструкция рамы с несущими пластинами и лучами для моторов в виде трубок (рисунки 56–57). Такая рама обладает минимальной массой, в сравнении с другими вариантами изготовления.

Пластины и трубки лучей рамы предполагается изготавливать из углепластика. При этом несущие пластины рамы будут изготовлены «сэндвичной» технологией «карбон-пена-карбон». Такой композит отличается низкой массой и достаточной жёсткостью материала.

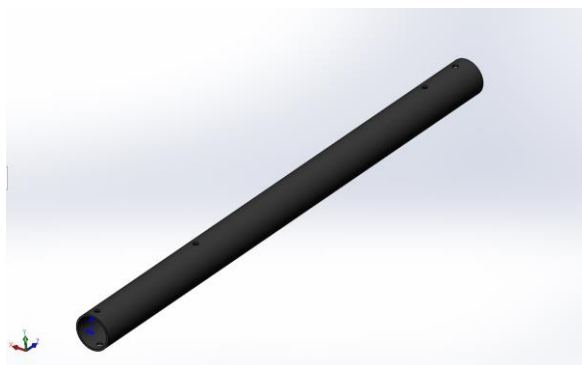


Рисунок 56 – Луч БВС

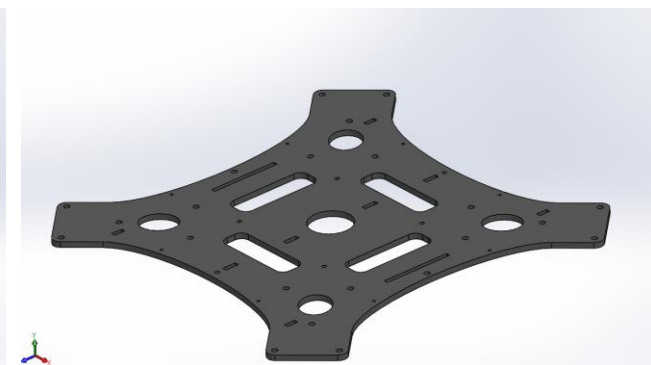


Рисунок 57 – Верхняя пластина корпуса БВС

Крепёжные элементы лучей и пластин, а также других элементов будут изготовлены на 3D-принтере из пластика PETG. Использование аддитивных технологий позволяет упростить и ускорить процесс изготовления аппарата.

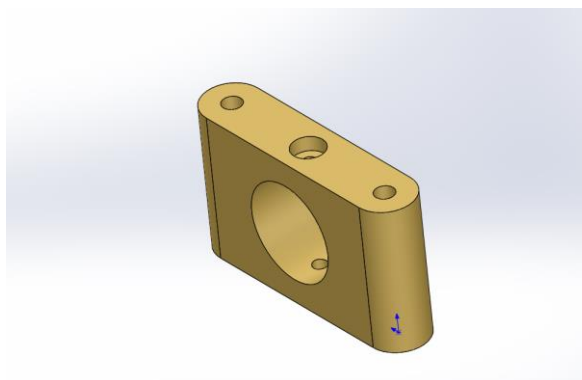


Рисунок 58 – Элемент соединения луча и корпуса БВС

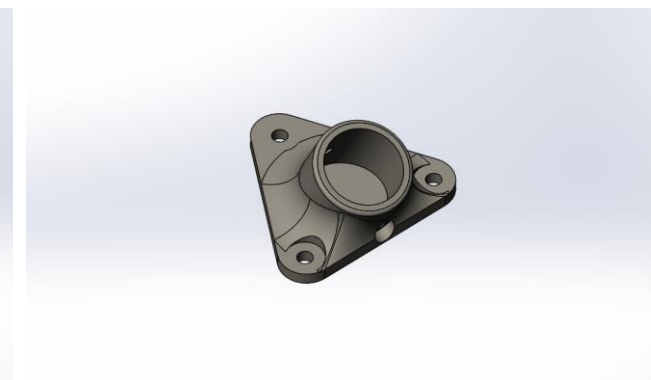


Рисунок 59 – Крепежный элемент посадочных ножек БВС.

