

## ГЕОМЕХАНИКА

УДК 550.3 + 551 + 622.33.013.3 + 681:624.1

### О ВЕРИФИКАЦИИ КИНЕМАТИЧЕСКОГО ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ ВОЛН МАЯТНИКОВОГО ТИПА ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В УСЛОВИЯХ РУДНИКА ТАШТАГОЛЬСКИЙ И МРАМОРНОГО КАРЬЕРА ИСКИТИМСКИЙ

**В. Н. Опарин<sup>1,2</sup>, В. Ф. Юшкин<sup>1</sup>, Д. Е. Рублев<sup>1</sup>,  
Н. А. Кулинич<sup>1</sup>, А. В. Юшкин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, E-mail: 114@ngs.ru,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия,

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, E-mail: 114@ngs.ru,  
ул. Пирогова, 2 630090, г. Новосибирск, Россия

Приведены экспериментальные данные, свидетельствующие об изменении скорости распространения сейсмических волновых пакетов в зависимости от энергетических уровней механических импульсных воздействий при распространении упругих волн в системе “рудное тело – порода разломной зоны – рудное тело” на примере подземной выработки рудника Таштагольский (Кемеровская область), а также карстового разлома мраморного карьера Искитимский (Новосибирская область). Показано, что установленные зависимости первых вступлений сейсмических волновых пакетов от энергетических уровней наносимых ударов (источников) отвечают кинематической зависимости, характерной для волн маятникового типа в напряженных геосредах со структурой.

*Рудный массив, мраморный карьер, волны маятникового типа, упругие волновые пакеты, энергетические уровни импульсных воздействий, кинематическая связь, напряженно-деформированное состояние, структурные блоки, разломные зоны*

#### ВВЕДЕНИЕ

Минувшие два десятилетия ознаменовались открытием нелинейных упругих волн маятникового типа в массивах горных пород, динамико-кинематические характеристики которых несут информацию о напряженно-деформированном состоянии, структуре и физико-механических свойствах геосреды, а также важных параметрах источников излучения [1–9]. Полученные феноменологические результаты дали импульс теоретическим разработкам по созданию основ теории волн маятникового типа [1, 5, 9–20; и др.].

Эти достижения, формирующие основы нелинейной сейсмологии [7–9], свидетельствуют об их большом прикладном потенциале, в том числе в геотехнологическом аспекте [6, 21]. В настоящее время очевидную актуальность приобретают фундаментальные вопросы синтеза

---

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта ОНЗ РАН-3.1, партнерского интеграционного проекта № 100.

достижений динамической теории упругости в механике сплошных сред и динамического поведения фрагментированных геосред с нелинейно связанными между собой “абсолютно твердыми телами” в стесненных условиях — в виде сопряженных физических маятников, иерархически вложенных друг в друга [22, 23].

Как показали натурные эксперименты [24], волны маятникового типа обладают рядом особенностей, определяемых механизмом их распространения в напряженных массивах горных пород блочно-иерархического строения [7–9]. В этой связи возникают вопросы о выполнимости широко применяемого в сейсморазведке и сейсмотомографии геометрического “принципа взаимности” [25–28], а также наличия фактической связи между скоростными характеристиками нелинейных упругих волн от энергетических параметров источников их излучения [5, 6, 9].

Согласно принципу взаимности [27], при перемене местами источника и приемника моно-типных сейсмических волн время распространения последних не должно изменяться. При этом в сложно построенных геосредах, когда сейсмические волны, излучаемые источником и удовлетворяющие принципу Ферма, распространяются с близкими временами, использование принципа взаимности на практике сопряжено с определенными трудностями.

Принцип Ферма — один из основных в геометрической сейсмике (равно как и в оптике). В соответствии с этим принципом траектория движения фронта сейсмической волны в лучевом приближении определяется критерием достижения экстремума времени распространения сейсмической волны из одной точки в другую по сравнению с иными возможными траекториями. Волновую поверхность (фронт сейсмической волны) в последующий момент времени можно построить по предыдущей, опираясь на принцип Гюйгенса, когда каждая точка предыдущего волнового фронта (поверхности) рассматривается как элементарный источник сейсмических волн для последующего, с соответствующим суммированием излучаемых ими волн по направлениям (использование принципа суперпозиции).

Применение обсуждаемых физических принципов к нелинейным сейсмическим волнам, например маятникового типа, становится проблематичным. Так, из кинематического выражения для волн маятникового типа [5, 9] следует, что их скоростные характеристики зависят непосредственно и “одновременно” как от вида напряженно-деформированного состояния горных пород (а значит, и степени смыкания структурных отдельностей геосреды — вещественных носителей упругой энергии), так и от мощности источника излучения — при соблюдении известного [29] безразмерного энергетического критерия их возникновения и распространения в напряженных геосредах.

Отмеченные зависимости приводят к тому, что на практике задача распознавания “монотипности” той или иной группы сейсмических волн существенно усложняется. При определенных условиях скоростные характеристики маятниковых волн становятся трудно отличимыми от линейных продольных и поперечных волн ( $P$  и  $S$ -волны), обладая при этом специфическими волноводными свойствами [9]. Последние значительно отличаются по механизму своего происхождения от волноводов для  $P$ - и  $S$ -волн и, следовательно, необязательно совпадают их геометрические характеристики.

При совместном распространении линейных ( $P$ ,  $S$ ) и нелинейных (маятникового типа) упругих волн реализуется механизм нелинейной интерференции сейсмических волн [1, 10–20], что приводит к проблеме поиска “развитых признаков” для идентификации продольных, поперечных и маятниковых волн. Наиболее ярко она выражена при анализе сейсмических волновых пакетов, регистрируемых в так называемых ближней и переходной зонах от источников динамических событий (толчки, горные удары, взрывы), подлежащих координатной привязке и энергетической оценке источников. Так, в работе [30] на примере мониторинга процесса бу-

ровзрывной отработки продуктивных пластов на шахте Tau Tona Mine (ЮАР, глубина ~ 3 км) отмечается, что из регистрируемых в течение 5 дней нескольких тысяч сейсмособытий высококоразрешающей ISS-микросетью из 5 трехкомпонентных акселерометров лишь 1086 имели хорошо развитые признаки вступления  $P$ - и  $S$ -волн.

По существу, первые попытки разобраться в причинах появления подобного рода сейсмических записей проводились экспериментально на рудниках полиметаллов Талнахско-Октябрьского, а также железорудного Таштагольского месторождений [31–33], а в последнее время — и на карьерах строительного камня [34], где большое внимание уделялось особенностям эволюции спектрального состава сейсмических волн с удалением от мест ведения буровзрывных работ.

**Цель настоящей работы** — продолжение цикла натуральных экспериментальных исследований по проверке выполнимости фундаментального для сейсмических исследований принципа взаимности. В первую очередь — с позиций нелинейного влияния энергетических характеристик источников возбуждения сейсмических волн различного типа, предсказываемого в рамках теории волн маятникового типа [6, 9].

### **1. О ВЛИЯНИИ ЭНЕРГИИ ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН НА КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УПРУГИХ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ**

Для получения новой информации о параметрах распространения сейсмических волновых пакетов в напряженных блочных геосредах изучалось влияние уровня энергии источника импульсного возбуждения, зоны в пределах разрушений вокруг тектонического разлома и “исходной” трещиноватости массива на динамико-кинематические характеристики упругих волн. В качестве объекта исследований выбран борт подземной выработки рудника Таштагольский на горизонте – 210 м, пересекаемый тектоническим разломом, “заполненным” сланцами.

Рудная зона Таштагольского месторождения имеет подковообразную форму. Руды и вмещающие породы прочные, высокомодульные, хрупко разрушаются под нагрузкой, способны накапливать значительную энергию упругих деформаций [35–37]. Удароопасными считаются магнетитовая руда, сиениты, скарны, диориты, туфосланцы. Горное давление по простиранию рудного тела представляет основной фактор, осложняющий ведение подземных горных работ. В настоящее время горные работы ведутся по Восточному, Северо-Западному и Юго-Восточному участкам месторождения на семи горизонтах рудника: +70, ±0, –70, –140, –210, –280, –350 м. Основным по добыче руды является горизонт –280 м. Общая глубина очистных и горно-капитальных работ достигает 890 м (гор. –350 м).

На участке эксперимента в зоне тектонического разлома руда магнетитовая, богатая, черного цвета, тонкозернистая, имеет среднюю устойчивость. Наблюдаются сульфиды в виде тонкого распыления пиритовых и халькопиритовых гнезд. Отмечаются редкие секущие прожилки белого кварца. Трещиноватость крупно- и среднеблочная, по плоскостям блоков — хлорит. Породы разломной зоны представлены в основном сланцами и роговиком. Рудное тело находится под действием сжимающих напряжений с максимальными компонентами, ориентированными по его простиранию [35–37].

На руднике проведены эксперименты по изучению особенностей прохождения упругой волной разломной зоны. Измерения осуществлялись сейсмостанцией “Лакколит 24-М” в режиме “По обнаружению” [38]. Этот режим обеспечивает включение сейсмостанции на запись при наступлении сейсмособытия, амплитуда сигнала которого превышает заданное пороговое значение срабатывания запускающего сейсмоприемника. При записи сигналов коэффициент усиления по каналам измерений принят равным 100, частота дискретизации выбрана 16 кГц — как оптимальная по длительности записи и разрешению регистрируемых сигналов.

Используемые при измерениях сейсмоприемники GS20-DX в количестве 14 шт. установлены попарно вдоль борта выработки (рис. 1). Ориентация оси чувствительности у группы сейсмоприемников 1–7 вертикальная к почве выработки, а у группы 8–14 — перпендикулярная к борту для каждой пары. Из 7 пар сейсмоприемников две установлены по рудному телу справа от разлома, из них пара (2, 13) размещена вблизи границы разлома; пары (3, 12 и 4, 11) — по породе разлома; пары (5, 10; 6, 9 и 7,8) — по рудному телу слева от разлома, из них пара (5, 10) находится вблизи границы слева от разлома. Принятая ориентация сейсмоприемников позволяет регистрировать вертикальные и горизонтальные компоненты упругого волнового пакета в породном массиве. Общая длина измерительной трассы сейсмоприемников составила 33.2 м.

