

# III. ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

УДК 550.341

## О КОНЦЕПЦИИ МНОГОДИСЦИПЛИНАРНОГО ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРЕДВЕСТНИКА

А.С. Алексеев, А.С. Белоносов, В.Е. Петренко

Институт вычислительной математики и математической геофизики,  
Сибирское Отделение Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Разработана физико-математическая модель и подходы к измерению интегрального предвестника землетрясений, предложенного ранее в виде теоретической схемы. Эта модель, по-видимому, сможет снизить остроту противоречий, возникающих между предвестниками различной природы при использовании комплексной модели прогноза времени и места землетрясения. Дается обоснование выбора в качестве такого интегрального предвестника пространственно-временной плотности трещин в области подготовки очага землетрясения и в зоне проявления аномальных геофизических полей. Показана возможность образования приповерхностных мигрирующих дилатантных, в частности, поднимающихся зон, которые могут вызывать вариации геофизических полей-предвестников. Эта концепция открывает новые возможности для определения интегрального предвестника землетрясений. Предлагаются схемы количественной оценки интегрального предвестника, основанные на решении сейсмических и комплексных обратных задач для трещиноватых сред.

## A CONCEPT OF MULTIDISCIPLINARY EARTHQUAKE PREDICTION BASED ON AN INTEGRAL PRECURSOR

A. S. Alekseev, A. S. Belonosov, V. E. Petrenko

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

A physical-mathematical model and approaches to the measurement of the integral earthquake precursor proposed previously in the form of a theoretical scheme are developed. This model can probably reduce the acuteness of contradictions which often take place between precursors of different physical nature when a multidisciplinary model of prediction of the earthquake time and epicentre is used. Reasons for the choice of the space-time density of cracks as an integral earthquake precursor in the area of preparing earthquake source and in the zone of appearance of anomalous geophysical fields are given. The possibility of formation of near-surface migrating dilatant and, in particular, rising zones that can cause variations of geophysical fields-precursors is shown. This conception gives new possibilities to the determination of an integral earthquake precursor. Schemes for quantitative estimation of the integral precursor using seismic and combined (multidisciplinary) inverse problems for fracturous media are proposed.

## Введение

Использование при прогнозе землетрясений предвестников разной геофизической природы вызвано стремлением уменьшить вероятность пропуска крупных землетрясений. Перед такими землетрясениями за несколько лет возникают аномалии целого ряда геофизических полей: поля деформаций земной коры, поля сейсмичности, электрической проводимости и геомагнетизма, гравитики, газо- и флюидопроницаемости. Зоны проявления таких аномалий мигрируют во времени на территории с радиусом 200–300 км от эпицентра будущего землетрясения. Закономерности миграции аномальных зон различной геофизической природы и их взаимосвязь, по-видимому, отражают эволюцию поля сейсмотектонических напряжений и содержат ценную информацию о подготовке очагов землетрясений. Эта многодисциплинарная информация за последние 30 лет собрана в ряде стран (Китай, Япония, США, Греция, Турция, Россия и т.д.). В Китае она имеется для 100 крупных землетрясений ( $M > 6$ ) по достаточно плотной сети наблюдений. Эта информация имеет сейчас форму компьютерных баз данных.

Накопленная информация используется для исследования проблем прогноза землетрясений путем анализа статистических закономерностей повторяемости пространственных и временных характеристик геофизических аномалий разного типа на различных этапах подготовки землетрясений. Китайские геофизики осуществили ряд успешных прогнозов землетрясений с помощью синтезированных информационных индексов изменения типов поведения аномалий на среднесрочной и краткосрочной стадиях подготовки ранее состоявшихся землетрясений [1–3].

Однако использование многодисциплинарной концепции прогноза вместе с наметившимися успехами поставило и новые принципиальные вопросы. Они состоят в определении механизма взаимосвязи процессов сейсмичности с вариациями различных геофизических полей и с источниками аномалий этих полей.

Как отмечают китайские специалисты [2,3], большое число аномалий–предвестников противоречат друг другу, даже если наблюдения относятся к той же самой тектонической области и к той же самой точке наблюдения. У исследователей возникают естественные вопросы: “какой теорией нужно пользоваться, чтобы получить приемлемое объяснение этому феномену?” [3], и “какой метод принятия решений о прогнозе можно сейчас предложить взамен метода простого голосования на основе большого числа предвестников разной физической природы?” [2]. Такие вопросы имеют общие корни с вопросами, относящимся к многопараметрическим моделям и многодисциплинарным методам исследования сложных систем, когда речь идет о выборе критериев разделения на физические типы возможных вариантов поведения этих систем.

Сложность процесса сейсмичности в целом и процессов подготовки отдельных землетрясений в частности порождают как принципиальные вопросы о физико-механической природе этих процессов, так и количественные вопросы корректного их описания в условиях многомерности, многодисциплинарности и многопараметричности содержательных математических моделей.

Многодисциплинарность подходов к прогнозу уже в течение 30–40 лет стала важным принципом разработки алгоритмов долгосрочного и краткосрочного прогноза. Так, в частности, исследования одной из ведущих научных школ по прогнозу землетрясений, руководимой академиком В. И. Кейлис-Бороком, синтезируют волновые сейсмические методы с геологическими методами и результатами выделения сейсмогенных тектонических структур и блоков, с методами статистики и теории распознавания образов. Значительная часть результатов этих исследований отражена в сборниках научных трудов серии “Вычислительная сейсмология”, Москва (серия основана в 1964 г. В. И. Кейлис-Бороком).

Тенденция к развитию многодисциплинарных методов прогноза землетрясений усиливается в последние годы и приобретает существенные масштабы в связи с созданием цифровых сетей комплексного мониторинга предвестников различной геофизической природы.

В данной статье развивается физико-математическая модель интегрального предвестника, предложенная в виде теоретической схемы ранее в [4,5]. Эта модель, по-видимому, способна снизить остроту противоречий, возникающих при использовании многодисциплинарных предвестников.

Речь идет о синтезированном с помощью численного метода искусственном (непосредственно не измеряемом, но периодически вычисляемом в ходе геофизического мониторинга) предвестнике с использованием многодисциплинарных количественных данных об измеряемых полях—предвестниках. Этот интегральный предвестник определяется на основе решения совмещенных обратных задач для соответствующих геофизических полей (поля смещений и деформации поверхности Земли, поля электропроводности, аномалий гравитационного поля, уровня грунтовых вод и т.д.). Как показано в [4], точность определения интегрального параметра—предвестника может превышать точность определения других характеристик среды на основе индивидуальных геофизических методов.

Одним из основных достоинств такого предвестника должно быть его интегрирующее содержание, свободное от рассогласования показаний предвестников разной физической природы.

У исследователей имеется некоторая свобода выбора физической величины, отображающей вариации интегрального предвестника во времени. Необходимы два основных условия: во-первых, эта величина должна количественно отражать стадию и меру подготовки очага к разрушению, и, во-вторых, она должна определять пространственно-временные вариации различных геофизических полей—предвестников.

В качестве интегрального предвестника мы предлагаем использовать пространственно-временную функцию плотности числа трещин в области готовящегося очага и в зонах аномальных геофизических полей на поверхности Земли.

Такое предложение основывается:

- на результатах кинетической теории разрушения, развитой С.Н.Журковым со своими сотрудниками [6,7];
- на экспериментальных и теоретических исследованиях процессов подготовки землетрясений, выполненных сотрудниками ИФЗ РАН (JPE RAS): В.И.Мячкиным, Б.В.Костровым, Г.А.Соболевым, О.Г.Шапиной [8, 9];
- на приводимых ниже результатах численного анализа “очаговых” и “поверхностных” зон дилатансии.

В статье приводятся основные факты, относящиеся к механическим свойствам интегрального предвестника. Описывается обнаруженное в результате вычислительных экспериментов явление образования “пограничного слоя дилатансии” – разуплотнения протяженных зон верхней части земной коры под действием касательных и растягивающих тектонических напряжений вблизи свободной от напряжений дневной поверхности. Излагается схема вибросейсмического просвечивания дилатансных зон “очагового” и “пограничного” типов с целью повышения надежности определения интегрального предвестника. Поясняются структура модели предвестника и способ оценки функции плотности числа трещин на основе многодисциплинарных данных.

