УДК 69.059:669 DOI 10.25628/UNIIP.2025.66.3.010

КУЗНЕЦОВ М. С., ПУТИЛОВА Е. А., КОЗИН А. Е.

# Анализ инструментальных методов обследования зданий и сооружений металлургического производства

**Кузнецов Михаил Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Нижнетагильский технологический институт, Нижний Тагил, Российская Федерация

e-mail: kms.nt@mail.ru

**Путилова Евгения Анатольевна**

кандидат философских наук, доцент, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Нижнетагильский технологический институт, Нижний Тагил, Российская Федерация

e-mail: e.a.putilova@urfu.ru

**Козин Александр Евгеньевич**

заместитель генерального директора по проектированию, ООО «ЕВРАЗ Стил Билдинг», Москва, Российская Федерация

e-mail: Aleksandr.Kozin@evrazsteel.ru

Авторы рассматривают современные методы определения глубины заложения различных типов фундаментов на объектах металлургической промышленности. Для определения глубины заложения свайных фундаментов и фундаментов глубокого заложения в условиях действующей металлургической производственной площадки авторы рассматривают современные геофизические методы исследований (сейсморазведочные). Для определения геометрических параметров фундаментов предлагается использовать инженерную сейсмическую аппаратуру (трехкомпонентные данные измерений должны быть обработаны специальным графом обработки). Процедура когерентности позволяет выделить в волновой картине целевые фазы отражений от подошвы фундаментов. Сходимость результатов измерений глубины заложения подошвы фундаментов с помощью инженерных сейсмических систем с фактической глубиной заложения была проверена путем вскрытия контрольных шурфов фундаментов на объектах комплекса доменной печи № 7 АО «ЕВРАЗ НТМК». Сделан вывод о рисках, технологической и экономической целесообразности исследования и работах, в результате которых на объектах металлургического производства с помощью методов сейсмической разведки достигнута точность измерений свайных фундаментов и фундаментов на естественном основании, равная 0,5 метра.

**Ключевые слова**: методы обследования, металлургическое производство, доменные печи, геофизические методы исследования, трехмерная сейсмическая локация.

*Kuznezov M. S., Putilova E. A., Kozin A. E.*
*Analysis of instrumental methods for surveying buildings and structures of metallurgical production*

*The authors consider modern methods for determining the depth of various types of foundations at metallurgical industry facilities. In order to determine the depth of pile foundations and deep foundations in the conditions of an operating metallurgical production site, the authors propose modern geophysical research methods (seismic exploration). To determine the geometric parameters of foundations, the authors propose to use engineering seismic equipment, three-component measurement data should be processed by a special processing graph. The coherence procedure allows to identify target phases of reflections from the foundation sole in the wave pattern. The convergence of the results of measurements of the foundation sole depth using engineering seismic systems with the actual foundation depth was verified by opening control pits of foundations at the facilities of the blast furnace complex No. 7 of JSC EVRAZ NTMK. The conclusion is made on the measurements and work carried out, as a result of which the accuracy of measurements of pile foundations and foundations on a natural base at metallurgical production facilities using seismic exploration methods was achieved equal to 0.5 meters.*

*Keywords: examination methods, metallurgical production, blast furnaces, geophysical research methods, three-dimensional seismic location.*

## Введение

Основой любого сооружения является закладка фундамента, который должен гарантировать надежность и прочность конструкции. Он является значимым элементом, от которого зависит долговечность здания. При определенных условиях возникает необходимость провести исследование по определению глубины заложения различных типов фундаментов — не только при начале строительства, но и в ходе эксплуатации. Иногда исследования осложняются непрерывным производственным процессом, в условиях которого применение традиционных методов определения становится затруднительным. За прошедшие годы проведены различные исследования в гео-

© Кузнецов М. С., Путилова Е. А., Козин А. Е., 2025

логической и строительной сферах по поводу фундаментов и попытки усовершенствовать методы определения глубины их заложения.

Теоретических работ по названной проблематике не так много, большинство носит практический характер. В XX в. В. К. Дмоховский, Н. А. Цытович занимались фундаментостроением, А. М. Корнилов изучал вопросы, связанные со скальным грунтовым основанием, Н. А. Цытович многие годы исследовал проблемы грунтовых оснований и фундаментов, С. Б. Ухов предлагал ряд инженерных решений и разработок в рамках городского строительства.