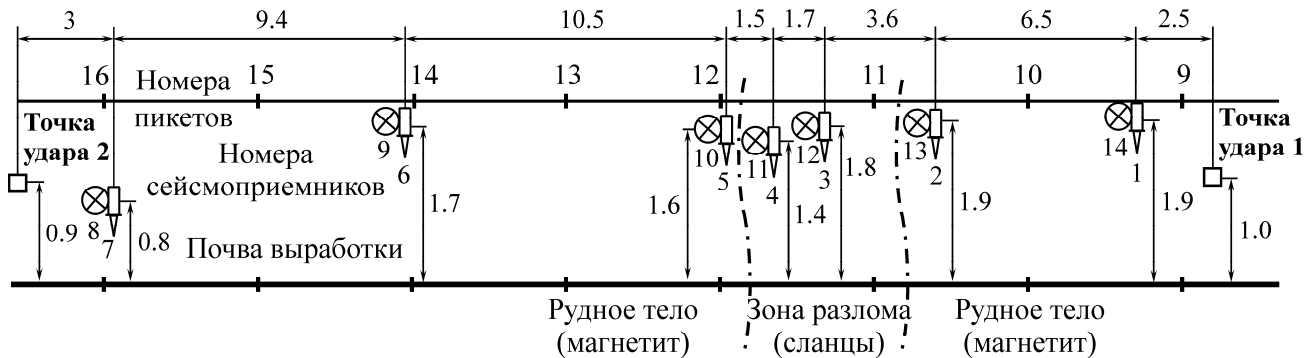


Рис. 1. Схема расстановки сейсмоприемников с указанием расстояний (в м) по борту выработки и высоте от почвы (вид сбоку) на отметке проведения измерений гор. –210 м в зоне тектонического разлома рудника. Расстояние между пикетами 5 м. Ширина зоны разлома ~ 6.2 м

Места импульсных механических воздействий на породный массив выбраны с противоположных сторон от трассы сейсмоприемников с возможностью нанесения ударов по борту выработки. Удары производились перпендикулярно борту выработки: **точка 1** выбрана на расстоянии 2.5 м справа от пары сейсмоприемников (1, 14); **точка 2** — на расстоянии 3 м слева от пары сейсмоприемников (7, 8). Разлом расположен на расстоянии ~ 9.2 м слева от точки ударов 1 и на расстоянии ~ 23.2 м справа от точки ударов 2. Ширина тектонического разлома (зона четко различаемой в рудном теле трещиноватой породы — сланцев) составляет в среднем 6.2 м с “внедрением” рудного тела по границам. Визуально отмечается достаточно плотное смыкание структурных блоков пород между стенками отделяющих их трещин.

Сейсмические волновые пакеты возбуждались с помощью маятниковых ударов по борту массива стальными бойками массой 0.2 кг с энергией удара 1.7 Дж и массой 3 кг с энергией удара 34 Дж соответственно. Так как импульсные воздействия осуществлялись без использования согласующего устройства в точках удара, при контакте бойка с породой происходило образование “наклепа” и мелких трещин; при повторении ударов иногда отделялись небольшие осколки пород, что отражалось на стабильности и качестве регистрируемого сигнала. Поэтому в экспериментах значительное внимание уделялось контролю “повторяемости” сейсмических записей по сериям “идентичных” ударных воздействий.

В ходе эксперимента получены записи упругих волновых пакетов в массиве по времени  $t$  при маятниковых ударах бойком с энергиями 1.7 и 34 Дж непосредственно по борту выработки в выбранных точках 1 и 2. Это позволило оценить влияние энергии удара на скорость распространения упругого волнового пакета. Скорость продольной волны для образца магнетита составляла 5.67 км/с, а для образца сланцевых пород разломной зоны ~ 4.5 км/с.

По записям сейсмических сигналов строились годографы и вычислялись кинематические параметры скорости распространения упругих волновых пакетов на заданных интервалах вдоль трассы сейсмоприемников. Для оценки уровней стабильности возбуждаемых волновых

пакетов и повышения статистической достоверности данных измерений каждый опыт при выбранной энергии удара повторялся 10 раз. При ударах с энергией 1.7 Дж разброс по времени вступлений сейсмической волны достигал 25 % и более, а при ударах с энергией 34 Дж такой разброс не превышал 10 %.

На рис. 2 приведены скорости распространения “вертикальной” и “горизонтальной” компонент упругих волновых пакетов в массиве, возбуждаемых при ударах бойком по борту выработки в точке 1 с энергиями 1.7 и 34 Дж, определенные по записям сигналов сейсмоприемниками 1–7 и 8–14 соответственно. Изменение скорости упругих волн с удалением от источника при энергии ударов, различающейся в 20 раз, имеет одинаковую, хотя и немонотонную (!) тенденцию к ее снижению (рис. 2а). Примечательно, что при ударах с энергией 34 Дж регистрируемая скорость упругой волны значительно выше, чем при ударах с энергией 1.7 Дж. Иными словами, при механическом воздействии на блочный массив горных пород импульсами с большей энергией, скорость распространения упругого волнового пакета возрастает. При переходе границ разлома между относительно высокоскоростной (магнетит) и низкоскоростной (сланцы) геосредой наблюдаются “ступенчатые” изменения скорости распространения волновых пакетов, подобные выявленным на контактных поверхностях между блоками в модельных экспериментах [21, 39].

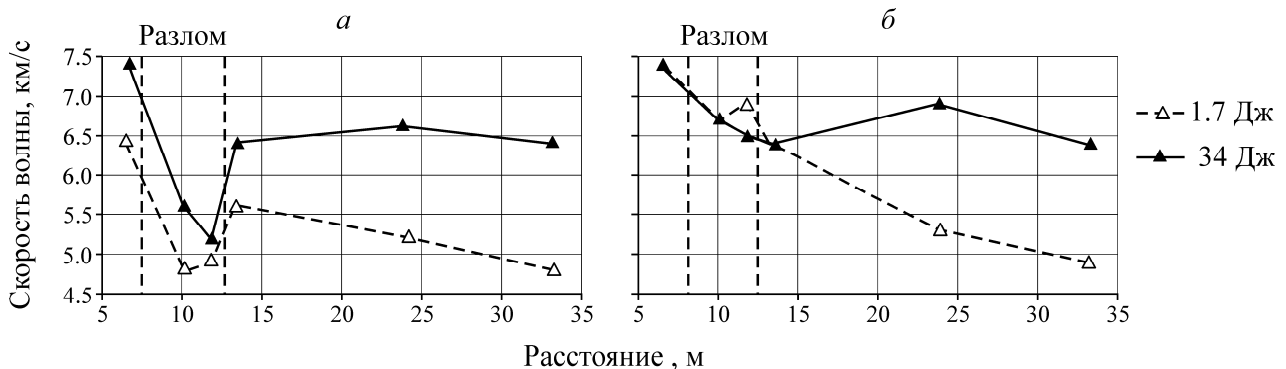


Рис. 2. Изменения с расстоянием от источника скорости распространения волновых пакетов в массиве, определенные по сейсмограммам, зарегистрированным при ударах бойком по борту подземной выработки в **точке 1** согласно рис. 1: *а* — сейсмоприемники 1–7 (**вертикально** к почве выработки **поляризованные**); *б* — сейсмоприемники 8–14 (**горизонтально** к стенке выработки **поляризованные**). Расстояния указаны от пары сейсмоприемников 1, 14

На рис. 2б показано изменение скоростей (до расстояний ~12–13 м) с практически совпадающими значениями при разных энергиях удара, однако далее с расстоянием скорость упругих волновых пакетов, возбуждаемых при более высокой энергии удара, становится значительно выше. При переходе границ тектонического разлома, как и в предыдущем случае, также отмечаются изменения скорости распространения волновых пакетов, однако их “ступенчатость” выражена существенно слабее, чем на рис. 2а.

На рис. 3 приведены изменения с расстоянием от источника скорости распространения упругих волновых пакетов в рудном массиве при ударах бойком по борту в точке 2 с энергиями 1.7 и 34 Дж, определенные по записям сейсмоприемников 1–7 и 8–14 соответственно. При ударах с энергией 34 Дж скорость волны с удалением от импульсного источника также значительно выше, чем при ударах с энергией 1.7 Дж, т. е. с ростом энергии импульсного источника возрастает и скорость распространения волнового пакета. Однако при переходе границы разлома слева (магнетит–сланец) “ступенчатое” снижение скорости не наблюдается, что, вероятно, обусловлено механической “несимметрией” в структурном строении и виде напряженно-деформированного состояния горных пород на участке измерений относительно зоны тектонического разлома.

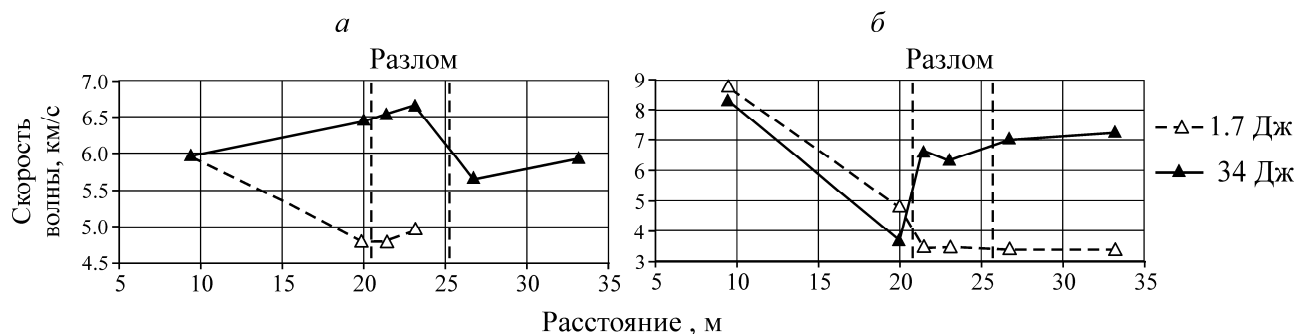


Рис. 3. Изменения с расстоянием от источника скорости распространения упругих волновых пакетов в массиве, определенные по сейсмограммам, зарегистрированным при ударах в **точке 2** на рис. 1: *a* — сейсмоприемники 1–7; *б* — сейсмоприемники 8–14. Расстояния указаны от пары сейсмоприемников 7, 8

На рис. 3б видно, что изменения скорости распространения для горизонтально поляризованных компонент упругих волновых пакетов имеют практически близкие значения до расстояний от источника  $\sim 20$  м, а по мере их распространения в массиве скорость при большей энергии удара существенно увеличивается.

Таким образом, сравнение графиков “обращенных” скоростей распространения для горизонтально поляризованных компонент сейсмических волновых пакетов в массиве, приведенных на рис. 2 и 3, показывает значительное изменение скорости распространения упругих волновых пакетов по борту напряженного массива при прохождении волновым пакетом тектонического разлома в системе “рудное тело (магнетит)–порода разлома (сланец)–рудное тело” (см. рис. 1): в зависимости от энергии импульсного воздействия меняется и структура этих графиков. При этом в породах разлома наблюдается снижение скорости волнового пакета, в рудном теле — ее увеличение (см. рис. 2). При увеличении энергии удара скорость распространения упругого волнового пакета возрастает как в породах разлома, так и в рудном теле, что свидетельствует об “инвариантности” влияния энергетического параметра источника по отношению к особенностям структурного строения горных пород и “фону” горного давления, действующему вдоль экспериментальной выработки.

Отмеченные особенности и скоростные характеристики для первых вступлений упругих волновых пакетов от энергии импульсных воздействий механическими ударами бойка в блочном массиве следуют из кинематического выражения В. Н. Опарина [6, 40] для волн маятникового типа ( $\mu$ -волн):

$$V_{\mu} = \frac{(1 + \nu[\sigma])V_{\varepsilon}V_p}{V_{\varepsilon} + \nu[\sigma]V_p}, \quad (1)$$

где  $V_{\mu}$  — скорость  $\mu$ -волны;  $V_p$  — скорость продольной волны в геоблоках-носителях  $\mu$ -волн;  $V_{\varepsilon}$  — средняя скорость относительного трансляционного движения неупруго “соударяющихся” геоблоков;  $\nu[\sigma]$  — отношение среднего раскрытия трещин к диаметру отделяемых ими геоблоков, квазипараболически зависящего от напряженного состояния  $\sigma$  в иерархически построенном блочном массиве горных пород.