## 1. Основные свойства интегрального предвестника

Землетрясения реализуются через разрушение горных пород, начиная с разрушения пород в очаговой зоне. Поэтому для прогноза землетрясений первостепенное значение имеет изучение процессов *подготовки разрушения* и мониторинга этих процессов. В результате изучения процессов разрушения образцов различных материалов в лабораторных условиях, а также крупномасштабных природных объектов, в том числе блоков земной коры при землетрясениях, сейчас выявлены общие закономерности процесса разрушения.

Наиболее общим принципом является поэтапный характер развития этого процесса во времени. В работах С.Н.Журкова и его коллег из Физико-технического института РАН в Санкт-Петербурге установлен ряд кинетических законов и представлений о разрушении [6,7], которые близки к представлениям сотрудников Института физики Земли РАН о схеме разрушения крупномасштабных объектов земной коры при землетрясениях. В работе Г.А.Соболева [10] сформулированы три закономерности, имеющие “ключевое значение для проблем поиска предвестников и прогноза землетрясений”:

1. *Представление о развитии системы трещин* в области подготовки очага землетрясения в результате роста объемной плотности числа микротрещин, через стадии укрупнения размеров трещин, уменьшения их числа до образования магистральных разрывов.

2. Закономерность ступенчатого перехода размеров трещин от мелких к более крупным при достижении мелкими некоторого критического числа, *соответственно концентрационному критерию* С. Н. Журкова [6]

$$K^* = N^{-1/3}/L, \quad (1)$$

где  $K^*$  – критическое среднее расстояние между трещинами в единицах средней длины трещин;  $N$  – число трещин размера  $L$ , а  $N^{-1/3}$  – объемная концентрация трещин. Когда среднее расстояние становится ниже критического, происходит резкая перестройка всей системы трещин с увеличением средних размеров трещин в некоторой геометрической пропорции и уменьшением средней объемной их концентрации. При этом трещины приобретают тенденцию локализоваться в области будущего макроразрыва. Эти закономерности универсальны для любого масштабного уровня и любого режима нагружения.

3. Перестройка системы трещин проявляется в изменении *некоторых характеристик среды в созревающем очаге, а также в образовании аномалий ряда геофизических полей*. В частности, концентрация процесса трещинообразования может выражаться в пространственно-временном изменении режима сейсмичности для слабых землетрясений, в изменении механизма очагов предшествующих микроземлетрясений, в появлении анизотропии свойств пород в будущем очаге. Последнее наиболее четко проявляется в образовании аномалий величин скоростей продольных и поперечных сейсмических волн перед крупными землетрясениями [11].

Некоторые геофизические поля могут испытывать влияние процессов раскрытия микротрещин. В частности, естественно предполагать увеличение газовой и флюидной проницаемости областей земной коры, в которых происходит этот процесс. Поэтому может измениться уровень грунтовых вод, интенсивность газовых потоков, электрическое сопротивление. Разуплотнение пород за счет увеличения суммарного объема трещин должно вызвать также аномалии гравитационного поля там, где поле локальных тектонических напряжений вызывает активацию процесса трещинообразования.

Анализ поля напряжений в районах подготовки землетрясений [12, 13] и результаты численного моделирования условий возникновения зон “дилатансии”, приведенные ниже, позволяют допускать возможность образования трещин некоторого масштабного уровня на расстояниях 200–300 км от очага будущего землетрясения.

Таким образом, выбор функции плотности трещин в качестве меры подготовки разрушения имеет ряд достоинств благодаря участию этой функции в формулировке всех трех основных закономерностей, “имеющих ключевое значение для проблем прогноза землетрясений”.

К этим достоинствам добавляется повышенная надежность и точность определения функции плотности трещин из междисциплинарных данных благодаря присутствию этой функции в количественных моделях аномальных геофизических полей разной природы (принцип дополненности [14]).

## 2. О “пограничном слое” дилатансии земной коры

В результате взаимодействия региональных и локальных тектонических сил в сейсмоактивных зонах могут возникать области высокой концентрации тектонических напряжений. В какой-либо из этих областей спустя какое-то время произойдет разрушение среды, вызывающее землетрясение.

Процесс подготовки землетрясений, хотя и растянут во времени на несколько лет, тем не менее является энергонасыщенным процессом. Происходят крупные реологические изменения в среде и формируются аномальные зоны геофизических полей разной природы. Наиболее универсальным механизмом развития изменений в среде является раскрытие трещин в зонах повышенных значений сдвиговых и растягивающих напряжений. Такие зоны образуются в

окрестности очагов будущих землетрясений, если здесь неравномерно в пространстве распределены силы. Начальную стадию раскрытия трещин и последующее состояние среды, при котором развиваются процессы разрушения, большинство сейсмологов связывают с состоянием дилатансии среды, описанным в [15, 16].

Дилатансия – это нелинейное разуплотнение среды за счет образования трещин сдвига вследствие превышения наибольших касательных напряжений некоторого порога. К области дилатансии относят множество точек упругой среды, для которых при заданном поле напряжений  $\{\sigma_{ij}\}$  в среде выполнено следующее условие:

$$D_\tau \equiv \tau - \alpha(P + \rho gz) - Y \geq 0, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность породы;  $g$  – ускорение свободного падения;  $z$  – глубина точки;  $P$  – гидродинамическое давление  $P = -1/3(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$ ;  $\alpha$  – коэффициент внутреннего трения;  $Y$  – сцепление породы;  $\tau$  – интенсивность касательных напряжений;

$$\tau = \frac{\sqrt{3}}{2} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2)]^{1/2}.$$

Условие (2) совпадает с критерием Шлейхера–Надаи разрушения материала под действием скальвающих нагрузок. Критерий удовлетворительно описывает начало процесса разрушения горных пород. Критерий применим и в стадии “предразрушения” (при нагрузке до 60–90% от критической) для качественного описания формы областей активизации раскрытия трещин.

На примере простейшей модели земной коры – первоначально однородного, изотропно-упругого полупространства – покажем сложный характер зон дилатансии. Эта сложность проявляется даже в случаях, когда источником тектонических напряжений является единичная сосредоточенная сила.

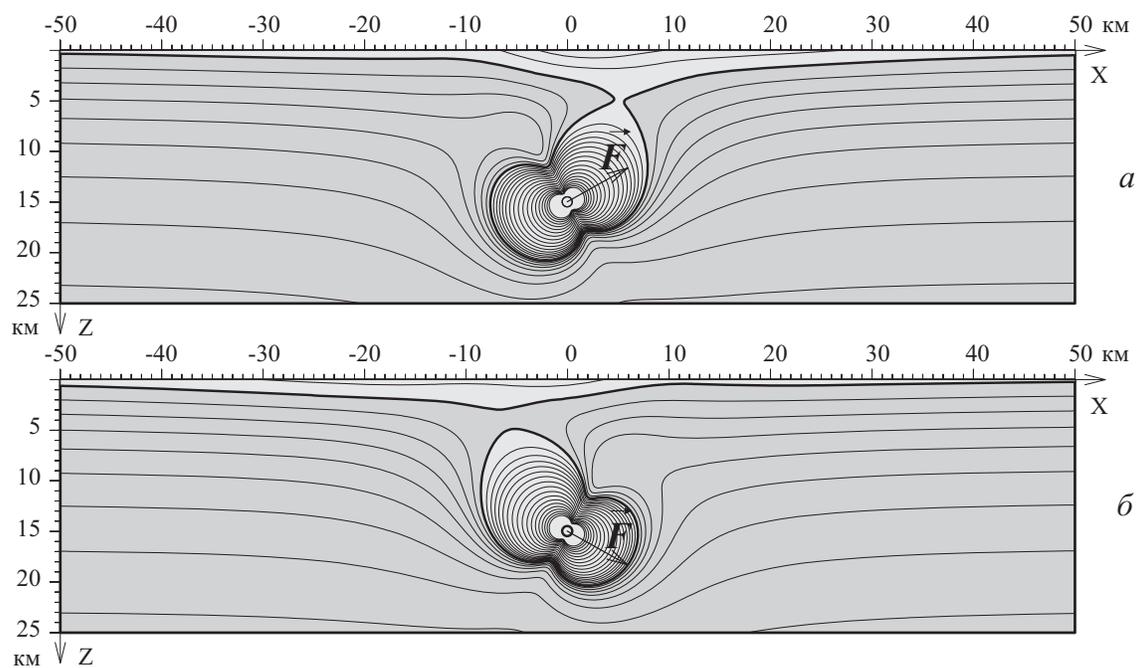
Для моделирования поля напряжений в упругом полупространстве были использованы точные решения для упругих смещений и напряжений от точечного источника, удовлетворяющие условиям отсутствия напряжений на границе  $z = 0$  [17]. На рис. 1 изображена граница области  $D_\tau = 0$  из формулы (2) для источника: одна простая сила на глубине 15 км. Параметры упругого полупространства здесь выбраны следующими:

скорость продольных волн  $v_P = 6000 \text{ м с}^{-1}$ , скорость поперечных волн  $v_S = v_P/\sqrt{3}$ ,  $\lambda = \mu = \rho v_S^2 = 3.48 \times 10^{10} \text{ Па}$ ,  $\rho = 2900 \text{ кг м}^3$ ,  $g = 9.8 \text{ м с}^2$ ,  $Y = 3 \times 10^6 \text{ Па}$ ,  $\alpha = 0.5$ ,  $F = 10^{16} \text{ Н}$ .