Некоторые исследователи (В. В. Лушников, Ю. Р. Оржеховский) рассматривали возможности применения различных типов фундаментов в сложных геотехнических ситуациях. В. Т. Гроздов, В. Г. Казачек занимались вопросами фундаментов и их глубины как прикладными в рамках общего технического обследования сооружений. Однако на сегодняшний день в сфере строительства можно говорить о нехватке исследований в вопросе определения глубины заложения различных видов фундаментов и о методах обследования готового фундамента.

Большинство ученых сосредотачивают внимание на этапе подготовки фундамента, а не на методах исследования и обследования готового фундамента, необходимых для оценки текущего состояния фундамента, соответствия фундамента его техническим требованиям, для выявления его возможных дефектов и пригодности для дальнейшей эксплуатации. Между тем профессиональное обследование фундамента является единственным способом оценить его текущее состояние, выявить возможные дефекты. Так как визуальное обследование готовых фундаментов в силу объективных причин не дает всесторонней картины их состояния, то основным способом обследования фундаментов становятся инструментальные методы. Цель нашего исследования — доказать возможность и целесообразность использования современных геофизических методов (а именно сейсморазведочных) для определения глубины заложения свайных фундаментов.

В современном строительстве для обследования существующего фундамента здания и сооружения требуется его частичная откопка, для чего рядом с фундаментом создаются шурфы. Сечение шурфа должно обеспечить нормальные условия для его отрывания на требуемую глубину, должны быть обеспечены условия для его освидетельствования. Длина обнажаемого участка фундамента должна быть достаточной для определения типа и оценки состояния его конструкций.

Согласно ГОСТ 31937–2024[1] п. 5.2.6, контрольные шурфы роют в зависимости от местных условий с наружной или внутренней стороны фундаментов. При этом шурфы располагают исходя из следующих требований:

- в каждой секции фундамента выполняют по одному шурфу у каждого вида конструкции в наиболее нагруженном и ненагруженном участках;
- при наличии зеркальных или повторяющихся (по плану и контурам) секций в одной секции отрываются все шурфы, а в остальных — один-два шурфа в наиболее нагруженных местах;
- в местах, где предполагают установить дополнительные промежуточные опоры, в каждой секции отрывают по одному шурфу;
- дополнительно отрывают для каждого строения два-три шурфа в наиболее нагруженных местах с противоположной стороны стены, там, где имеется выработка;
- места расположения шурфов необходимо согласовать (с собственником сооружения и, при наличии, с контролирующими подземные сети и сооружения);
- при наличии деформаций стен и фундаментов шурфы в этих местах роют обязательно, при этом в процессе работы назначают дополнительные шурфы для определения границ слабых грунтов оснований или границ фундаментов, находящихся в неудовлетворительном состоянии;
- глубина шурфов, расположенных около фундаментов, должна превышать глубину заложения подошвы на 0,15 м, а длина обнажаемого участка фундамента — достаточной для оценки состояния конструкции (п. 5.2.7).

При значительном притоке подземных вод добиться нормальных условий для освидетельствования обычно не удается. Открытый водоотлив из шурфа допустим только на очень короткое время. В противном случае вместе с водой из-под подошвы фундаментов будут удаляться частички грунта, что может привести к их неравномерной осадке. Поэтому шурф должен докапываться на намеченную глубину непосредственно перед обследованием фундамента специалистом.

В условиях производственной металлургической площадки очень сложно выдержать все требования ГОСТ 31937–2024 из-за большого количества инженерных коммуникаций, необходимости соблюдения требований промышленной безопасности, непрерывного производственного процесса. Еще одним фактором, усложняющим обследование фундаментов промышленных металлургических объектов (объекты комплекса доменной печи, бункерная эстакада и т. д.), является большая глубина их заложения — 6–8 м от уровня земли. Вскрытие и обратная засыпка шурфа такого фундамента, особенно обводненного, представляют собой трудоемкий и ответственный процесс.