Здесь скорость  $V_{\varepsilon}$  зависит непосредственно [5, 6] от энергии импульсного источника, с помощью которого осуществляется механическое воздействие, а также массы работающих геоблоков горного массива для  $\mu$ -волн и характера затухания передаваемой геоблокам энергии за

счет неупругого соударения и трения с расстоянием от источника возмущения [10–20]. Из (1) следует, что чем больше значение параметра  $V_\varepsilon$ , прямо пропорционального энергии импульсного воздействия, тем больше величина  $V_\mu$ , стремящаяся в пределе к значению  $V_p$ . Кроме того, параметр  $\nu[\sigma]$  весьма чувствителен к наличию зон нарушения сплошности массивов горных пород. Здесь он принимает повышенные значения, а  $V_\mu$  — пониженные.

Как показано в [5, 6], при  $V_p \gg V_\varepsilon$  формула (1) упрощается, приобретая вид

$$V_\mu \approx \frac{1 + \nu[\sigma]}{\nu[\sigma]} V_\varepsilon, \quad (2)$$

где  $V_\varepsilon = V_\varepsilon(W, \vec{r})$  — функция, монотонно возрастающая от энергии  $W$  импульсного источника и соответственно убывающая с удалением от него  $\vec{r}$ .

## 2. О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ЭВОЛЮЦИИ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА УПРУГИХ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ С УДАЛЕНИЕМ ОТ ИСТОЧНИКОВ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ЭНЕРГИЕЙ

Покажем, что изменение положения и энергии источника импульсного воздействия относительно зоны тектонического разлома приводит не только к существенному изменению регистрируемых в натурном эксперименте кинематических характеристик упругих волновых пакетов, но и их спектрального состава, т. е. динамико-кинематических характеристик в целом.

Об этом свидетельствуют (рис. 4) спектры сигналов, записанных по каналам 1 и 3 при ударе бойком с энергией 34 Дж справа и соответственно по каналам 5 и 4 при ударе бойком с такой же энергией слева от границ разлома (см. рис. 1). Видно, что при переходе сейсмическим волновым пакетом границ разлома происходит увеличение максимумов амплитуд высокочастотных составляющих спектра относительно амплитуд низкочастотных составляющих. Это можно объяснить “спектрально-модулирующим” действием структурных отдельностей пород в разломной зоне, что также согласуется и с теоретическими данными [10–20].

На графиках наблюдается принципиальное различие записей. Так, при ударе справа от разлома (точка 1) на границе контакта “магнетит – сланец” спектры сейсмического сигнала по каналам 1 и 3 практически однотипные с некоторым смещением их максимума по каналу 3 в область более высоких частот. При ударе слева от разлома (точка 2) спектр сигнала, имеющий ярко выраженный одиночный пик по каналу 5, становится многопиковым по каналу 4 с выделением главного максимума, также смещенного в более высокочастотную область. Одновременно на рис. 4б по каналу 5 отмечается увеличение амплитуды низкочастотных компонент спектра. Это может свидетельствовать о разнородности условий на контактных поверхностях, взаимодействующих в напряженной структуре разлома на его границе с рудным телом.

**Таким образом, как следует из п. 1 и 2, напряженная геосреда с тектоническим разломом неодинаково пропускает упругие волновые пакеты импульсных источников, возбуждаемых с противоположных относительно разлома сторон,** что свидетельствует о нарушении известного в сейсмике принципа взаимности. При этом в спектрах регистрируемых сигналов наблюдается существенное различие: при переходе волновым пакетом границы разлома в одном направлении его спектр сохраняет одиночный пик со смещением спектрального максимума в сторону более высоких частот; при переходе волновым пакетом границы разлома в противоположном направлении сейсмический спектр (на уровне 0.7 от максимума) приобретает многопиковый характер, также смещаясь в сторону высоких частот с увеличением амплитуды низкочастотных составляющих.

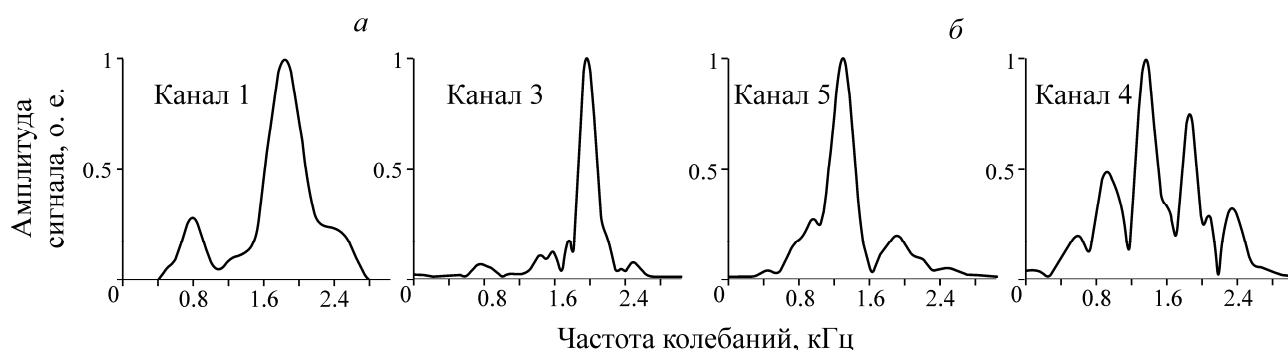


Рис. 4. Спектры сигналов на границах разлома при ударах бойком с энергией 34 Дж: *а* — в точке 1; *б* — в точке 2; по амплитуде нормализованы к их максимальному значению

### 3. ИЕРАРХИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД В ЗОНЕ ТЕКТОНИЧЕСКОГО РАЗЛОМА И ЗА ЕЕ ПРЕДЕЛАМИ

Обнаруженная в экспериментах “несимметричность” в спектральном составе сейсмических волновых пакетов при перемене местоположения их источника относительно просвечиваемой зоны тектонического разлома может быть обусловлена различием размеров структурных элементов — носителей маятниковых волн в этой зоне и за ее пределами.

Для проверки возможности влияния структурного фактора рудного массива на динамико-кинематические характеристики упругих волновых пакетов при изменяющихся по уровню энергии и положению импульсных источников относительно тектонического разлома выполнены соответствующие инструментальные измерения и анализ структурной блочности массивов горных пород по методике, описанной в работах [41–43].

На месте проведения сейсмического эксперимента в подземной выработке рудника для установления структурного строения массива и определения характерных размеров блоков рудного тела и пород разлома осуществлены соответствующие замеры.

**По результатам измерений** сформирован набор данных, содержащий 1456 численных значений  $\Delta_i$  — линейных размеров граней блоков до границ скола по каждому блоку. Выборка блоков в пунктах наблюдений на горизонте –210 м по борту подземной выработки, пересекаемой тектоническим разломом, была произвольной, однако для набора статистики измерения проводились поочередным перебором для групп внешне однотипных блоков как по руде (1164 измерения), так и породам разлома (292 измерения). Размеры граней измерялись на выделяемых блоках как по внешним границам, так и по “вложенным” структурам, просматриваемым на рельефе. Ограничения касались лишь предельных размеров блоков: максимальный размер блока не превышал 130 см, минимальный — 1 см, данные измерений округлялись с точностью до 1 см.

В результате получены упорядоченные массивы данных по рудному телу, породе и сводный массив данных в координатах “линейный размер блока — частота (число) измерений” по всем измеренным значениям. На основе этих данных построены графики относительных распределений блоков по линейным размерам (рис. 5), где  $N_{\Sigma}$  — общее количество линейных размеров выделенных блоков в соответствующей выборке,  $N_L$  — количество блоков заданных размеров в выборке,  $L$  — размер блока, см.

Как видно из рис. 5*а*, *б*, в рудном теле и породах разломной зоны структурные отдельности по своим размерам покрывают в основном диапазон от ~5 до 60 см. При этом распределение структурных отдельностей для пород разломной зоны (рис. 5*б*) в отличие от аналогичных для рудного тела (рис. 5*а*) выражен более контрастно по своим экстремальным значениям, с явно



доминирующей составляющей “осцилляций” примерно в 5 см. Такого порядка размеры структурных блоков в данных условиях можно рассматривать одновременно и как “работающие” [22], т. е. как одни из наиболее “подвижных” в стесненных условиях породного массива.

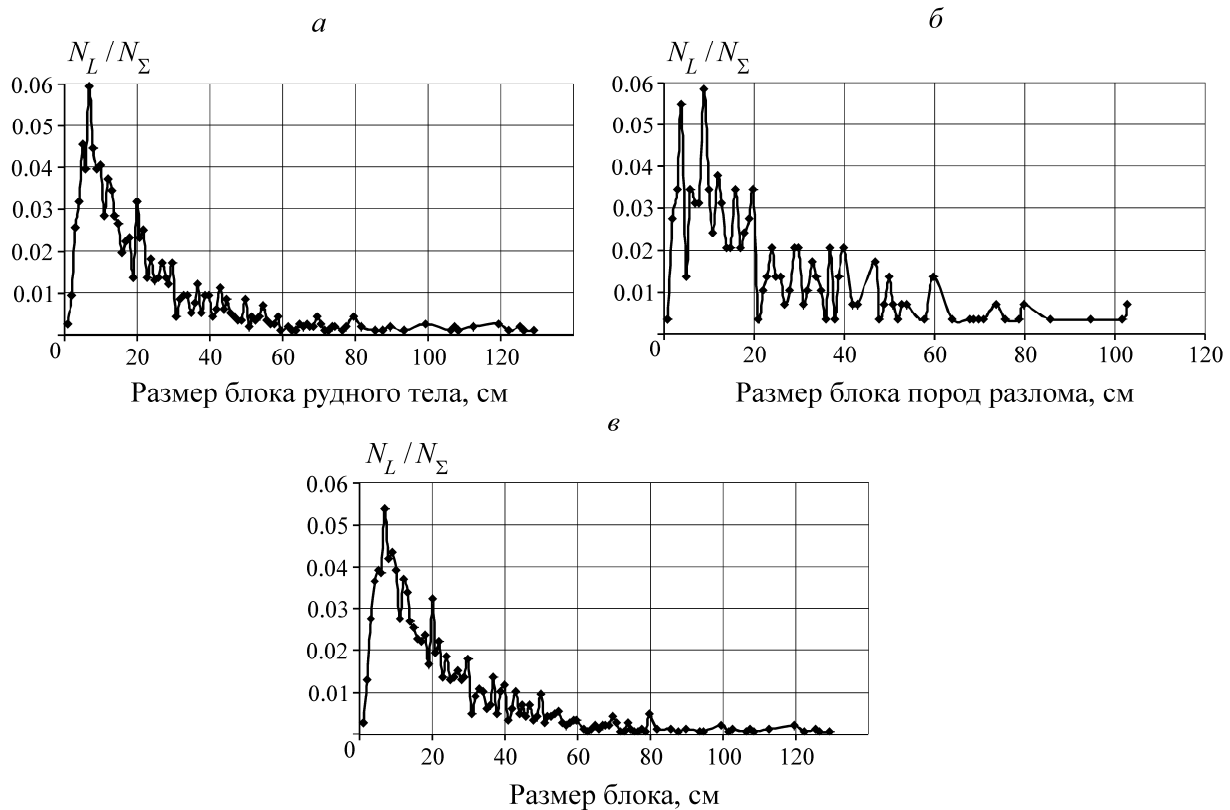


Рис. 5. Относительные распределения выделенных размеров блоков в линейной шкале представлений по данным измерений: а — в рудном теле; б — в породах разлома; в — суммарно

Для установления более точных закономерностей в распределении выделенных блоков горных пород, представленных на рис. 5, массивы данных по руде, породам разлома и суммарно были обработаны по методике, приведенной в [43].