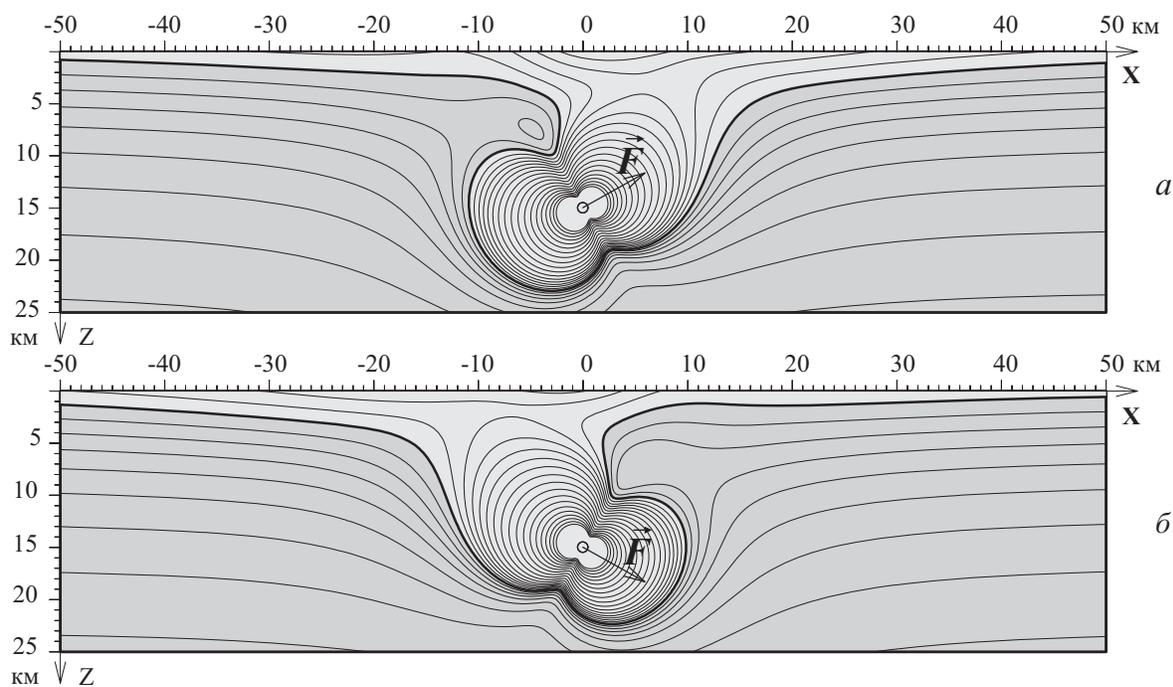
Внутри области  $D_\tau \geq 0$  касательные напряжения доминируют над сжимающими. Сопrotивление среды скальвающим усилиям за счет сцепления здесь преодолено и сложились условия, благоприятные для роста числа трещин. Сами механизмы раскрытия трещин и реологические изменения среды в зоне  $D_\tau \geq 0$  используемыми решениями не описываются. Решения относятся лишь к определению границы перехода упругого состояния в состояние нелинейного разуплотнения с образованием системы трещин.

Интересным фактом оказывается образование двух зон дилатансии: “очаговой” – в окрестности точки приложения силы и “пограничной” – в слое около свободной поверхности. Здесь поле напряжений от источника может содержать сильный вклад касательных напряжений на фоне слабого влияния сжимающих напряжений и гидростатического давления в связи с близостью поверхности, свободной от внешних напряжений.

В зависимости от параметров: глубины источника  $h$ , интенсивности источника  $F$ , угла ориентации силы в источнике  $\vartheta$ , величины сцепления элементов среды  $Y$ , “пограничная” зона дилатансии ведет себя довольно изменчиво. Она может исчезать при увеличении глубины источника или соединяться с “очаговой” зоной – при увеличении интенсивности источника (рис. 2, 3, 4). В некоторых случаях “пограничная” зона имеет горизонтальную протяженность 200 и более километров, а также весьма сложную форму в проекции на поверхность Земли. Легко убедиться, что при действии нескольких, разнесенных в пространстве источников переменной во времени интенсивности, картина перемещения дилатансных зон по поверхности может быть сложной.



**Рис. 1.** Форма “очаговой” и “поверхностной” зон дилатансии в сечении  $y = 0$ , источник на глубине  $h = 15$  км, сила  $\vec{F} = F \vec{n}$ ,  $F = 5 \times 10^{16}$  Н,  $\vec{n} = (\cos \vartheta, 0, \sin \vartheta)$ : (a)  $\vartheta = -30^\circ$ , (b)  $\vartheta = +30^\circ$



**Рис. 2.** Зависимость формы зон дилатансии от величины  $F$  модуля силы,  $F = 1 \times 10^{17}$  Н  
Условные обозначения см. на рис. 1

Поскольку с поверхностными зонами дилатансии естественно связывать зоны аномальных значений различных геофизических полей, то для исследования источников этих аномалий требуется возможно более надежно учитывать положение дилатансных зон.

Условие разуплотнения пород земной коры с учетом механизмов образования трещин путем растяжения среды может быть записано в виде нового критерия

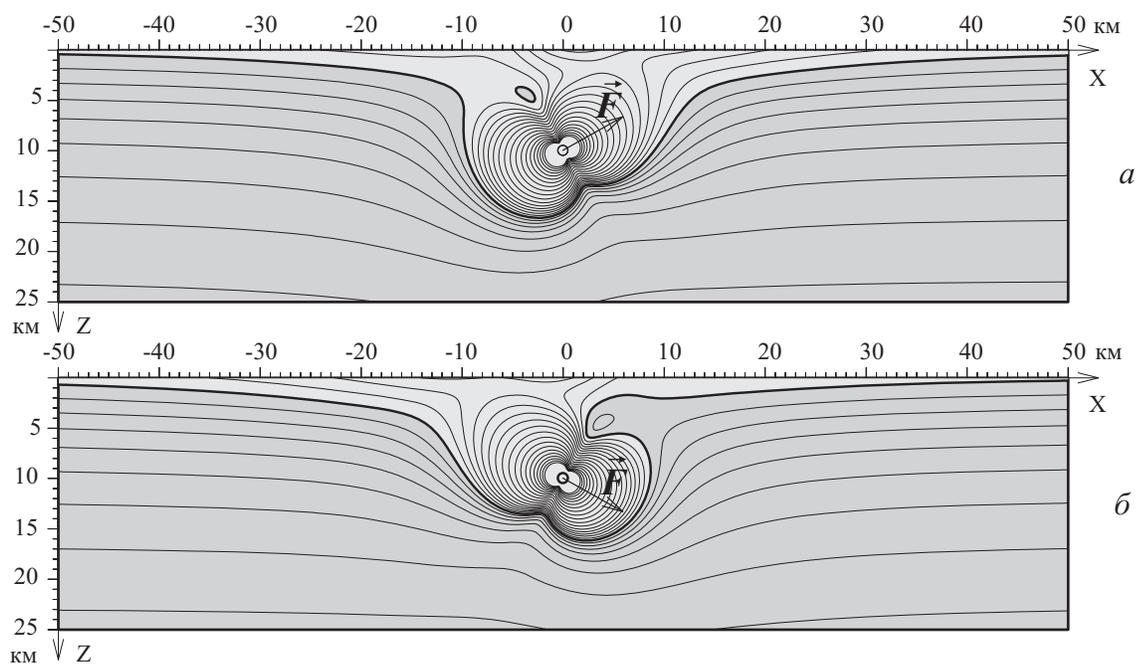


Рис. 3. Зависимость формы зон дилатансии от глубины  $h$  источника,  $h = 10$  км  
Условные обозначения см. на рис. 1