Отдельно отметим свайные фундаменты, глубину которых невозможно установить методом шурфования. В отрытом шурфе такого фундамента можно определить высоту ростверка и расположение и диаметр свай, однако глубина свай останется неизвестной, хотя может достигать 25 м. При реновации или реконструкции объектов металлургического производства возникает необходимость уточнения глубины заложения всех фундаментов объекта, а не выборочного количества в отрытых шурфах, что невозможно выполнить в условиях производственной площадки [2]. Для решения задач по определению глубины заложения свайных фундаментов и фундаментов глубокого заложения в условиях действующей металлургической производственной площадки было решено применить современные геофизические методы исследований, а именно сейсморазведочные методы [1; 10].

## Оборудование и методика измерений

Для определения геометрических параметров подземной части фундаментов на объектах металлургического производства, в частности, на фундаментах доменных печей № 6 и № 7 (АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат») была использована аппаратура сейсмической геофизической разведки. Для исследований были использованы телеметрическая сейсморазведочная система ТЕЛСС-3 (ООО «ГЕОСИГНАЛ», г. Москва) и инженерная сейсморазведочная станция SGD-SEL (ООО «Сибгеофизприбор», г. Новосибирск). Приемниками сейсмического сигнала служили трехкомпо-

1 ГОСТ 31937–2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М.: АО «ЦНИИПромзданий», 2024. 65 с.

Иллюстрация 1. Инженерная сейсморазведочная станция SGD-SEL. Автор М. С. Кузнецов

нентные сейсмоприемники GS-3C («Геоспейс Технолоджис Евразия», г. Уфа). Оба комплекта аппаратуры показывают схожие результаты измерений, хотя сейсморазведочная система ТЕЛСС-3 является цифровой, а инженерная сейсморазведочная станция SGD-SEL (Иллюстрация 1) — аналоговой.

Сейсморазведочные измерения на фундаментах объектов доменных печей [3] проводились локационными расстановками сейсмической косы (точками зондирования). Процесс измерения заключался в следующем: трехкомпонентные геофоны (8 шт.) устанавливались на горизонтальную поверхность фундамента. Приборы надежно фиксировались для приема сейсмической волны (в теплое время года сейсмоприемники клеились к поверхности раствором глины, при отрицательных температурах приморaживались). Для измерений [4] была выбрана следующая система наблюдения: шаг между пунктами приема (ПП) 0,1–0,5 м, минимальное удаление пункта возбуждения (ПВ) от пункта приема — 0,1 м, максимальное 0,4 м. Ударами молотка в точках пунктов возбуждения возбуждались колебания *P*-волн (продольная волна) и второй серией ударов по боковой поверхности фундамента возбуждается *S*-волна (поперечная волна). Сейсморазведочная станция работала в режиме накопления сигнала — 8 ударов на каждой точке зондирования. Шаг дискретизации сигнала выбирался минимальный — 0,125 мс, длина записи 1 024 отсчета, сейсмические данные представлялись в сейсмическом формате SEG-Y.

### Методика обработки и интерпретации волнового поля

Для цифровой обработки полевых данных [6; 7] использовалась система обработки геофизической информации «AZON» (разработка А. Э. Зудилина, Уральский государственный горный университет, свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2013617598) [5]. Данная система обработки основывается на идее трехмерной сейсмической локации, одним из элементов которой является процедура глубинной миграции до суммирования волнового поля по системе азимутограмм с различной комбинацией «источник — приемник».

Физическим обоснованием возможности выделения подошвы фундаментов является высокий частотный состав анализируемого волнового поля с верхней границей 2 500–3 000 Гц. Данный частотный диапазон при установленной скорости упругих волн обеспечивает длину волны 1,2–1,5 м. Согласно теоретическим предпосылкам, вертикальная разрешающая способность метода составляет ¼ длины волны, равна 0,3–0,4 м, т. е. погрешность определения глубины подземной части фундаментов по геофизическим данным ±0,3–0,4 м.

Так как по своим упругим свойствам бетон фундамента и вмещающие горные породы отличаются, это позволяет выделить отраженную (дифрагированную) волну от подошвы фундамента. Подошва фундаментов является источником как отраженной, так и дифрагированной волны, а сам фундамент — волноводом. В любом случае низ фундамента должен проявляться в волновом поле отрицательной фазой отраженной волны при субвертикальной и направленной вниз ориентировке диаграмме направленности источника возбуждения.