Первый шаг обработки заключался в выделении линейных размеров блоков, канонически сопряженных по  $(\sqrt{2})^i$ , где  $i = 1, 2, 3, \dots$  — показатель степенного ряда. В качестве первого члена ряда, исходного для группирования экспериментальных значений линейных размеров блоков  $\Delta_p$  (таблица), выбрано значение  $\Delta \approx 119$  см фундаментального канонического ряда геоблоков, сопряженного по фактору  $(\sqrt{2})^i$  с диаметром “жидкого” ядра Земли  $d_0 \approx 2500$  км [44] и соответствующего каноническому спуску до наибольшего значения экспериментального размера блока  $\Delta_s$  из диапазона значений линейных размеров блоков, представленных на рис. 5, по руде, породам разлома и суммарно. По этим данным выбирались упорядоченные численные значения  $\Delta_s$ , практически совпадающие с  $\Delta_p$ , и по разности между  $\Delta_p$  и  $\Delta_s$  определялась погрешность (в %). Выделенные таким образом ряды приведены в столбцах 3–11 таблицы. Погрешность вычислялась как  $(|\Delta_p - \Delta_s| \cdot 100 / \Delta_p)$ .

Из таблицы следует, что если в качестве допустимого принять 10 %-й разброс исходных данных (см. рис. 5) от соответствующих представителей канонического ряда (см. столбцы 4, 7 и 10), то оказывается, что более 61% общей выборки анализируемых значений (по

столбцам — 70.8, 61.3 и 66.8%) становятся “неотличимыми” от членов фундаментального канонического ряда геоблоков, ассоциированного с диаметром “жидкого” ядра Земли, а при 12.5%-м разбросе — почти 82% (по столбцам 5, 8 и 11 — соответственно 97.7, 92.8 и 81.7%). На рис. 6 показан пример результирующей гистограммы распределения выделенных значений линейных размеров блоков рудного тела, пород разлома и суммарно в канонической шкале иерархических представлений [34, 43].

Результаты группирования выделенных значений линейных размеров блоков по данным измерений в рудном теле, породах разлома и суммарно согласно фундаментальному каноническому ряду геоблоков

№ п/п	Расчетное значение $\Delta_p$ , см	Количество блоков $\Delta_p$ , шт., выделяемых в заданном диапазоне группирования относительно $\Delta_p$ , %								
		по рудному телу			по породам разлома			в целом по массиву		
		7.5	10	12.5	7.5	10	12.5	7.5	10	12.5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	119	9	10	14	—	—	—	9	14	14
2	84.3	13	14	21	4	5	8	17	17	27
3	59.6	28	36	56	6	8	15	31	44	61
4	42.1	54	76	108	14	15	28	68	91	121
5	29.8	65	96	138	20	27	39	85	123	158
6	21.1	109	125	173	18	26	39	127	151	212
7	14.9	87	127	196	22	31	48	109	125	190
8	10.5	80	169	169	17	45	45	97	214	214
9	7.45	121	121	213	18	18	45	139	139	139
10	5.27	53	53	53	4	4	4	57	57	57
Суммарно		619	827	1141	123	179	271	739	975	1193

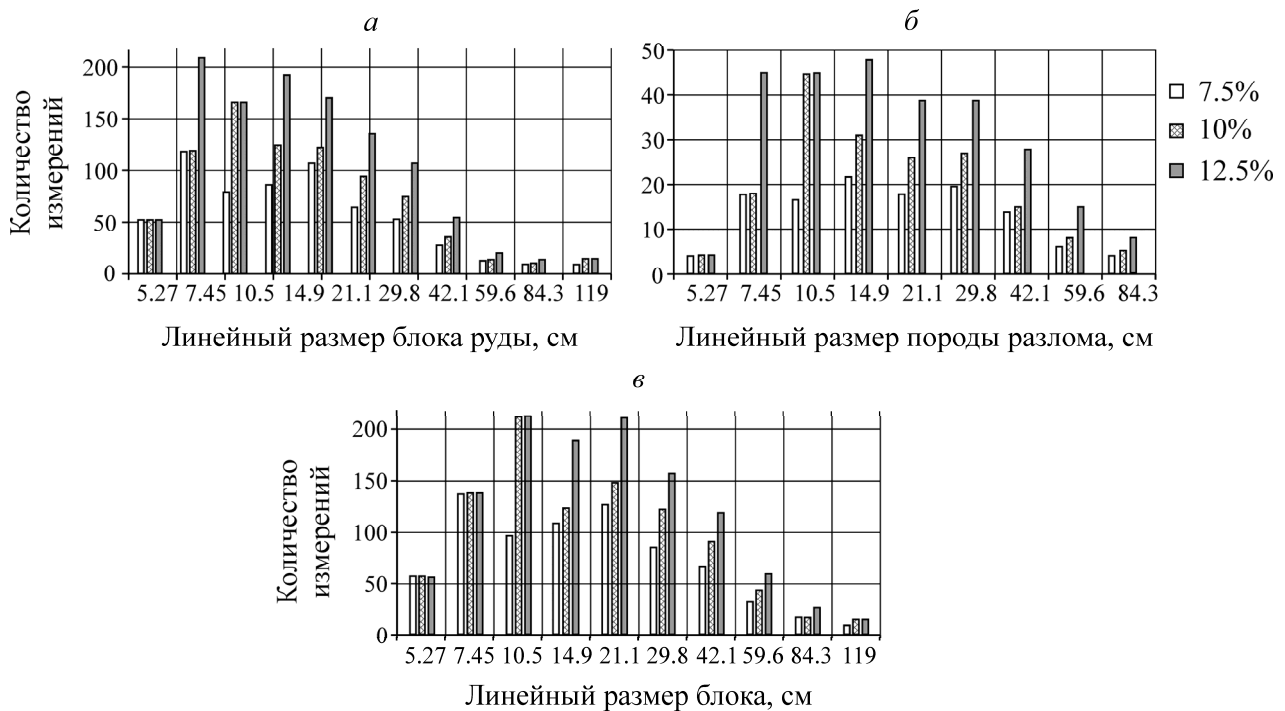


Рис. 6. Гистограммы распределения линейных размеров блоков в канонической шкале в доверительных интервалах 7.5, 10 и 12.5% согласно данным измерений: а — в рудном теле; б — в породах разлома; в — суммарно

Таким образом, выделялись числовые ряды, экспериментальные значения которых за редким исключением (главным образом в области малых значений, где точность измерений снижается) с приемлемой точностью совпадали с расчетными каноническими. Как показывает анализ приведенных табличных данных, массив экспериментальных замеров (1456 значений по рис. 5в) линейных размеров блоков распадается на существенно меньшее число (10) их подмножеств с внутренней канонической соподчиненностью по фактору  $(\sqrt{2})^i$ , сводясь к фундаментальному каноническому ряду геоблоков, где каждый член может отличаться от других лишь частотой встречаемости для контролируемого геобъекта. Здесь следует иметь в виду, что относительное расстояние между смежными представителями фундаментального канонического ряда геоблоков оценивается в  $\sim 41.4\%$  и, следовательно, критическим является 20%-й разброс “экспериментальных” данных. В этом случае канонические ряды (фактор-группы по старшим членам) являются практически непересекающимися или “независимыми”.

Итак, весь иерархический ряд структурных отдельностей по руде, породам разлома и суммарно в принятом диапазоне измерений, согласно рис. 6, сводится к 10 каноническим представителям с характерными линейными размерами, отмеченными по оси абсцисс (в диапазоне от  $\sim 5$  до 120 см). Наиболее ярко выражены структурные блоки с размерами от  $\sim 5$  до 42 см.

#### **4. ЭВОЛЮЦИЯ ДИНАМИКО-КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ ОТ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ЭНЕРГИЕЙ В ОКРЕСТНОСТИ ЗОНЫ РАЗЛОМА МРАМОРНОГО КАРЬЕРА**

Эксперименты по определению особенностей эволюции динамико-кинематических характеристик распространения упругих волновых пакетов, но уже в “слабонапряженных” геосредах проведены в мраморном карьере Шипуновского месторождения известняков Новосибирской области, пересекаемого зоной карстовых воронок. Горно-геологические условия разработки карьера “Искитимский” подробно отражены в работе [34], посвященной влиянию массового технологического взрыва в карьере строительного камня на особенности формирования спектрального состава сейсмических волновых пакетов в привязке к структурной блочности массивов горных пород.

На рис. 7 представлен план Шипуновского месторождения известняков с обзорным видом мраморного карьера, а также схема расстановки сейсмоприемников в эксперименте с использованием источников импульсных воздействий изменяющейся энергии при изучении динамико-кинематических характеристик излучаемых сейсмических волн.

**Схема эксперимента.** Для экспериментов в массиве южной части мраморного карьера выбрана его западная сторона, пересекаемая карстовым разломом с зоной повышенной трещиноватости (см. рис. 7б, в). На развитие трещин мраморизованных известняков определяющее влияние оказывают сезонные перепады температуры и карстовые воронки, заполненные в основном глиной и суглинками с примесью супеси. Добыча мрамора осуществлялась выпиливанием блоков из массива уступами при помощи баровой машины. Наличие уступов по борту карьера позволяет исследовать влияние энергии удара на скорость распространения упругих волн по разным направлениям в выбранных точках импульсных воздействий.

Эксперименты проводились на горизонтально расположенном уступе нижнего ряда блоков отработанной части массива на отметке гор.  $-210$  м (см. рис. 7в, г). Грунт карстовых включений в зоне разлома талый, достаточно влажный. Температура воздуха составляла  $5^{\circ}\text{C}$ . Порода блоков — мраморизованный мелкозернистый известняк средней устойчивости. Отмечаются секущие жилки белого и темно-серого цвета, характерные для мрамора. Трещиноватость по плоскостям блоков крупно- и среднеблочная.