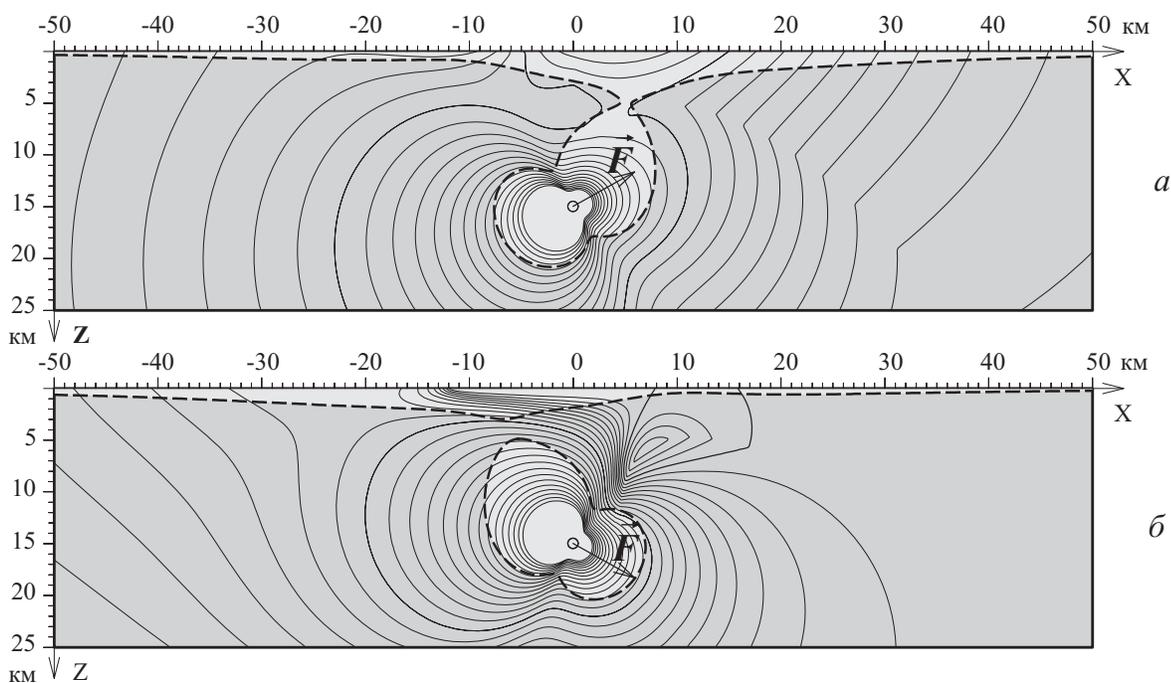
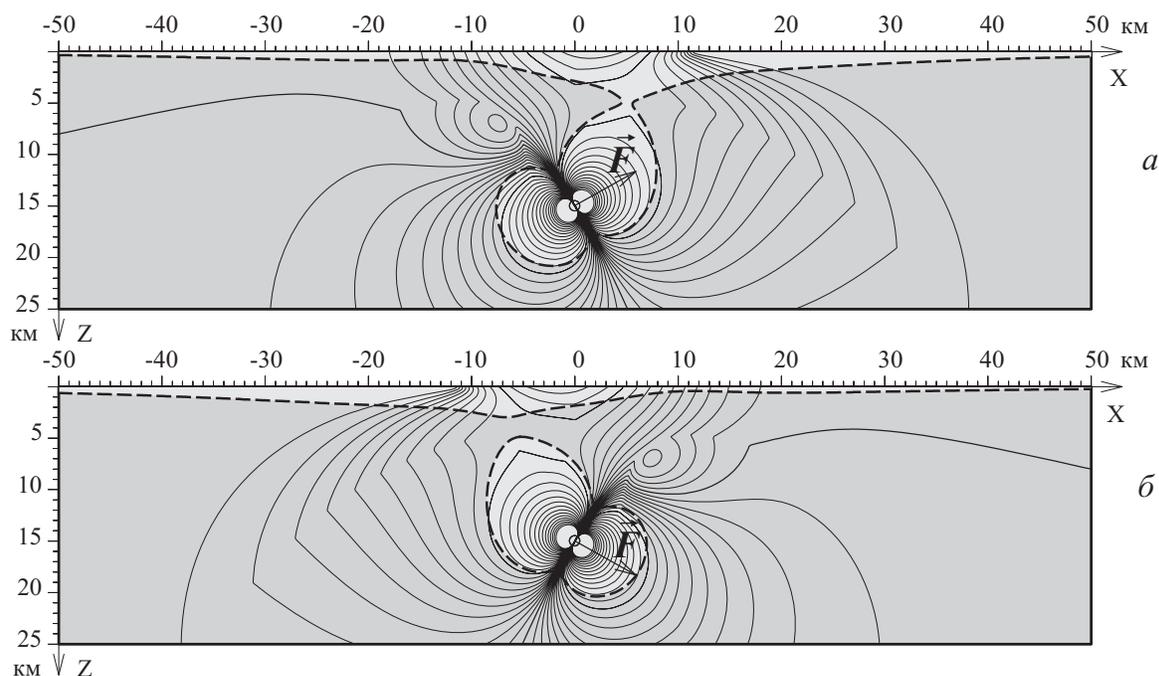


Рис. 4. “Очаговая” и “поверхностная” зоны дилатансии в поле главных нормальных напряжений  $\sigma_1$   
Условные обозначения см. на рис. 1

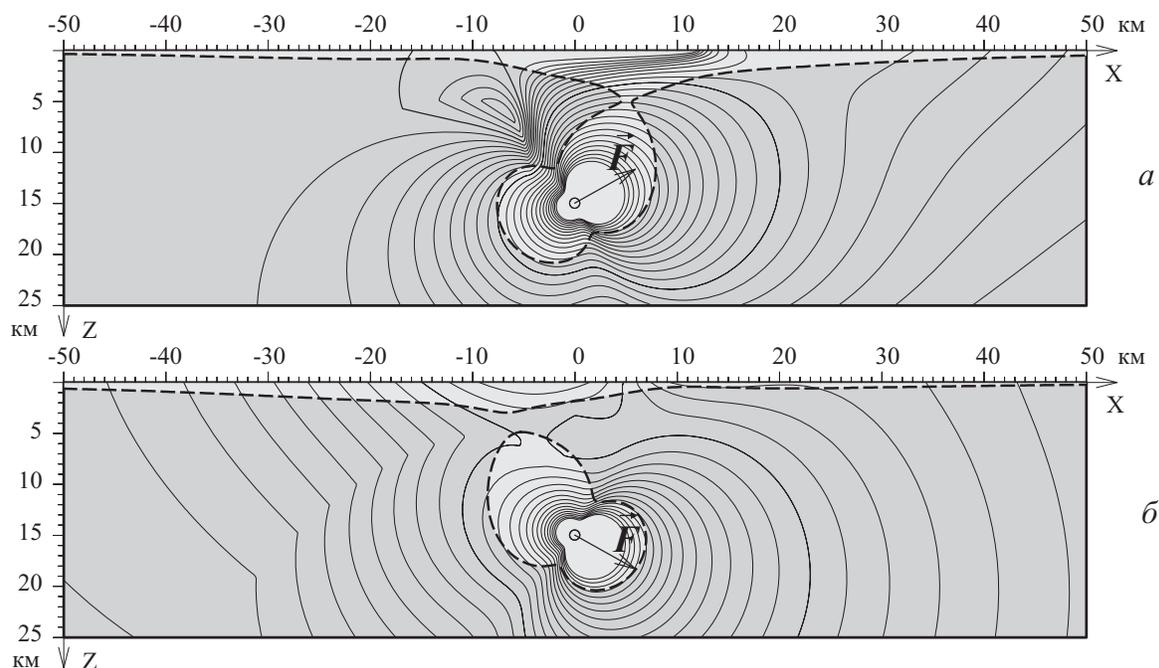
$$0 \leq D_\sigma \equiv \begin{cases} \frac{1}{2}\sigma_1(1 - \sin \varphi) - \frac{1}{2}\sigma_3(1 + \sin \varphi) - Y \times \cos \varphi, & \text{если } -\sigma_3 \geq \sigma_p, \\ -\sigma_3 - \sigma_p, & \text{если } -\sigma_3 < \sigma_p, \end{cases}$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  – наибольшее и наименьшее главные напряжения, соответственно,  $\varphi$  – угол внутреннего трения;  $Y$  – сцепление;  $\sigma_p$  – прочность среды при растяжении. Этот критерий определяет зоны дилатансии в условиях, когда среда выдерживает большие скалывающие напряжения, но меньше сопротивляется растягивающим усилиям.