Для обработки данных сейсмических измерений выработан стандартный граф обработки точечных зондирований, включающий следующие пункты:

1 Ввод геометрии наблюдений для последующей коррекции фаз горизонтальных компонент с учетом направления подхода целевой отраженной волны в горизонтальной плоскости.
2 Передискретизация исходных сейсмограмм с шагом 0,1 мс. Применение данной процедуры связано с необходимостью повышения разрешающей способности, а также точности оценки глубин целевых отражений. Данное уменьшение шага дискретизации обеспечивает увеличение частоты Найквиста с 4 000 до 5 000 Гц. Применяемое далее суммирование трасс 8 датчиков по каждому пункту возбуждения позволяет расширить полезную полосу частот за счет статистического эффекта.
3 Учет геометрического расхождения.
4 Фильтрация ФВЧ с целью подавления относительно низкочастотных волн помех. Частота среза — 400–800 Гц в зависимости от конкретных условий возбуждения и приема. Высокий уровень помех, в основном от металлических деталей фундамента, требует достаточно жесткую ФВЧ-фильтрацию с частотой среза, близкой к верхней границе указанного диапазона. Это, в свою очередь, приводит к сужению полезной полосы частот и появлению высокочастотного «звона» на записях.
5 Деконволюция с целью расширения полосы частот за счет увеличения ее верхней границы (в пределе — до 5 000 Гц).
6 Корректирующая фильтрация.
7 Пересчет трасс в шкалу глубин с использованием скорости продольных волн.
8 Нормировка средней амплитуды трасс перед суммированием и вычислением когерентности.
9 Коррекция фаз горизонтальных компонентных трасс. Для трасс горизонтальных компонент фазы меняются на 180° либо остаются без изменений в зависимости от взаимного положения источника возбуждения и пункта приема (направления подхода целевой отраженной волны). В некоторых случаях наблюдалась смена полярности трасс, в том числе и вертикальных компонент, вследствие переотражений от вертикальных бортов и элементов конструкций, установленных на фундаменте. Такие трассы либо браковались, либо использовались в обратной полярности при вычислении суммотрасс при условии сохранения формы импульса при переотражении.
10 Вычисление суммотрасс.
11 Вычисление функций когерентности суммотрасс. Данная процедура применялась для повышения достоверности выделения целевых фаз отражений, поскольку их амплитуда не всегда является существенно превосходящей амплитуду волн помех. Оценка функции когерентности является несмещенной, т. е. при отсутствии на текущем времени (глубине) отражения ее величина близка к нулю. Практически во всех случаях применения этой процедуры наличие целевого отражения определяется достаточно уверенно по моменту резкого нарастания когерентности. Пиковое значение когерентности

в целевом интервале обычно существенно превосходит значения в остальных интервалах, за исключением первых вступлений (для лучшего отображения графики в области первых вступлений применялся мьютинг[2]).

Отметим, что вследствие переотражений когерентность первых вступлений зачастую оказывается даже ниже, чем для целевой отражающей границы, что говорит о высокой эффективности процедуры.

Минимально-фазовая деконволюция, переводящая трассы к нуль-фазовому виду, обычно применяемая с целью более точного определения глубины по максимуму суммотрассы, не использовалась из-за сильно искаженной переотражениями формы зондирующего импульса, регистрируемого в первых вступлениях.

По этой причине определение глубины до целевой границы (подошва фундамента) производилось по началу отрицательной фазы отраженной волны суммотрасс (Иллюстрация 2).

Поворот системы координат осей датчиков на 45° связан с необходимостью получения трасс горизонтальных компонент примерно равной амплитуды для каждого пункта возбуждения. Это должно обеспечивать большую устойчивость глубинной миграции к помехам. В случае невозможности применения глубинной миграции использование компонентных трасс сопоставимых амплитуд при выбранной ориентировке осей чувствительности позволяет более эффективно применить процедуру групповой когерентности между суммотрассами.