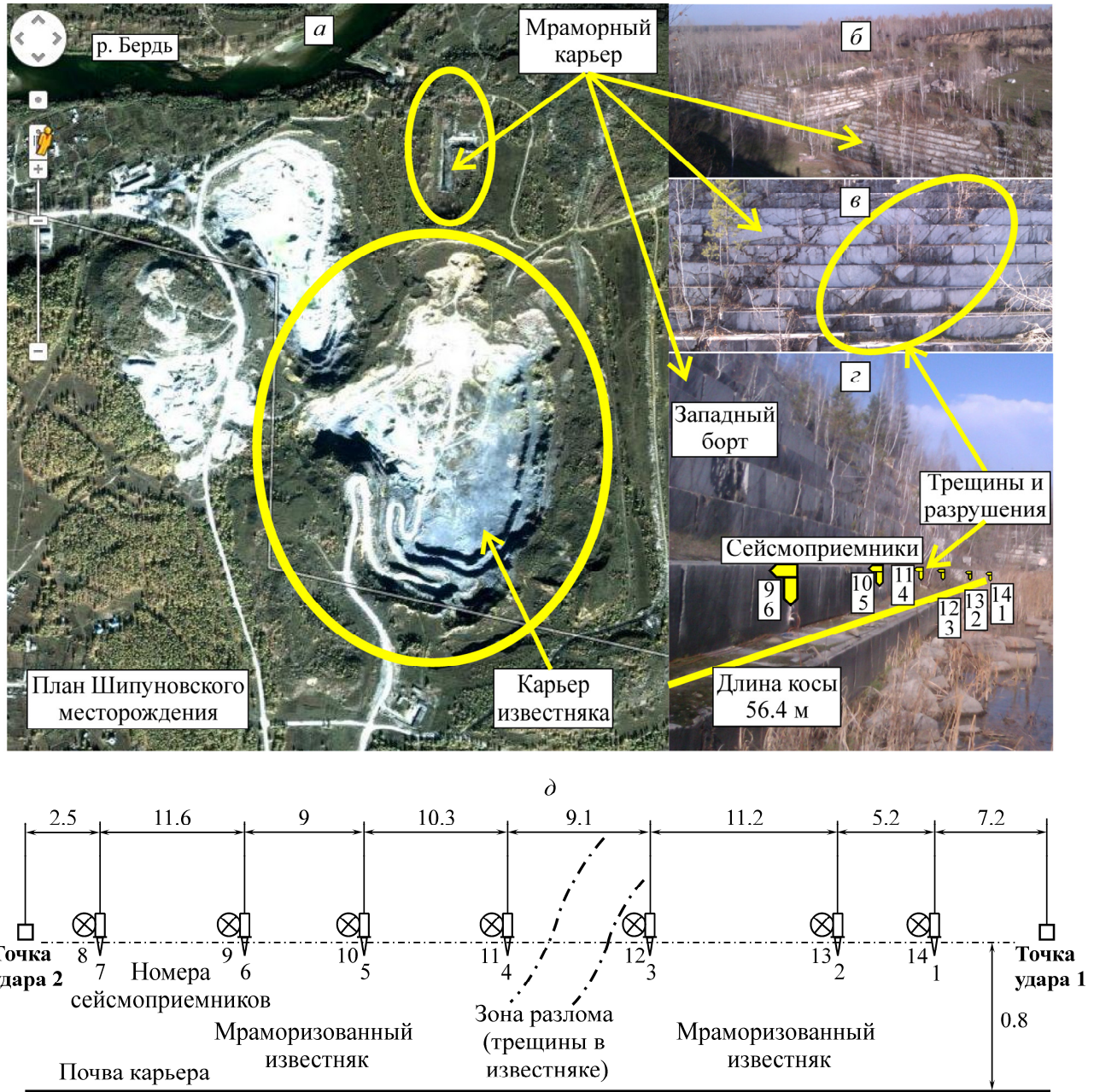


Рис. 7. План Шипуновского месторождения известняков (а), обзорный вид мраморного карьера (б), вид уступов с зонами трещин и карстовых разрушений борта (в), расстановка сейсмоприемников на местности по нижнему уступу западного борта (г), схема расстановки сейсмоприемников по вертикальной стенке уступа с указанием расстояний (в м), положения разлома и мест нанесения ударов бойком (д)

На рис. 8 показано распределение линейных размеров структурных блоков в контролируемом массиве горных пород согласно [34]. Из сравнения рис. 6 и 8 следует, что модальные значения соответствующих распределений структурных блоков на экспериментальных участках рудника Таштагольский и карьера Искитимский различаются примерно в 2 раза (соответственно ~ 10 см против ~ 5 см). В такой же мере различаются и диапазоны “проявленных” линейных размеров структурных блоков сравниваемых породных массивов.

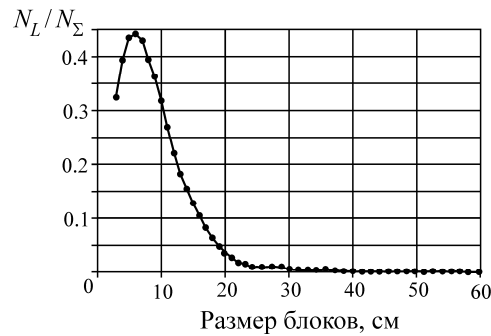


Рис. 8. Распределение линейных размеров блоков в массиве известняка по данным лазерного сканирования:  $N_\Sigma$  — общее количество измеренных блоков;  $N_L$  — количество блоков, имеющее данный линейный размер [34]

Для определения кинематических характеристик распространения упругих волновых пакетов в блочной среде для данных условий проведены эксперименты по регистрации импульсных воздействий по борту карьера, возбуждаемых ударами с энергиями 1.7 и 34 Дж. Запись сейсмических сигналов выполнялась сейсмостанцией “Лакколит 24-М” с использованием сейсмоприемников GS20-DX, установленных попарно по борту карьера в количестве 14 шт. согласно схеме на рис. 7г, д с ориентацией вертикально (ось чувствительности сейсмоприемников 1–7 направлена к почве) и горизонтально (ось чувствительности сейсмоприемников 8–14 направлена перпендикулярно борту) для каждой пары. Принятая ориентация сейсмоприемников позволяла регистрировать “вертикальные” и “горизонтальные” компоненты упругих волновых пакетов в массиве.

Схема установки сейсмоприемников по блокам нижнего уступа западного борта, положение разлома и мест нанесения ударов бойком показаны на рис. 7д. Из 7 пар сейсмоприемников 4 установлены слева от разлома, из них пара 4, 11 — слева от границы с зоной трещиноватости разлома, пара 3, 12 — по породе справа от разлома, пары 2, 13 и 1, 14 размещены на выступе шириной 1 м. Длина сейсмической трассы составила 56.4 м. Сейсмоприемники крепились к скальному массиву с помощью алебастра.

**Возбуждение упругих волновых пакетов** в массиве выполнялось ударами бойка с энергиями 1.7 и 34 Дж по уступам борта карьера с противоположных от трассы сейсмоприемников сторон. Удары производились в горизонтальном направлении в двух точках по нижнему уступу западного борта карьера (см. рис. 7д): **точка 1** выбрана на расстоянии 7.2 м справа от пары сейсмоприемников 1, 14; **точка 2** — на расстоянии 2.5 м слева от пары сейсмоприемников 7, 8. Разлом расположен на расстоянии ~ 30 м слева от точки ударов 1 и на расстоянии ~ 34 м справа от точки ударов 2. Ширина разлома (зона трещин) не превышала ~ 1.8 м. Для оценки стабильности каждый удар при заданной энергии повторялся 10 раз.

Кинематические параметры волновых пакетов определялись по годографам первых вступлений и интервалам времени распространения сейсмических волн вдоль трассы измерений до выбранных точек крепления сейсмоприемников по нижнему уступу борта (рис. 7г, д). Согласно [34], средняя скорость распространения продольных волн в массиве мраморизованных известняков оценивалась ~ 4 км/с.

**Анализ экспериментальных данных.** Для оценки изменений динамико-кинематических характеристик упругих волновых пакетов, возбуждаемых с противоположных от разлома сторон, проведено сравнение представленных на рис. 9, 10 записей сейсмических сигналов, зарегистрированных при импульсных воздействиях с энергией 34 и 1.7 Дж в точках ударов 1 и 2 борта карьера. Записи масштабированы по каждому каналу с указанием модуля максимальной амплитуды скорости колебаний. Годографы определены по первым вступлениям волны и показаны наклонными линиями.

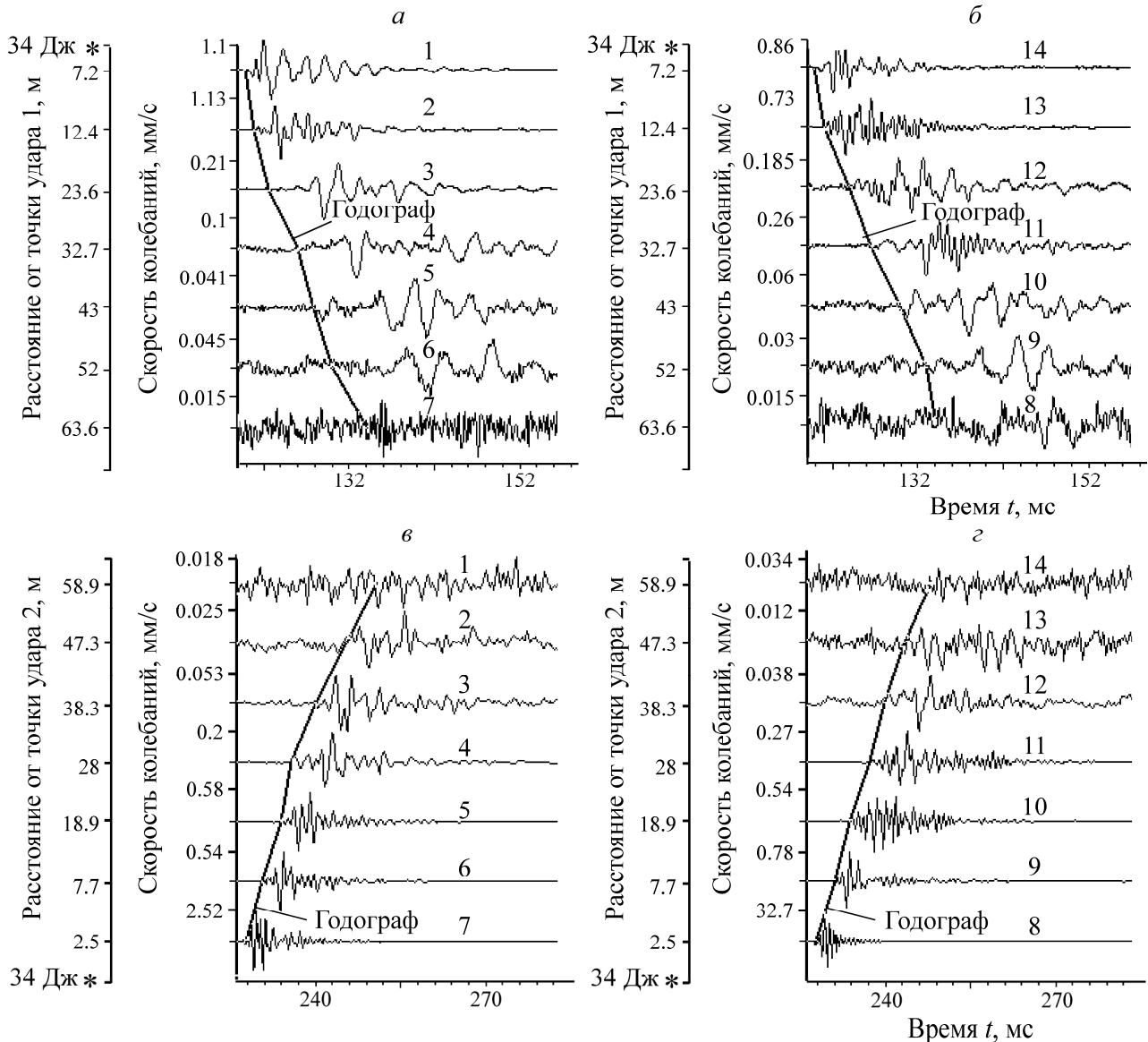


Рис. 9. Записи сейсмических сигналов, зарегистрированных в карьере Искитимский сейсмоприемниками 1–7 и 8–14 при ударах с энергией 34 Дж в точках 1 (а, б) и 2 (в, з). Номера сейсмоприемников указаны на записях. \* обозначает место удара на шкале расстояний

Анализ записей сигналов показал, что первые вступления упругих волновых пакетов для сейсмоприемников вертикальной ориентации могут регистрироваться по времени несколько раньше (например, на 0.1–0.2 мс), чем для горизонтальной. Поскольку удары производились в фиксированных местах и варьировались по энергии, записи сигналов позволили установить, что скорость распространения упругого волнового пакета существенно зависит от энергии удара.