На рис. 5 и 6 показаны изолинии функций  $D_\tau$  и  $D_\sigma$  для той же среды, что и на рис. 1. Значения новых параметров для критерия  $D_\sigma$  таковы: угол трения  $\varphi = 30^\circ$ , предельное сопротивление на растяжение  $\sigma_p = 8 \times 10^6$  Па, все параметры взяты для пород типа гранитов. Из этих рисунков видно, что для рассмотренного случая формы областей дилатансии по двум критериям близки. Расчет областей дилатансии для широкого набора реалистичных вариантов строения среды и условий нагружения при использовании двух рассмотренных критериев показывает их хорошее совпадение. Учитывая альтернативный характер этих критериев (один учитывает механизм

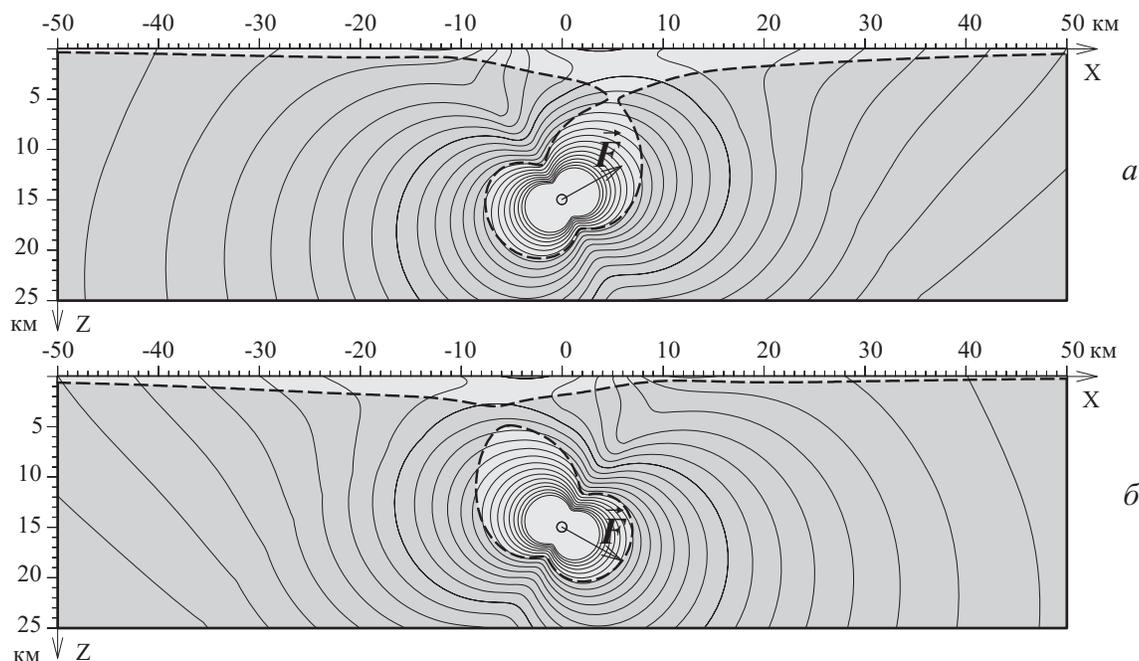


**Рис. 5.** “Очаговая” и “поверхностная” зоны дилатансии в поле главных нормальных напряжений  $\sigma_2$   
Условные обозначения см. на рис. 1

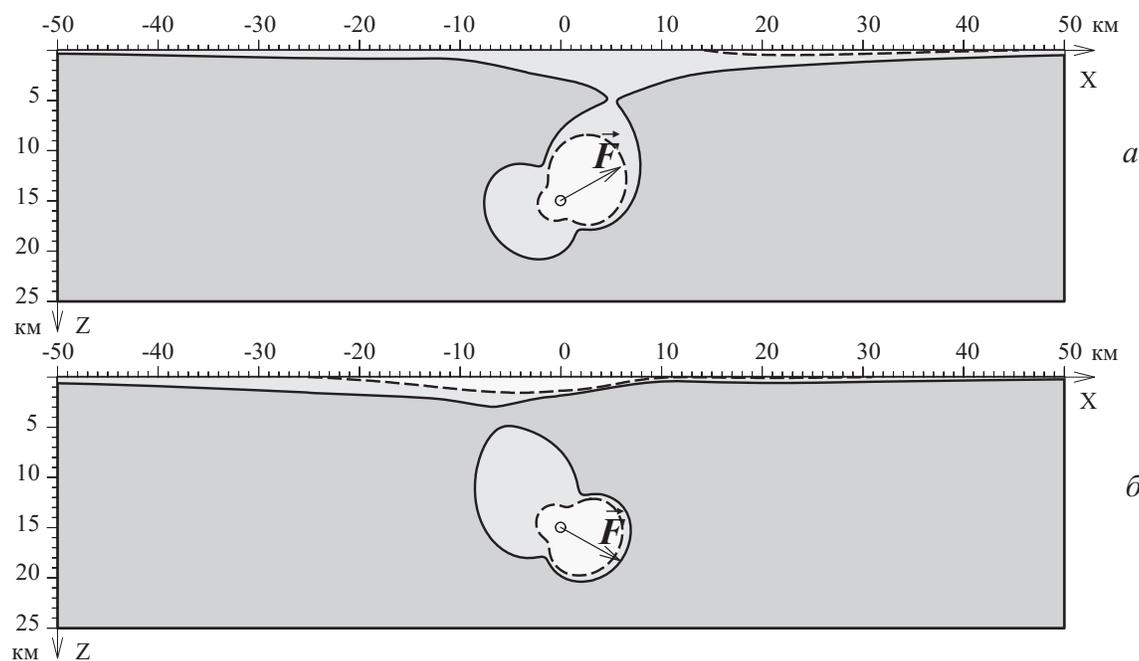


**Рис. 6.** “Очаговая” и “поверхностная” зоны дилатансии в поле главных нормальных напряжений  $\sigma_3$   
Условные обозначения см. на рис. 1

сдвига, другой – механизм растяжения) допустимо предположить, что “пограничная” зона дилатансии может существовать в широком диапазоне значений параметров среды. Нужно отметить, что существование “пограничных” зон дилатансии в реальных условиях пока следует считать гипотезой. Внесение этой гипотезы в сферу практического анализа накопленного обширного материала по мониторингу аномалий различных геофизических полей вызвано попыткой найти причины пространственно-временной подвижности аномалий этих полей и механизмы их взаимосвязи.



**Рис. 7.** “Очаговая” и “поверхностная” зоны дилатансии в поле касательных напряжений  $\tau_2 = (\sigma_3 - \sigma_1)/2$   
Условные обозначения см. на рис. 1



**Рис. 8.** Сравнение зон дилатансии для двух критериев начала образования трещин  
Сплошная линия – разрушение за счет сдвига, штриховая – разрушение за счет растяжения.  
Условные обозначения см. на рис. 1

При краткосрочном прогнозе землетрясений особое значение имеет контроль за изменением плотности трещин в очаговой зоне. Этот контроль опасно отрывать от наблюдений за “пограничной” зоной дилатансии и связанными с нею аномальными полями. Во-первых, положение будущего очага еще точно не известно и определение его в большой степени связано с поведением поверхностных аномальных зон. Во-вторых, надежность и точность оценки функции плотности трещин в “очаговой” зоне зависит от информации об аномалиях полей в “пограничных” зонах.