После завершения моделирования всех компонентов, на основе данных об их габаритных характеристиках, была составлена эскиз-модель будущего БВС и итоговая сборка рамы БВС в сборе с ВМГ. Немаловажно учесть точное расположение компонентов на необходимом друг от друга расстоянии. На рисунке 60 изображена эскизная модель разработанного БВС.

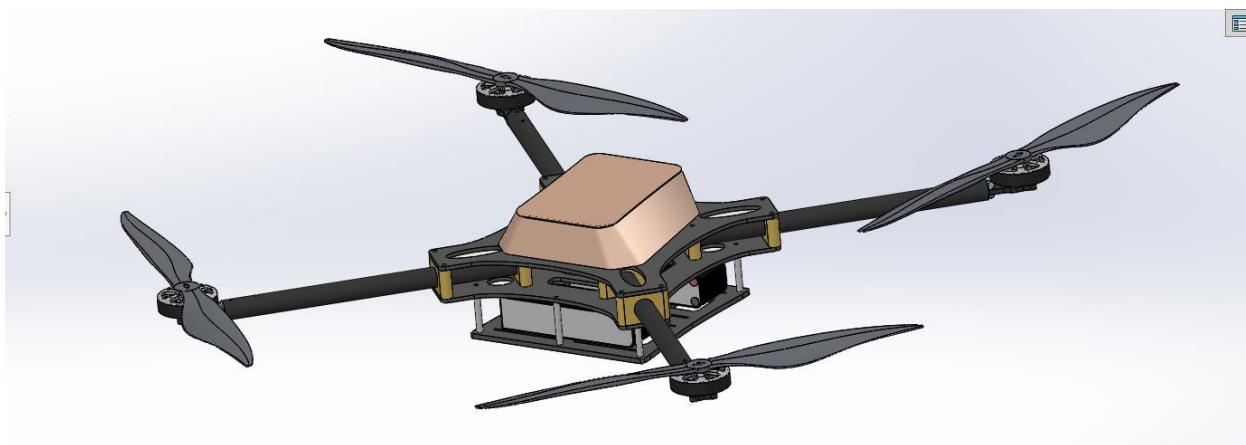


Рисунок 60 – Эскиз-модель БВС-носителя

Данная эскиз-модель учитывает расположение всех ранее спроектированных компонентов относительно друг друга, а также позволяет определить габариты будущего изделия.

После сборки БВС были проведены проверки в среде САПР на устойчивость конструкции к статическим и динамическим нагрузкам. В ходе моделирования были приложены силы давления в 40Н на площадки крепления моторов, чтобы определить требуемую толщину трубок и проверить предельную деформацию рамы при данных нагрузках. Методом подбора, была определена оптимальная толщина стенок лучей 1.5 мм и их диаметр 20мм. При данных значениях, на луче в крайних точках горизонтальной плоскости было отклонение в 6мм, что удовлетворяет требованиям предельной деформации. Так же было проведено тестирование на «скручивание» рамы, чтоб определить оптимальную геометрию облегчения пластин. Получив цветовую карту нагрузок на модель, были сделаны технические и облегчающие прорези на пластинах рамы.

Итоговая сборка рамы БВС со всеми учтенными параметрами изображена на рисунке 61.