На записях сигналов от ударов бойком в точке 2 с левой стороны от разлома (см. рис. 9в) отмечено значительное (практически в 4 раза) снижение амплитуды сигнала между измерительными каналами 4–3. Скачок амплитуды обусловлен наличием зоны разлома с повышенной трещиноватостью, когда сигнал существенно затухает. Подтверждением того, что причиной затухания служит зона разлома, является сейсмограмма записи удара с правой от разлома стороны (см. рис. 9а), где зафиксировано двукратное ослабление сигнала по каналам 3 и 4.

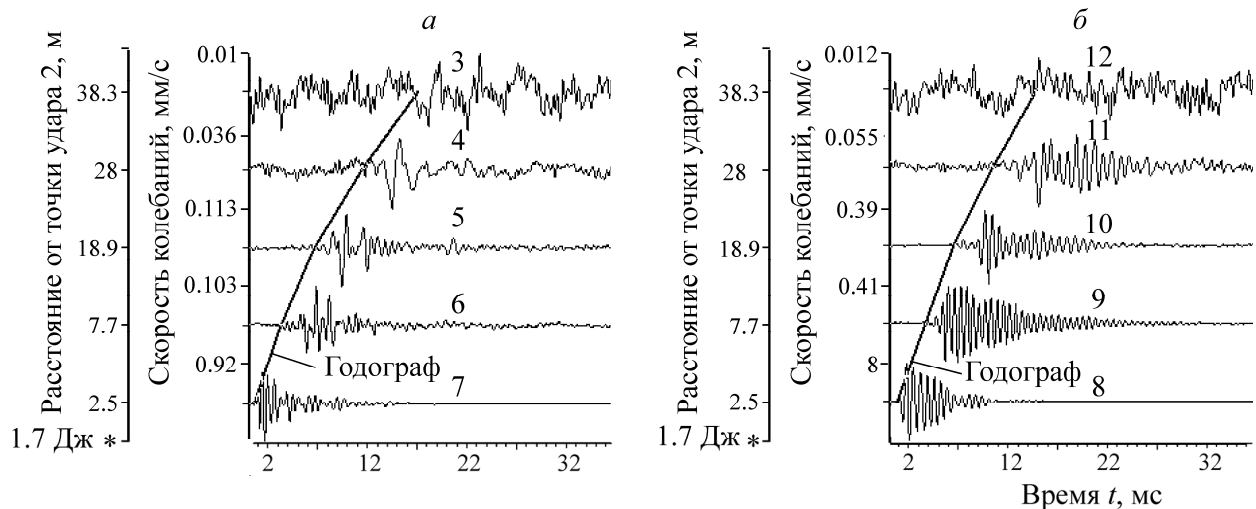


Рис. 10. Записи сейсмических сигналов, зарегистрированных в карьере Искитимский сейсмоприемниками 3 – 7 (а) и 8 – 12 (б) при ударах с энергией 1.7 Дж в точке 2

Независимо от места нанесения удара, по мере распространения упругого волнового пакета в массиве с удалением от разлома его амплитуда затухает и по каналам 7, 8 (см. рис. 9а, б) и 1, 14 (рис. 9в, г) практически слабо выделяется на уровне шумов. При этом степень затухания в монолитной части массива существенно меньше, чем в разломной зоне.

**Сравнение зарегистрированных сейсмических сигналов показывает, что просвечиваемая геосреда по-разному пропускает волновые импульсы в прямом и обратном направлении в пределах исследуемого участка массива.** Так, при ударе бойком в точке 1 (справа от трассы измерений) волновой импульс затухает сильнее, чем в обратном направлении, поэтому по каналам 13, 14 и 1, 2 он регистрируется практически на уровне шумов (амплитуда сигнала на рис. 9а соответствует уровню шумов по каналу 1 — вертикальная компонента, и практически не выделяется на фоне шумов по каналу 14 — горизонтальная компонента). При такой же энергии удара, но справа от сейсмической трассы (см. рис. 9б) волновой импульс затухает в меньшей степени — сигнал регистрируется по всем каналам, при этом по каналам 7 и 8 — с превышением над уровнем шумов не более чем в 1.2–1.4 раза.

Из приведенного следует, что изучаемая геосреда обладает, в определенном смысле, **“сейсмо-полупроводниковыми свойствами”** — по характеру пропускания ею упругих волновых пакетов в зависимости от структуры и напряженно-деформированного состояния при перемене мест расположения источников излучения относительно просвечиваемого массива пород.

На графиках амплитудно-частотных спектров упругих волновых пакетов, распространяющихся в противоположных направлениях по зоне разлома в карьере, полученных по записям каналов 4 и 3 при ударе бойком с энергией удара 34 Дж слева и, соответственно, по записям каналов 3 и 4 при ударе бойком с такой же энергией справа от разлома можно видеть снижение максимумов амплитуды высокочастотной составляющей спектра и увеличение амплитуды низкочастотной составляющей (см. рис. 11а, б).

Видно, что при ударах с противоположных от разлома сторон в спектрах сейсмических волн наблюдается существенное различие. При ударе слева от сейсмической трассы спектр сигналов по каналам 4 и 3 (рис. 11а) имеет ярко выраженный многопиковый характер, при ударе справа спектр сигналов по каналам 3 и 4 (рис. 11б) имеет “монопиковый” характер со смещением в низкочастотную область. Это также свидетельствует о “несимметричности” акустической реакции контролируемого участка породного массива при возбуждении сейсмических сигналов слева и справа от контролируемого разлома.



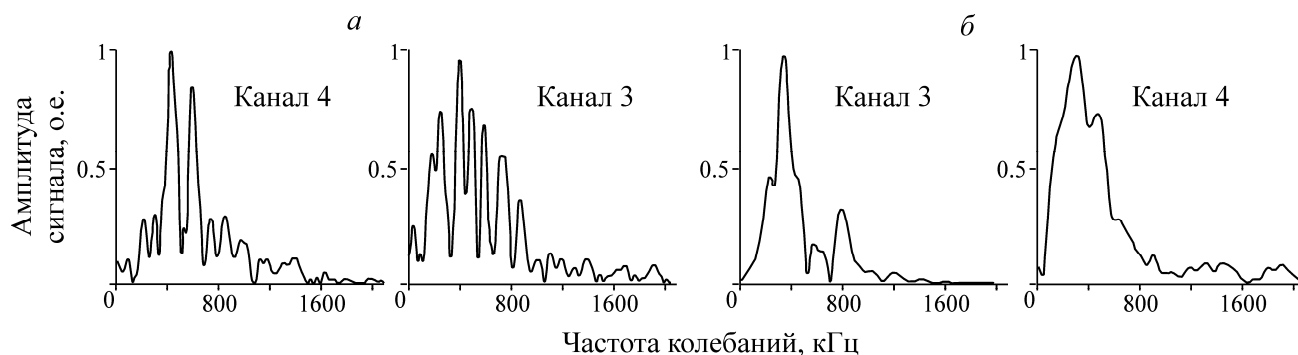


Рис. 11. Спектры сигналов при ударах бойком с энергией 34 Дж в точке удара 2 слева (а) и в точке удара 1 справа (б) от разлома; по амплитуде нормализованы к их максимальному значению

**Сравнение годографов сейсмических волн для импульсных источников разных энергий карьера Искитимский и рудника Таштагольский.** Для количественной оценки изменений кинематических характеристик упругих волновых пакетов, возбуждаемых в контролируемом массиве пород карьера Искитимский импульсными воздействиями с энергиями 1.7 и 34 Дж при горизонтальных ударах по борту, на рис. 12 построены годографы первых вступлений соответствующих записей сейсмических сигналов (см. рис. 9, 10), зарегистрированные сейсмоприемниками 1–7 и 8–14. Удар по борту карьера с энергией 1.7 Дж в точке 1 не зафиксирован.

Так как удары по борту карьера производились без согласующего устройства в точке удара, в карьере Искитимский, как и на руднике Таштагольский, при контакте бойка с породой происходило образование “наклепа” и трещин; при повторении ударов могли отделяться осколки пород, влияя на “эффективность” возбуждения упругих волновых пакетов, что отражалось на качестве и стабильности регистрируемых сигналов.

Из приведенных годографов следует, что с увеличением энергии удара время вступления соответствующего волнового пакета на сравниваемых интервалах уменьшается. При ударах с энергией 1.7 Дж вступление волны по годографу происходит позже (7 мс на интервале 20 м), а при ударах с энергией 34 Дж — раньше (5–5.5 мс на том же интервале). Такая особенность просматривается на записях сейсмоприемников как “вертикальной”, так и “горизонтальной” поляризации. Примечательно, что первое вступление горизонтальной компоненты упругого волнового пакета на одинаковых интервалах измерений регистрируется по времени несколько раньше, чем вертикальной. Время вступления упругой волны увеличивается при уменьшении энергии удара. **Наименьший разброс времен первых вступлений в процентном отношении дают удары бойком с энергией 34 Дж.**

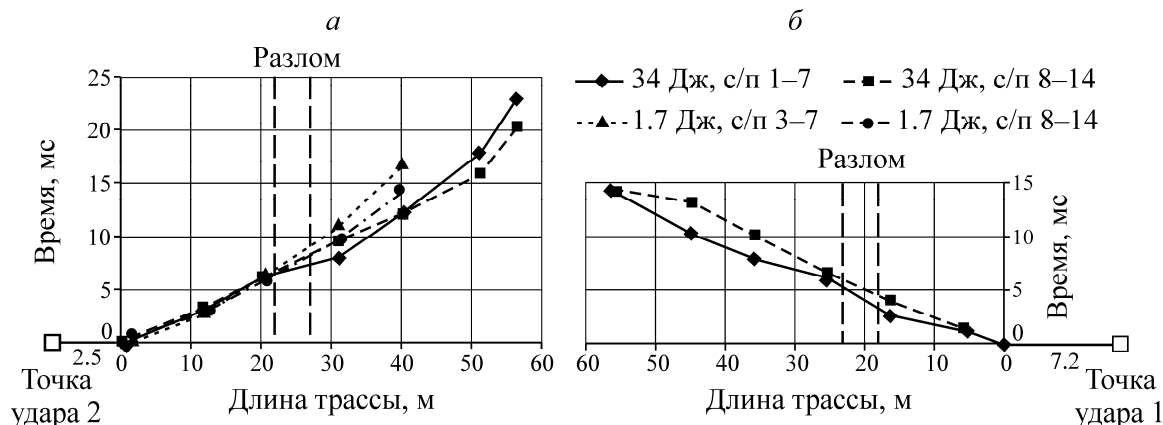


Рис. 12. Годографы первых вступлений сейсмических сигналов, зарегистрированных в карьере Искитимский при ударах с энергией 34 и 1.7 Дж в точке 2 (а) и 34 Дж в точке 1 (б)



Таким образом, эксперименты в условиях мраморного карьера Искитимский подтверждают основные выводы об особенностях эволюции динамико-кинематических характеристик упругих волновых пакетов, индуцируемых импульсными источниками с изменяющимся уровнем передаваемой в массив горных пород кинетической энергии. Здесь также наблюдается асимметричная картина изменения упругих волновых полей при перемене мест источников излучения относительно просвечиваемой ими разломной зоны контролируемого породного массива.