Прежде чем излагать схему оценки интегрального предвестника в очаге на основе многодисциплинарного мониторинга, целесообразно указать на механизм связи процессов образования трещин в “очаговой” и “пограничной” областях дилатансии. Энергетической средой, в которой осуществляется взаимосвязь “очаговой” и “пограничных” зон, является единое поле напряжений, созданное силами в источнике готовящегося землетрясения (рис. 7, 8). Линии наибольших касательных напряжений (или линии наибольших растягивающих напряжений) дают оценку доминирующей ориентации трещин, возникающих в зонах “очагового” и “пограничного” типов. В тех случаях, когда дилатансные зоны двух типов объединяются в одну, имеется единая область трещиноватости, соединяющая поверхностные зоны аномальных полей с очаговой зоной, развитие процесса разрушения которой может напрямую влиять на изменение геофизических аномалий. В случае разделения областей дилатансии “очаговая” зона может сохранять свое прямое влияние на аномалии некоторых полей (например, на значения скоростей  $v_P$  и  $v_S$ ) через единую область наложенной анизотропии среды. При этом можно ожидать, что в процессе укрупнения трещин коэффициенты анизотропии будут меняться специальным образом, из-за сохранения ориентации осей симметрии. Это может упростить задачу оценки среднего числа трещин вибросейсмическим методом высокого разрешения.

### 3. Многодисциплинарная модель интегрального предвестника и совмещенные обратные задачи при его мониторинге

В разделе 1 изложены основные положения о ключевой роли процессов разрушения и закономерностей развития систем трещин на стадиях подготовки землетрясений. Согласно этим положениям, проблема прогноза должна включать решение задачи полного и точного контроля пространственно-временных характеристик процессов развития систем трещин в сейсмоопасной зоне. Такой контроль, прежде всего, необходимо осуществлять в зонах дилатансии, где образуются и развиваются системы трещин.

Принципиальную возможность определения функции плотности числа трещин предоставляют наблюдения над аномалиями геофизических полей. В предыдущих разделах было высказано предположение о взаимосвязи процесса раскрытия трещин в зонах дилатансии с механизмами образования аномальных полей. В качественном отношении образование аномалий таких полей, как гравитационное, поле электропроводности, уровня грунтовых вод, газовой и флюидной проницаемости, вполне можно объяснить раскрытием трещин<sup>1</sup>. Представление о “пограничной” зоне дилатансии открывает и количественный подход к определению характеристик трещиноватости (интегрального предвестника) на основе данных об аномалиях геофизических полей.

Введем функцию  $\Theta(x, y, z, t)$ , с помощью которой можно пытаться приближенно описать плотность трещин в среде. В процессе деформации среды до нарушения сплошности разуплотнение среды характеризуют объемным расширением  $\Theta = \text{div} \vec{U}$ , где дивергенция вычисляется от вектора смещения точек среды. При этом предполагается, что компоненты этого вектора являются достаточно гладкими (дифференцируемыми) функциями. Если рассматривается малый объем  $v_0$ , который после деформации равен  $v_1$ , то  $v_1 = v_0(1 + \Theta)$ . При этом, если среда имела плотность  $\rho_0$ , то после деформации плотность окажется равной  $\rho_1 = \rho_0/(1 + \Theta)$ . Для боль-

<sup>1</sup>Очевидно, для получения количественных моделей геофизических полей в трещиноватых средах необходимы специальные исследования (см.: [15]).

ших объемов деформированной среды это разуплотнение существенно. Оно создает аномалию гравитационного поля  $V(x, y, 0) = V^0(x, y)$ , по которой, решая обратную задачу

$$\Delta V = -4\pi\rho_1(\Theta), \quad V|_{z=0} = V^0(x, y) \quad (3)$$

об определении плотности  $\rho_1(x, y, z) = \rho_0/(1 + \Theta(x, y, z))$ , можем, в принципе, найти разуплотнение  $\Theta$ . (Если эта обратная задача может быть решена единственным образом, а исходная плотность известна.) Основная трудность, вынуждающая рассматривать многодисциплинарные (совмещенные) постановки обратных задач, состоит в том, что задача (3) не имеет единственного решения. В ней имеется некорректность: по двумерной известной функции  $V^0(x, y)$  делается попытка найти трехмерную функцию  $\rho_1(x, y, z)$ . Это без дополнительной (внешней) информации невозможно.

Значение совмещенных постановок обратных задач в том и состоит, чтобы привлекать дополнительную информацию из новой обратной задачи относительно той же физической величины.

В дальнейших постановках задач будем стараться привлечь возможно больше дополнительной информации о величине  $\Theta(x, y, z, t)$  – объемном расширении среды. В обратной задаче (3) для определения плотности  $\rho_1 = \rho_0/(1 + \Theta)$  функцию  $\Theta(x, y, z, t)$  можно назвать *функцией разуплотнения* среды. Эту функцию допустимо считать кусочно-непрерывной, не связывая ее определение с упругим объемным расширением ( $\Theta = \text{div}\vec{U}$ ), и приравнять к суммарному объему трещин в единице объема среды. Число трещин в единице объема можно определить формулой  $N = \Theta/\Theta_L$ , где  $\Theta_L$  – относительный средний объем одиночной трещины длины  $L$ . Эту величину в задачах мониторинга числа трещин предстоит определить из оценки механических параметров среды, средних размеров трещин на предыдущем масштабном уровне развития процесса в очаге с учетом концентрационного критерия (1).

Основываясь на *принципе дополнителности* геофизических методов [4, 14] для получения надежных оценок функции  $\Theta(x, y, z, t)$ , рассмотрим совмещенные обратные задачи гравиметрии и электроразведки, описания уровня грунтовых вод, а также сейсмического метода измерения эффективных коэффициентов анизотропии в применении к трещиноватым породам.

Каждый метод решения этих задач основывается на измерении в точках поверхности  $z = 0$  соответствующего геофизического поля

$$U_\nu(x, y, 0, t_k) = U_\nu^0(x, y, t_k),$$

где  $t_k = kT_\nu$ ;  $T_\nu$  – интервал времени между моментами регистрации величины поля при его мониторинге.

Для всех геофизических полей, используемых в проблеме прогноза землетрясений, имеются методы решения прямых и обратных задач. В прямых задачах предполагаются заданными: уравнение поля

$$L_\nu(U_\nu, \alpha_\nu, \beta_\nu) = f_\nu(x, y, z, t),$$

граничные условия

$$l_\nu(U_\nu, \alpha_\nu, \beta_\nu)|_s = h_\nu(s, t),$$

начальные данные

$$U_\nu(x, y, z, t)|_{t=0} = U_\nu^0(x, y, z).$$

Здесь  $\alpha_\nu(x, y, z)$ ,  $\beta_\nu(x, y, z)$  – физические и геометрические характеристики среды;  $f_\nu(x, y, z, t)$  – внешние объемные источники поля;  $h_\nu(s, t)$  – источники на поверхности  $S$  (рис. 9).