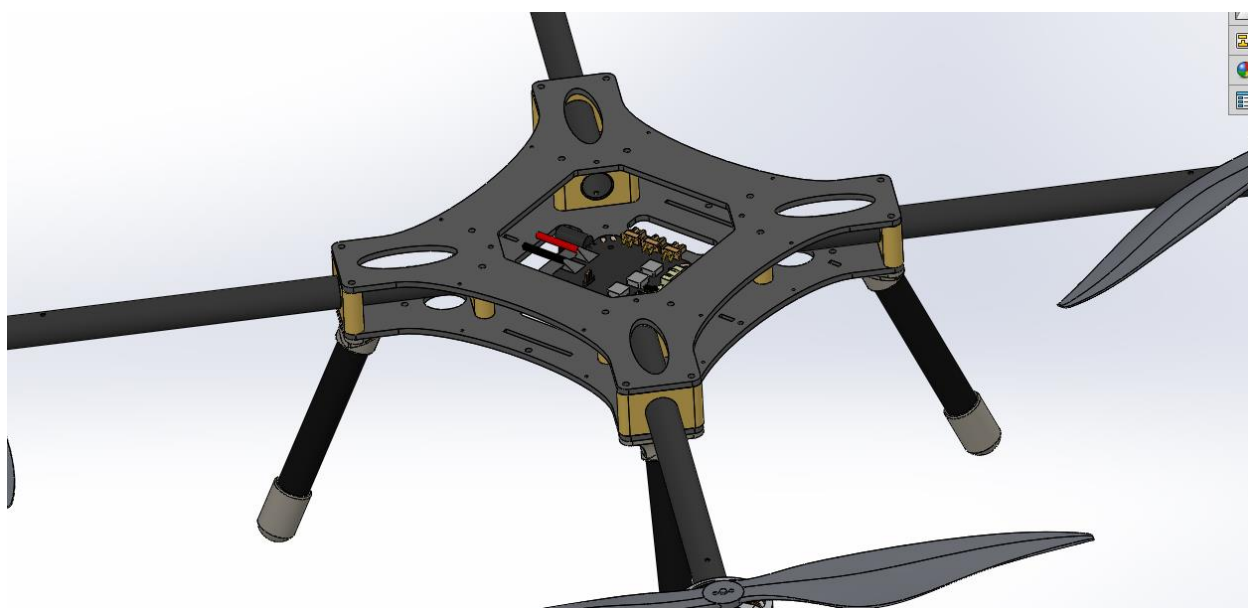


Рисунок 61 – Рама БВС в сборе с ВМГ

Далее было выполнено размещение полётного контроллера, датчиков, аккумуляторов и другого оборудование, с учётом имеющихся моделей и чертежей (рисунок 62). Полетный контроллер расположен на вибро-поглощающей платформе, для обеспечения механической фильтрации шумов для гироскопа и акселерометра.

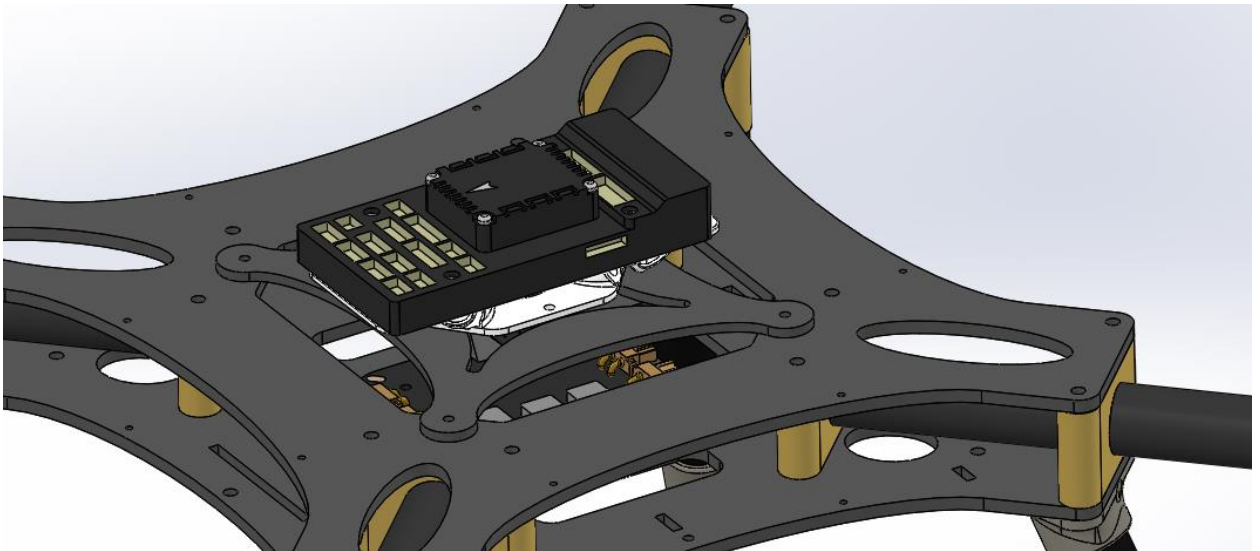


Рисунок 62 – Расположение полетного контроллера

Также необходимо было разработать крепление камеры Intel RealSense для точного позиционирования во время посадки, и крепление бортового вычислителя на основе Raspberry Pi (рисунки 63–64). Его расположение возможно внутри корпуса над платой распределения питания и под полетным контроллером.