Для оценки изменений динамико-кинематических характеристик упругих волновых пакетов, возбуждаемых с противоположных от разлома сторон в разных условиях (карьера и рудника), на рис. 13, 14 приведены записи исходных сейсмических сигналов, зарегистрированных при импульсных воздействиях с энергией 34 и 1.7 Дж в точках ударов 1 и 2 борта подземной выработки рудника Таштагольский. Записи масштабированы по каждому каналу с указанием модуля максимальной амплитуды скорости колебаний. Годографы определены по первым вступлениям упругой волны и показаны наклонными линиями.

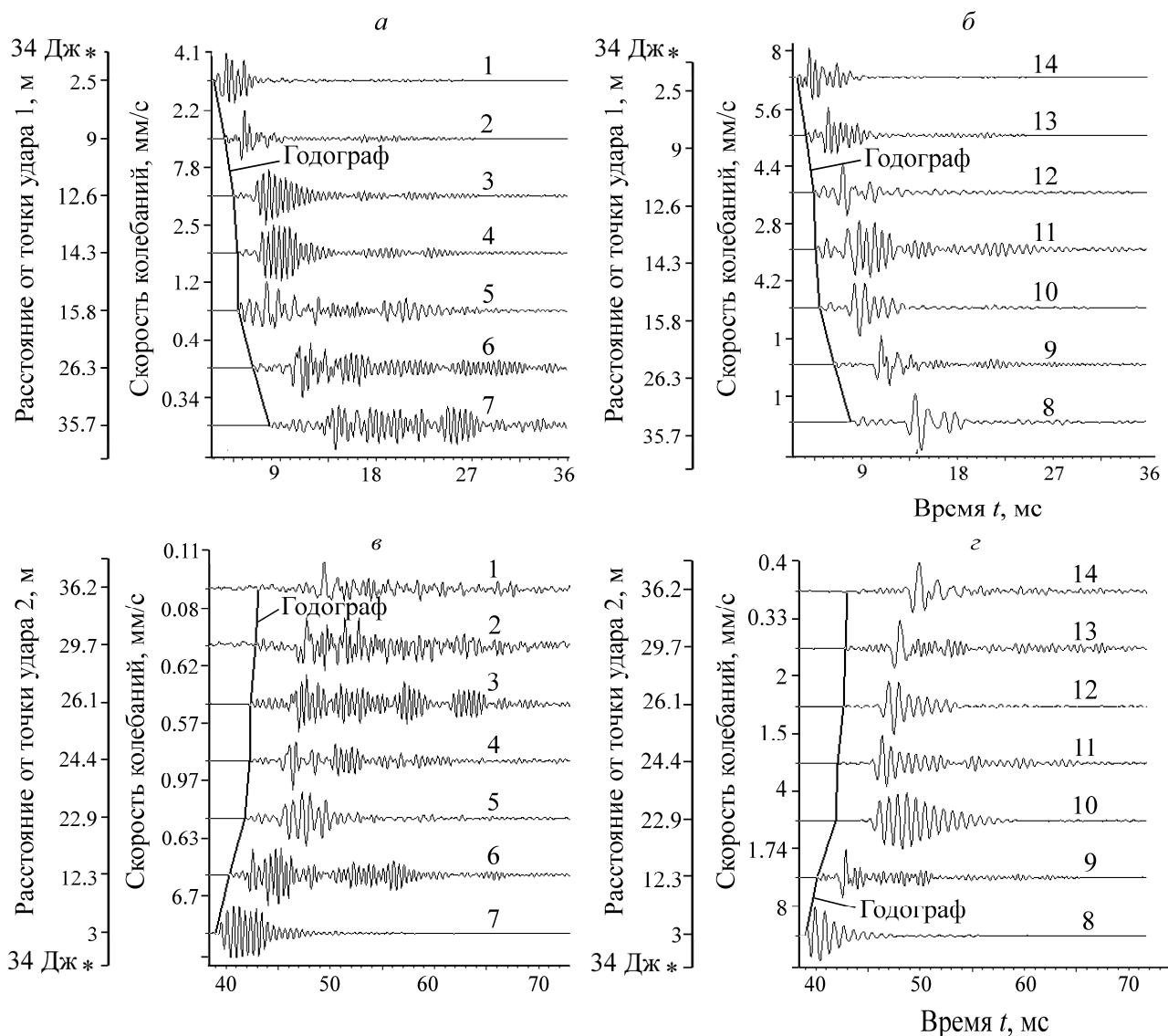


Рис. 13. Записи сейсмических сигналов, зарегистрированных в руднике Таштагольский сейсмоприемниками 1 – 7 и 8 – 14 при ударах с энергией 34 Дж в точках 1 (*a*, *б*) и 2 (*в*, *г*). Номера сейсмоприемников указаны на записях. \* обозначает место удара на шкале расстояний

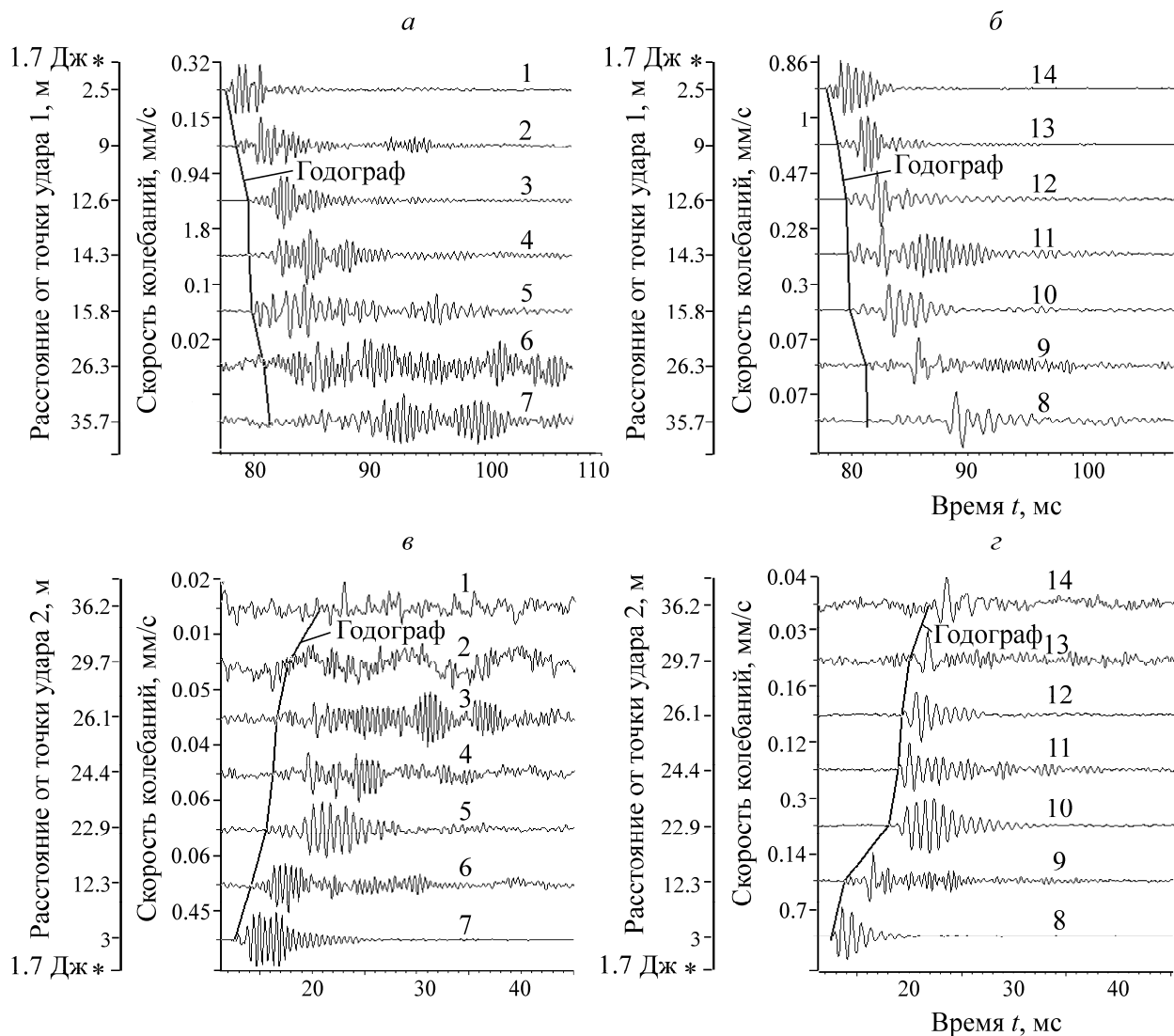


Рис. 14. Записи сейсмических сигналов, зарегистрированных в руднике Таштагольский сейсмоприемниками 1 – 7 и 8 – 14 при ударах с энергией 1.7 Дж в точках 1 (а, б) и 2 (в, г). Номера сейсмоприемников указаны на записях. \* обозначает место удара на шкале расстояний

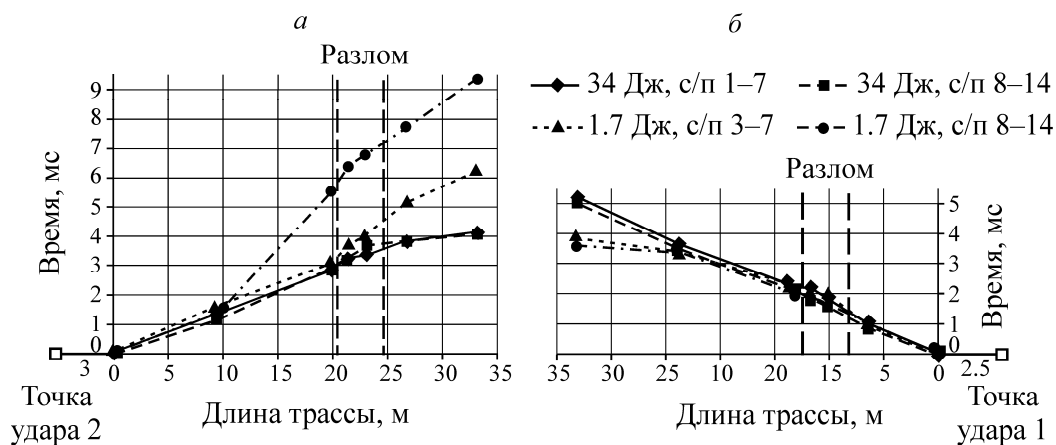


Рис. 15. Годографы первых вступлений сейсмических сигналов, зарегистрированных в руднике Таштагольский при ударах с энергией 34 и 1.7 Дж в точках 2 (а) и 1 (б)

Для количественной оценки изменений кинематических характеристик упругих волновых пакетов, возбуждаемых в контролируемом массиве пород рудника Таштагольский импульсными воздействиями с энергиями 1.7 и 34 Дж при горизонтальных ударах по борту, на рис. 15 построены годографы первых вступлений соответствующих записей сейсмических сигналов (см. рис. 13, 14), зарегистрированные сейсмоприемниками 1 – 7 и 8 – 14.