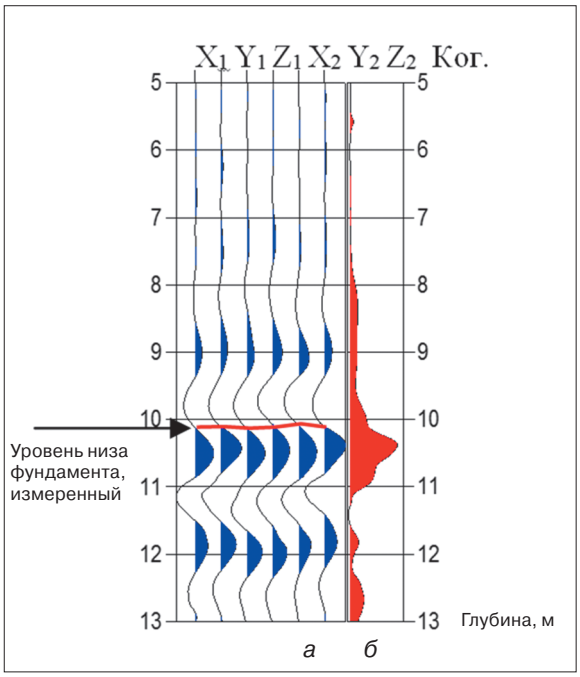


Иллюстрация 2. Пример волнового поля (*а*), функции когерентности (*б*) для определения вертикальных размеров фундамента. Иллюстрация получена после обработки полевых сейсмограмм в программе обработки сейсмических данных. Данная иллюстрация получена после использования программы обработки данных AZON

## Результаты измерений

Сходимость результатов измерений глубины заложения подошвы фундаментов с помощью инженерных сейсмических систем с фактической глубиной заложения проверялась путем вскрытия контрольных шурфов фундаментов на объектах комплекса доменной печи № 7 АО «ЕВРАЗ НТМК». Результаты измерений приведены в Таблице 1.

Из данных Таблицы 1 видно, что традиционный метод исследования и косвенный метод сейсморазведки показывают схожие результаты с незначительными расхождениями, что позволяет использовать на предприятии более целесообразный метод без излишних рисков [8] и финансовых [9] и технических затрат. Целью исследования было доказать целесообразность использования сейсморазведочного метода для определения глубины

2 Мьютинг в сейсморазведке — это стандартная математическая процедура, используемая при обработке сейсмических данных для ослабления или подавления сигналов начальной или конечной части сейсмограмм. Осуществляется для уменьшения влияния волн-помех и искажений, помогает улучшить качество сейсмических данных.

Таблица 1. Результаты измерений глубины заложения подошвы фундаментов с помощью инженерных сейсмических систем с фактической глубиной заложения на объектах комплекса доменной печи № 7 АО «ЕВРАЗ НТМК»

| № п/п | Наименование объекта | Глубина заложения фундамента, измеренная методом сейсморазведки, H1, мм | Глубина заложения фундамента, измеренная в контрольном шурфе, H2, мм | Максимальное расхождение, мм |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Тракт коксоподачи. Галерея конвейера Кл-1 | 3500–3600 | 3800 | –300 |
| 2 | Тракт коксоподачи. Перегрузочная станция ПС-3а | 2500–2600 | 2400 | 200 |
| 3 | Дымовая труба блока воздухонагревателей | 3100–3200 | 3030 | 170 |
| 4 | Блок воздухонагревателей | 3200–3300 | 3300 | –100 |
| 5 | Центральный узел доменной печи | 2900–3000 | 2750 | 250 |
| 6 | Литейный двор № 1 | 3300–3400 | 3300 | 100 |
| 7 | Кабельная эстакада до здания пульта управления печью | 2400–2500 | 2400 | 100 |
| 8 | Пылеуловитель с газоходами. Фундамент опорной системы осевого циклона | 2000–2100 | 2100 | –100 |
| 9 | *Скруббер с каплеотделителем* | *9800–10000* | *9500* | *500* |
| 10 | *Помещение лебедок пылеулавливателя с газоходами* | *8500–8700* | *8600* | *100* |
| 11 | *Бункерная эстакада* | *5100–5300* | *5500* | *–400* |

заложения фундамента. Проведенное исследование, показавшее незначительные расхождения между традиционным и сейсморазведочным методом, показывает возможность применения последнего, особенно в сложных условиях непрерывного производственного процесса.

## Заключение

В современной действительности при постоянном росте и развитии промышленной индустрии и металлургического производства с его непрерывным производственным процессом и разветвленной инженерной коммуникацией применение современных геофизических методов исследований является очень актуальным и востребованным для определения глубины заложения различных типов фундаментов. По результатам проведенных исследований (на объектах металлургического производства АО «ЕВРАЗ НТМК» с помощью методов сейсмической разведки) можно сделать вывод о существенной точности измерений свайных фундаментов и фундаментов на естественном основании (0,5 м). Подобный результат стал возможен благодаря применению специальных процедур обработки полевых данных, реализации идеи трехмерной сейсмической локации, статистического подхода к интерпретации полученных результатов.