Рисунок 63 – Расположение камеры Intel RealSense

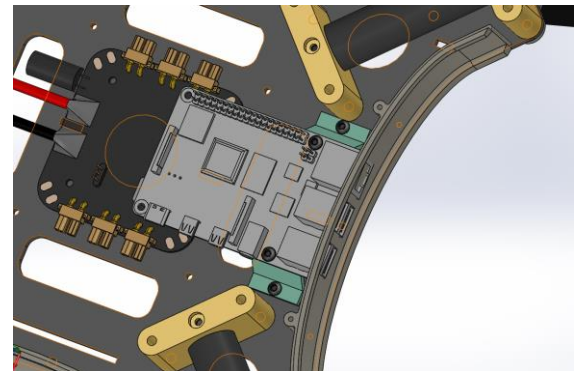


Рисунок 64 – Расположение Raspberry Pi.

Для обеспечения защиты электротехнических изделий были смоделированы пылезащитные накладки и крышка (рисунки 65–66). Их дизайн и геометрия должны соответствовать аэродинамическим требованиям во избежание высокой «парусности» БВС. Также были предусмотрены все необходимые выводы и разъёмы для удобства эксплуатации. Изготовление данных компонентов будет осуществляться на 3D-принтере, также из пластика PETG.

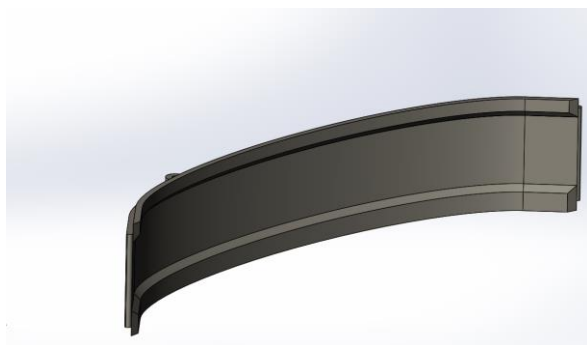


Рисунок 65 – Пылезащитная боковая накладка

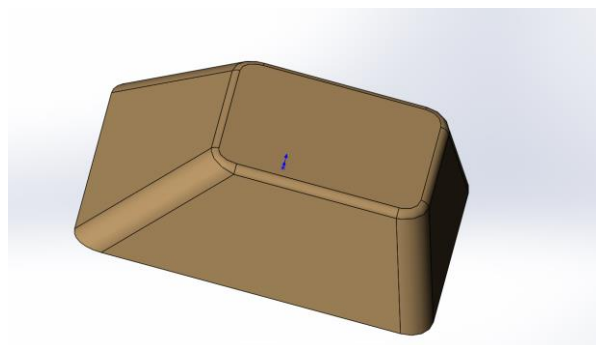
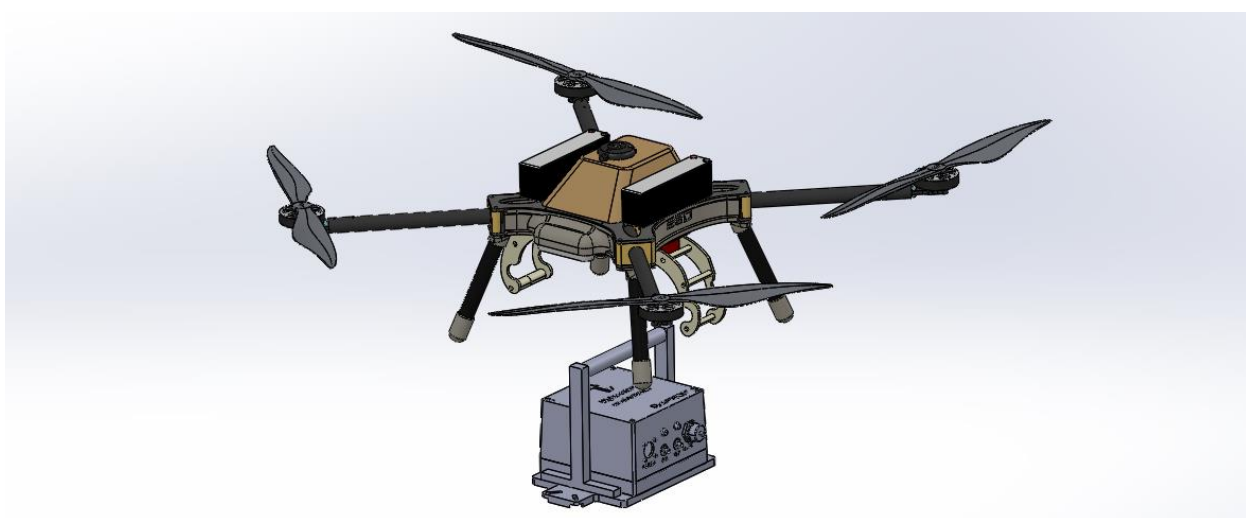
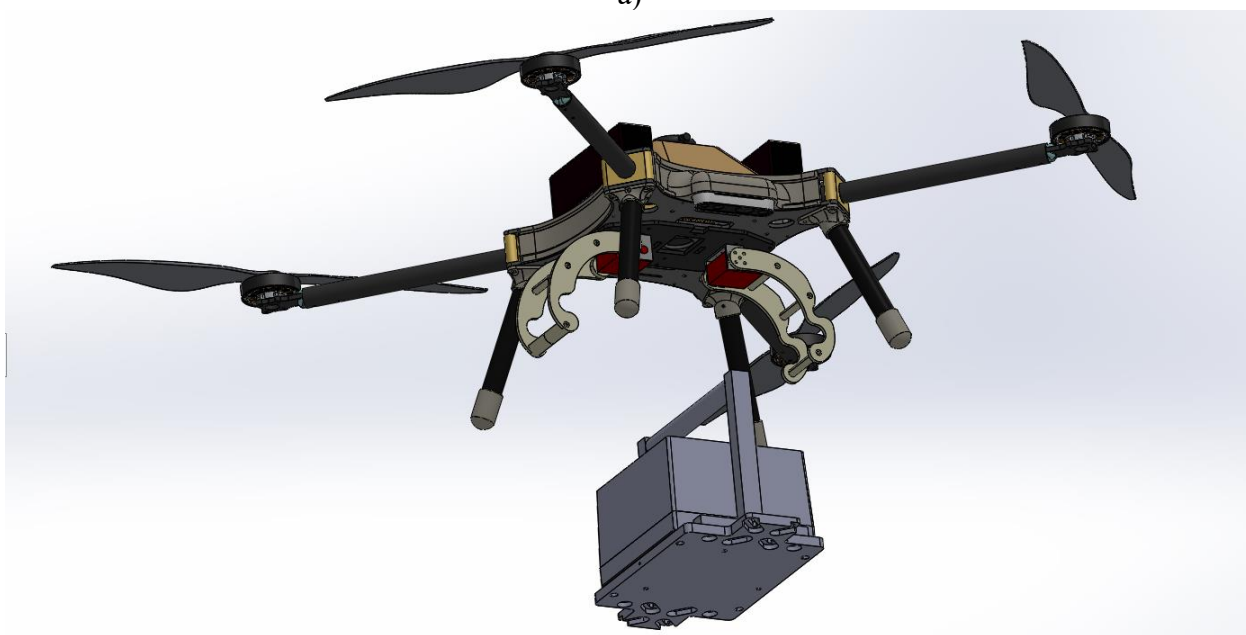


Рисунок 66 – Пылезащитная верхняя крышка

Конечная версия сборки БВС, с размещением всех датчиков и компонентов изображена на рисунке 67.



а)



б)

Рисунок 67 – Готовая модель БВС-носителя в сборе с захватом и датчиком сейсмической активности

Таким образом, спроектирован БВС-носитель, отвечающий всем предъявленным требованиям к летным и техническим характеристикам. Геометрия захвата и его расположение на БВС позволяет осуществлять захват датчика сейсмической активности в неподвижном состоянии после посадки, а камера Intel RealSense позволит осуществить точную посадку в необходимую для этого точку. Конструкция обладает легкостью и надежностью за счет использования композитных материалов при проектировании, и проста в изготовлении, поскольку все детали могут быть изготовлены методом аддитивной 3D-печати, лазерной резки и фрезеровки.