Как видно на годографах для породных массивов Искитимского карьера и Таштагольского рудника, соответствующие *первые вступления регистрируемых сейсмоприемниками вертикальной и горизонтальной компонент упругих волновых пакетов при одинаковых энергиях удара по времени разнятся незначительно.*

## ВЫВОДЫ

Проведенные экспериментальные исследования и теоретический анализ эволюции динамико-кинематических характеристик упругих волновых пакетов при их распространении в массивах руд и скальных пород с зонами тектонических разломов от импульсных источников с изменяющимся уровнем передаваемой кинетической энергии позволяют заключить:

1) происходит монотонное изменение скорости и немонотонное изменение амплитудно-частотного спектра сейсмических волн как с удалением от источника излучения, так и от уровня кинетической энергии последнего;

2) отмечается качественное соответствие характера изменения скоростных характеристик упругих волновых пакетов от кинетической энергии импульсного источника их возбуждения тому, что описывается кинематическим выражением В. Н. Опарина для нелинейных упругих волн маятникового типа;

3) нарушается известный в сейсморазведке геометрический “принцип взаимности”, согласно которому время распространения монотипных сейсмических волн из одной точки породного массива в другую не должно изменяться, если поменять местами источник и приемник сейсмических волн.

Среди причин несоблюдения “принципа взаимности” в сейсмических измерениях главной, по-видимому, является нарушение условия совместности деформаций по принципу Сен-Венана в напряженных геосредах, обладающих блочно-иерархическим строением. При выводе кинематического выражения для волн маятникового типа это обстоятельство стало основополагающим.

Авторы выражают благодарность специалистам Таштагольского рудника ОАО “Евразруда” В. К. Климов, В. А. Штирцу, Искитимского карьера ОАО “Новосибирское карьероуправление” В. Н. Кабанцу, Н. Н. Пороховскому за помощь в организации работ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа  $V_{\mu}$  // ДАН. — 1993. — Т. 333. — № 4.
2. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. Волны маятникового типа. Ч. I. Состояние вопроса и измерительно-вычислительный комплекс // ФТПРПИ. — 1996. — № 3.
3. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. Волны маятникового типа. Ч. II. Методика экспериментов и основные результаты физического моделирования // ФТПРПИ. — 1996. — № 5.
4. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. Волны маятникового типа. Ч. III. Данные натуральных измерений // ФТПРПИ. — 1996. — № 5.
5. Курленя М. В., Опарин В. Н. Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. II // ФТПРПИ. — 2000. — № 4.
6. Опарин В. Н., Симонов Б. Ф. О нелинейных деформационно-волновых процессах в виброволновых геотехнологиях освоения нефтегазовых месторождений // ФТПРПИ. — 2010. — № 2.

7. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления закономерностей реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. I // ФТПРПИ. — 2012. — № 2.
8. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления закономерностей реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. II // ФТПРПИ. — 2013. — № 2.
9. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления закономерностей реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. III // ФТПРПИ. — 2014. — № 4.
10. Александрова Н. И. О распространении упругих волн в блочной среде при импульсном нагружении // ФТПРПИ. — 2003. — № 6.
11. Александрова Н. И., Шер Е. Н. Моделирование процесса распространения волн в блочных средах // ФТПРПИ. — 2004. — № 6.
12. Александрова Н. И., Черников А. Г., Шер Е. Н. Экспериментальная проверка одномерной расчетной модели распространения волн в блочной среде // ФТПРПИ. — 2005. — № 3.
13. Александрова Н. И., Черников А. Г., Шер Е. Н. О затухании маятниковых волн в блочном массиве горных пород // ФТПРПИ. — 2006. — № 5.
14. Шер Е. Н., Александрова Н. И., Айзенберг-Степаненко М. В., Черников А. Г. Влияние иерархической структуры блочных горных пород на особенности распространения сейсмических волн // ФТПРПИ. — 2007. — № 6.
15. Александрова Н. И., Шер Е. Н., Черников А. Г. Влияние вязкости прослоек на распространение низкочастотных маятниковых волн в блочных иерархических средах // ФТПРПИ. — 2008. — № 3.
16. Александрова Н. И., Айзенберг-Степаненко М. В., Шер Е. Н. Моделирование распространения упругих волн в блочной среде при импульсном нагружении // ФТПРПИ. — 2009. — № 5.
17. Александрова Н. И., Шер Е. Н. Распространение волн в двумерной периодической модели блочной среды. Ч. I. Особенности волнового поля при действии импульсного источника // ФТПРПИ. — 2010. — № 6.
18. Сарайкин В. А. Расчет волн, распространяющихся в двумерной сборке из прямоугольных блоков // ФТПРПИ. — 2008. — № 4.
19. Сарайкин В. А. Учет упругих свойств блоков в низкочастотной составляющей волны возмущений, распространяющейся в двумерной среде // ФТПРПИ. — 2009. — № 3.
20. Садовский В. М., Садовская О. В., Варьгина М. И. Математическое моделирование волн маятникового типа с применением высокопроизводительных вычислений // Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах: труды 2-й Рос.-Кит. науч. конф., 2–5 июля 2012 г., Новосибирск. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.
21. Опарин В. Н., Симонов Б. Ф., Юшкин В. Ф., Востриков В. И., Погарский Ю. В., Назаров Л. А. Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях. — Новосибирск: Наука, 2010.
22. Курленя М. В., Опарин В. Н. О явлении закономерностей реакции горных пород на динамические воздействия // ФТПРПИ. — 1990. — № 4.
23. Курленя М. В., Опарин В. Н., Ревуженко А. Ф., Шемякин Е. И. О некоторых особенностях реакции горных пород на взрывные воздействия в ближней зоне // ДАН. — 1987. — Т. 293. — № 1.
24. Опарин В. Н., Аннин Б. Д., Чугуй Ю. В. и др. Методы и измерительные приборы для моделирования и натурных исследований нелинейных деформационно-волновых процессов в блочных массивах горных пород. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007.
25. Гурвич И. И. Сейсмическая разведка. — М.: Недра, 1970.
26. Гурвич И. И., Боганик И. И. Сейсмическая разведка. — М.: Недра, 1980.
27. Сейсморазведка. Справочник геофизика / под ред. И. И. Гурвича, В. П. Номоконова. — М.: Недра, 1981.

28. Пузырев Н. Н. Методы сейсмических исследований. — Новосибирск: Наука, 1992.
29. Опарин В. Н. Энергетический критерий объемного расширения горных пород: труды науч. семинара “Неделя горняка – 2009”. — М.: МГГУ, 2009.
30. Mendecki A. J. Keynote adress: data-driven understanding of seismic rock mass response to mining, Dynamic Rock Mass Response to Mining – The Fifth International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines (RaSiM<sub>5</sub>), 17 – 20 Sept. 2001 (Tecnico. Eds. Dr G. Van Aswegen, Dr R. J. Durrheim, W. D. Orflepp), SAIMM, Johannesburg, 2001.
31. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. Об одном подходе к прогнозированию горных ударов // ФТПРПИ. — 1998. — № 6.
32. Опарин В.Н., Акинин А. А., Востриков В. И., Юшкин В. Ф. Нелинейные деформационные процессы в окрестности выработок. Ч. I // ФТПРПИ. — 2003. — № 4.
33. Опарин В.Н., Акинин А. А., Востриков В. И., Юшкин В. Ф., Аршавский В. В., Тапсиев А. П., Самородов Б. Н., Вильчинский В. Б. Нелинейные деформационные процессы в окрестности выработок. Ч. II // ФТПРПИ. — 2003. — № 6.
34. Опарин В.Н., Юшкин В.Ф., Пороховский Н.Н., Гришин А.Н., Кулинич Н.А., Рублев Д.Е., Юшкин А.В. О влиянии массового взрыва в карьере строительного камня на формирование спектра сейсмических волн // ФТПРПИ. — 2014. — № 5.
35. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях Горной Шории, склонных к горным ударам. — Новокузнецк: ВостНИГРИ – ВНИМИ, 1991.
36. Шрепп Б. В., Мозолов А. В., Бояркин В. И. и др. Напряженно-деформированное состояние массива в зоне очистной выемки // Горн. журн. — 1979. — № 12.
37. Юшкин В. Ф., Климко В. К., Чиглинцев В. А., Штирц В. А., Рублев Д. Е. Формирование кровли подземной камеры рудника “Таштагольский” после массового взрыва: труды XX Всерос. конф. с участием иностр. ученых “Геодинамика и напряженное состояние недр Земли”. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2013.
38. Программа управления станцией сейсморазведочной инженерной цифровой “Лакколит 24-М”: руководство оператора. — М.: ООО “Логис”, 2005.
39. Орлов В. А., Панов С. В., Парушкин М. Д., Фомин Ю. Н., Шер Е. Н., Юшкин В. Ф. Экспериментальное изучение упругих волн в “одномерной” блочной среде с использованием высокочувствительных лазерных измерений: труды Всерос. конф. с участием иностр. ученых “Геодинамика и напряженное состояние недр Земли”. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2011. — Т. 1.
40. Трубецкой К. Н., Опарин В. Н., Чанышев А. И., Шер Е. Н., Юшкин В. Ф. и др. Развитие ресурсосберегающих и ресурсовоспроизводящих геотехнологий комплексного освоения месторождений полезных ископаемых. — М.: ИПКОН РАН, 2012.
41. Опарин В. Н., Середович В. А., Юшкин В. Ф., Прокопьева С. А., Иванов А. В. Формирование объемной цифровой модели поверхности борта карьера методом лазерного сканирования // ФТПРПИ. — 2007. — № 5.
42. Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Розенбаум М. А. и др. Зональная дезинтеграция горных пород и устойчивость подземных выработок. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
43. Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Акинин А. А., Балмашнова Е. Г. О новой шкале структурно-иерархических представлений как паспортной характеристике объектов геосреды // ФТПРПИ. — 1998. — № 5.
44. Опарин В. Н., Курленя М. В. О скоростном разрезе Земли по Гутенбергу и возможном его геомеханическом объяснении. Ч. I. Зональная геодезинтеграция и иерархически ряд геоблоков // ФТПРПИ. — 1994. — № 2.