## Список использованной литературы


[1] Гурвич И. И., Боганик Г. Н. Сейсмическая разведка. — 3-е изд., перераб. — М.: Недра, 1980. — 551 с.

[2] Губарев И. С., Щемерова О. Г. Инструменты управления производственными процессами на металлургических предприятиях // Российские регионы в фокусе перемен: сб. докл. XVIII Междунар. конф. (Екатеринбург, 16–18 ноября 2023 г.). — Екатеринбург: Изд. дом «Ажур», 2023. — С. 501–504. — URL: http://elar.urfu.ru/handle/10995/133870 (дата обращения: 05.09.25).

[3] Долгаль А. С., Муравина О. М., Аузин А. А. и др. Сферы применения современных статистических методов обработки геофизической информации // Вестн. ВГУ. Серия: Геология. — 2019. — № 4. — С. 79–84. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41467669 (дата обращения: 05.09.25).

[4] Жильцов А. П., Вишневский Д. А., Козачишен В. А., Бочаров А. В. Разработка алгоритма и компьютерной программы для расчета надежности оборудования и производственного риска в металлургической отрасли // Черные металлы. — 2018. — № 11. — С. 27–33. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36642520 (дата обращения: 05.09.25).

[5] Зудилин А. Э. Система интегрирования геофизических данных с целью прогноза параметров флюидодинамических процессов осадочного бассейна: автореф. дис. ... канд. геолого-минералог. наук. — Екатеринбург: ОУ ВПО УГГУ, 2011. — 23 с.

[6] Мирошниченко С. С., Лялин В. Е. Об особенностях алгоритмов обработки геофизической информации // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. — 2019. — № 2 (12). — С. 45–50. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38501026 (дата обращения: 05.09.25).

[7] Никитин А. А., Дучков А. А., Кулаков А. Ю., Василевский А. Н. Развитие программных средств для сейсмической томографии // Геодинамика. Геомеханика и геофизика: материалы XVIII Всерос. семинара, Стационар «Денисова пещера», Алтайский край, 23–28 июля 2018 г. — Стационар «Денисова пещера», Алтайский край: Федер. гос. бюдж. учреждение науки Ин-т нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сиб. отд-ния Рос. акад. наук, 2018. — С. 19–20. — URL: https:// www.elibrary.ru/item.asp?id=35654876 (дата обращения: 05.09.25).

[8] Федосов А. В., Маннанова Г. Р. Анализ опасностей, оценка риска аварий на опасных производственных объектах и рекомендации по выбору методов анализа риска // Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов. — 2016. — № 2 (8). — С. 58–61. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26255423 (дата обращения: 05.09.25).

[9] Харитоненко А. А., Жильцов А. П. Анализ и усовершенствование методов технического обслуживания и ремонтов оборудования в металлургическом производстве // Сб. науч. тр. Донбас. гос. техн. ун-та. — 2019. — № 17 (60). — С. 98–104. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41575472 (дата обращения: 05.09.25).

[10] Fichtner A., Kennett B., Tsai V. et al. Seismic Tomography 2024 // Bulletin of the Seismological Society of America 2024; 114 (3): 1185–1213. — DOI: https://doi.org/10.1785/0120230229.


## References


[1] Gurvich I. I., Boganik G. N. Sejsmicheskaya razvedka. — 3-e izd., pererab. — M.: Nedra, 1980. — 551 s.

[2] Gubarev I. S., Shchemerova O. G. Instrumenty upravleniya proizvodstvennymi processami na metallurgicheskih predpriyatiyah // Rossijskie regiony v fokuse peremen: sb. dokl. XVIII Mezhdunar. konf. (Ekaterinburg, 16–18 noyabrya 2023 g.). — Ekaterinburg: Izd. dom «Azhur», 2023. — S. 501–504. — URL: http://elar.urfu.ru/handle/10995/133870 (data obrashcheniya: 05.09.25).

[3] Dolgal' A. S., Muravina O. M., Auzin A. A. i dr. Sfery primeneniya sovremennyh statisticheskih metodov obrabotki geofizicheskoj informacii // Vestn. VGU. Seriya: Geologiya. — 2019. — № 4. — S. 79–84. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41467669 (data obrashcheniya: 05.09.25).