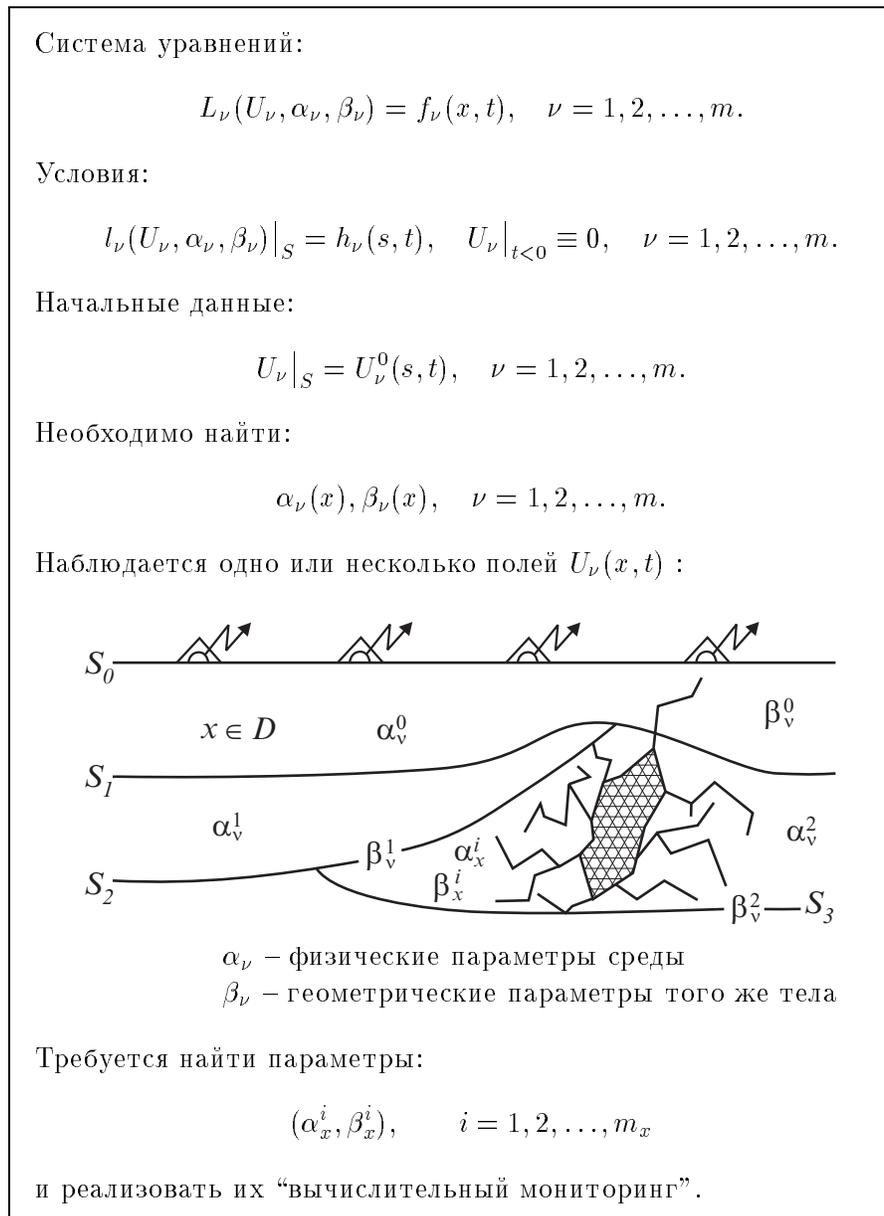


Рис. 9. Общая схема постановки совмещенной обратной задачи

В настоящее время существуют эффективные численные методы решения на компьютерах прямых задач любого типа из упомянутых выше. При их решении должны быть заданы характеристики среды  $\alpha_\nu(x, y, z)$ ,  $\beta_\nu(x, y, z)$ , источники поля и граничная поверхность  $S$ .

В обратных задачах задается поле  $U_\nu^0(s_i, t)$  в серии точек  $s_i$  на поверхности  $S$ , указываются искомые характеристики среды  $\alpha_\nu$  и  $\beta_\nu$  или другие элементы задачи (форма поверхности  $S$ , какие-либо источники  $f_\nu$  или  $h_\nu$ ). Все остальные элементы задачи должны быть заданы, как и в прямых задачах. Общая схема постановки приведена на рис. 9.

При постановке обратных задач возможны следующие варианты:

- раздельно ставятся индивидуальные обратные задачи для каждого метода;
- ставится одна совмещенная обратная задача для группы “ $m$ ” методов, дающих достаточную информацию для определения нужной характеристики среды.

Индивидуальные обратные задачи имеют, как правило, принципиальный недостаток, – они испытывают дефицит информации. Хорошим примером является упомянутая выше обратная задача для гравитационного поля, в которой трехмерная функция плотности среды не может быть определена.

В задаче определения интегрального предвестника  $\Theta(x, y, z, t)$  – функции относительной плотности трещин – используется модель многодисциплинарной (совмещенной) обратной задачи. При этом все геометрические и физические параметры среды, кроме функции  $\Theta(x, y, z, t)$ , считаются известными, а функция  $\Theta(x, y, z, t)$  – не зависящей от времени в течение каждого сеанса измерения полей  $t_k = kT_\nu$ .

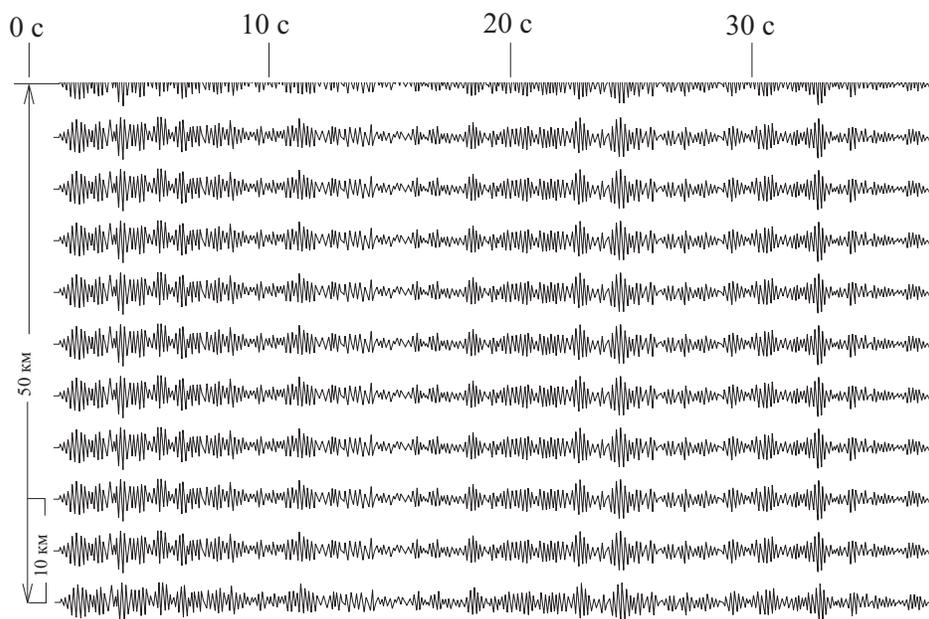
Для решения совмещенной обратной задачи применяется метод оптимизации. Обозначим оператор вычисления поля  $U_\nu(x, y, z, t)$  в прямой задаче для метода с номером  $\nu$  через  $B_\nu(x, y, z, t, \Theta)$ . Задача состоит в определении  $\Theta(x, y, z)$  из условия минимума функционала

$$I(\Theta) = \min_{\Theta \in M_\Theta} \sum_{\nu=1}^m \gamma_\nu \left[ U_\nu^\circ(x, y) - B_\nu(x, y, 0, t_k, \Theta) \right]^2,$$

где  $\gamma_\nu$  – весовые коэффициенты отдельных методов;  $M_\Theta$  – априорное множество возможных решений  $\Theta$ ;  $U_\nu^\circ(x, y)$  – измеренное поле,  $B_\nu(x, y, 0, t_k, \Theta)$  – вычисленное пробное поле.

В методе оптимизации возникают существенные вычислительные трудности, связанные с решением большого числа прямых задач для нескольких методов сразу. Кроме того, минимизируемый функционал часто имеет много “оврагов”, что затрудняет поиск глобального минимума. Для успешного решения таких задач требуется использовать высокопроизводительные компьютеры и хорошие начальные приближения к искомым функциям.

Наиболее детальные данные о структуре областей среды с изменяющейся во времени трещиноватостью способен давать сейсмический метод наблюдения продольных и поперечных волн от мощных контролируемых вибросейсмических источников. В случае передвижных мощных источников с использованием систем наблюдений с многократным перекрытием такой метод дает в сейсмологии результаты, близкие по разрешающей способности к широко известным результатам сейсмологии в нефтяной сейсморазведке (рис 10).



**Рис. 10.** Фрагмент временного разреза ОГТ в районе виброполигона “Быстровка” для профиля 0–95 км (станции через 5 км) в предположении одномерного строения земной коры

Оставляя в стороне ряд возможностей активной сейсмологии [18] с мощными вибраторами, регистрируемыми до расстояний 500–1000 км, изложим лишь схему вибросейсмического просвечивания дилатансных зон “очагового” и “пограничного” типов с целью повышения надежности и точности определения интегрального предвестника.

#### 4. Схема вибросейсмического мониторинга сейсмоопасных зон

С 1977 года в ряде институтов Сибирского отделения Российской академии наук ведется разработка мощных, прицезионно управляемых вибросейсмических источников [19]. С помощью созданных образцов вибраторов силой 50, 100 и 250 тонн и систем регистрации с длительным накоплением сигналов получены сейсмограммы на расстояниях до 400 км и записи гармонических сигналов до 1000 км (рис. 11, 12). На этой основе развиваются методы “активной сейсмологии”, в которых вместо неуправляемого источника сейсмических сигналов – землетрясения, используется хорошо управляемый механический источник с точно известными координатами эпицентра и временем начала работы.