[4] Zhil'cov A. P., Vishnevskij D. A., Kozachishen V. A., Bocharov A. V. Razrabotka algoritma i komp'yuternoj programmy dlya rascheta nadezhnosti oborudovaniya i proizvodstvennogo riska v metallurgicheskoj otrasli // Chernye metally. — 2018. — № 11. — S. 27–33. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36642520 (data obrashcheniya: 05.09.25).

[5] Zudilin A. E. Sistema integrirovaniya geofizicheskih dannyh s cel'yu prognoza parametrov flyuidodinamicheskih processov osadochnogo bassejna: avtoref. dis. ... kand. geologo-mineralog. nauk. — Ekaterinburg: OU VPO UGGU, 2011. — 23 s.

[6] Miroshnichenko S. S., Lyalin V. E. Ob osobennostyah algoritmov obrabotki geofizicheskoj informacii // ITNOU: Informacionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii. — 2019. — № 2 (12). — S. 45–50. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38501026 (data obrashcheniya: 05.09.25).

[7] Nikitin A. A., Duchkov A. A., Kulakov A. Yu., Vasilevskij A. N. Razvitie programmnyh sredstv dlya sejsmicheskoj tomografii // Geodinamika. Geomekhanika i geofizika: materialy XVIII Vseros. seminara, Stacionar «Denisova peshchera», Altajskij kraj, 23–28 iyulya 2018 g. — Stacionar «Denisova peshchera», Altajskij kraj: Feder. gos. byudzh. uchrezhdenie nauki In-t neftegazovoj geologii i geofiziki im. A. A. Trofimuka Sib. otd-niya Ros. akad. nauk, 2018. — S. 19–20. —

URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35654876 (data obrashcheniya: 05.09.25).
[8] Fedosov A. V., Mannanova G. R. Analiz opasnostej, ocenka riska avarij na opasnyh proizvodstvennyh ob'ektah i rekomendacii po vyboru metodov analiza riska // Ekspertiza promyshlennoj bezopasnosti i diagnostika opasnyh proizvodstvennyh ob'ektov. — 2016. — № 2 (8). — S. 58–61. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26255423 (data obrashcheniya: 05.09.25).
[9] Haritonenko A. A., Zhil'cov A. P. Analiz i usovershenstvovanie metodov tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remontov oborudovaniya v metallurgicheskom proizvodstve // Sb. nauch. tr. Donbas. gos. tekhn. un-ta. — 2019. — № 17 (60). — S. 98–104. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41575472 (data obrashcheniya: 05.09.25).
[10] Fichtner A., Kennett B., Tsai V. et al. Seismic Tomography 2024 // Bulletin of the Seismological Society of America 2024; 114 (3): 1185–1213. — DOI: https://doi.org/10.1785/0120230229.

Статья поступила в редакцию 26.06.2025.
Опубликована 30.09.2025.

**Кузнецов Михаил Сергеевич**
кандидат технических наук, доцент, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Нижнетагильский технологический институт, Нижний Тагил, Российская Федерация e-mail: kms.nt@mail.ru

**Kuznezov Mihail S.**
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Nizhny Tagil Technological Institute, Nizhny Tagil, Russian Federation
e-mail: kms.nt@mail.ru

**Путилова Евгения Анатольевна**
кандидат философских наук, доцент, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Нижнетагильский технологический институт, Нижний Тагил, Российская Федерация e-mail: e.a.putilova@urfu.ru
ORCID ID 0000-0002-0096-3443

**Putilova Evgenia A.**
Candidate of Philosophical Sciences, Associate Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Nizhny Tagil Technological Institute, Nizhny Tagil, Russian Federation
e-mail: e.a.putilova@urfu.ru
ORCID ID 0000-0002-0096-3443

**Козин Александр Евгеньевич**
заместитель генерального директора по проектированию, ООО «ЕВРАЗ Стил Билдинг», Москва, Российская Федерация
e-mail: Aleksandr.Kozin@evrazsteel.ru

**Kozin Alexander E.**
Deputy General Director for Design, LLC «EVRAZ Steel Building», Moscow, Russian Federation
e-mail: Aleksandr.Kozin@evrazsteel.ru