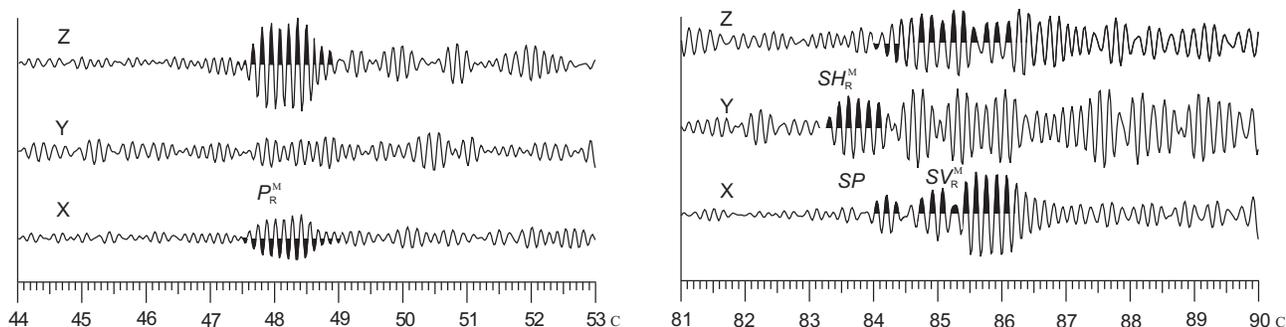


Рис. 11. Сейсмограммы на расстоянии 320 км (вibrator CV-100)

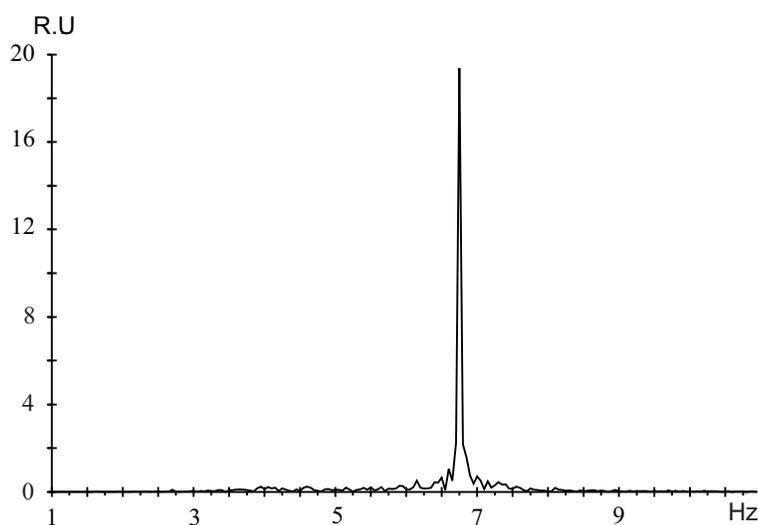


Рис. 12. Гармонический сигнал на расстоянии 520 км

Методам “активной сейсмологии” доступны сейморазведочные схемы наблюдений, алгоритмы и пакеты программ обработки данных.

К числу важных проблем “активной сейсмологии” нужно отнести создание метода вибросейсмического мониторинга сейсмоопасных районов и, в частности, метода определения функции  $\Theta(x, y, z, t_k)$ , характеризующей развитие систем трещин в очаге землетрясения и в зонах образования аномалий геофизических полей. Для определения функции  $\Theta(x, y, z, t_k)$  можно применить схему глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) совместно со схемой общей глубинной точки (ОГТ) на профилях длиной 150–200 км над очагом готовящегося землетрясения (рис. 13).

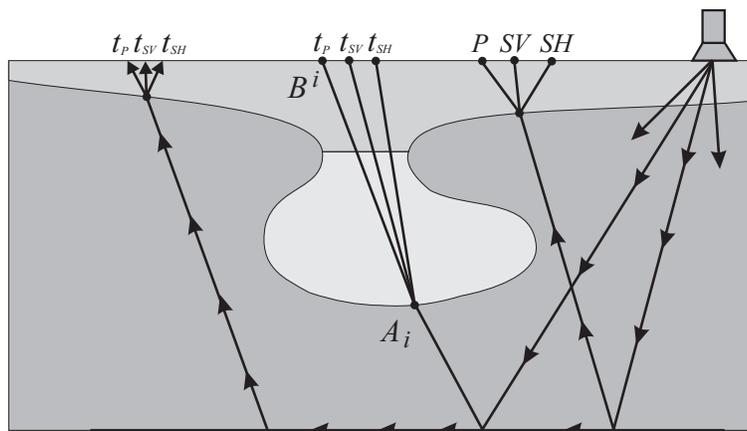


Рис. 13. Схема профиля вибросейсмических наблюдений  $P$ ,  $SV$ ,  $SH$ -волн для мониторинга функции  $\Theta(x, y, z)$  в дилатантной зоне

На стадии долгосрочного прогноза период между зондированиями можно выбирать равным 1–1,5 года, на более краткосрочной стадии прогноза нужно увеличивать частоту зондирования, одновременно детализируя системы наблюдений.

Достаточно частые периодические зондирования среды дают возможность повысить точность определения ее параметров, характеризующих трещиноватость. Можно предполагать, что за периоды времени между зондированиями мало изменятся характеристики среды (именно так и должны выбираться эти периоды). Эти малые изменения можно сделать основными элементами изменчивости сейсмических разрезов с помощью метода “межкадровой корреляции” (т.е. путем вычитания последовательных изображений среды одного из другого и анализа приращений).

Из анализа экспериментов по разрушению можно сделать вывод, что изменчивость размеров трещин выше, чем изменчивость доминирующего направления ориентации трещин [20]. Иногда размеры трещин меняются скачкообразно при переходе на следующий масштабный уровень разрушения [6]. Эта особенность задачи мониторинга процессов разрастания систем трещин позволяет упростить и уточнить алгоритмы обработки вибросейсмических наблюдений.

Общая схема мониторинга показана на рис. 13. Автоматизация обработки наблюдений по такой схеме предполагает развитие методов миграции, а затем и решения обратных динамических задач для полной системы уравнений теории упругости в анизотропной среде

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho \frac{\partial V}{\partial x_i} = \rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2}, \quad (4)$$

с обобщенным законом Гука

$$\sigma_{ij} = C_{ik}(\nu_s, K_s, K_f, e)\varepsilon_{kj}, \quad (5)$$

где  $\sigma_{ij}$  – напряжения;  $\varepsilon_{kj}$  – деформации;  $V$  – гравитационный потенциал;  $C_{ik}$  – эффективные параметры анизотропии для трещиноватой среды;  $\nu_s$  – коэффициент Пуассона для вмещающей (упругой изотропной) среды;  $K_s$  – модуль объемной деформации вмещающей среды;  $K_f$  – модуль объемной деформации жидкой или газообразной фазы в поровом пространстве;  $e$  – объемная плотность трещин.

Уравнения (4) (часто без члена с гравитационным потенциалом) и (5) широко применяются сейчас в геофизике для описания сейсмических волн в трещиноватых средах. Существует несколько версий формулировки обобщенного закона Гука (5) с коэффициентами анизотропии, аппроксимирующими волновые процессы в трещиноватых средах для достаточно больших длин волн (значительно больших, чем средний размер трещин) [21–23].

В законе (5) явным образом присутствует величина  $e$  (плотность трещин), которая зависит от предполагаемой формы трещин. В работе [24] дана формула

$$e = \frac{2NA^2}{\pi P}, \quad (6)$$

пригодная для плотной параллельной упаковки плоских эллиптических трещин с площадью  $A$  и периметром  $P$ . Утверждается, что она справедлива для любых плоских трещин с выпуклой формой границы.

Уравнения (4) и (5) лежат в основе развиваемых в нефтяной сейсморазведке и в сейсмологии методов обработки наблюдений. На практике пока используют упрощенные кинематические подходы (включая методы миграции волновых полей в ОГТ и ГСЗ).

На рис. 13 изображена схема профильных наблюдений отраженных и преломленных волн от границы Мохоровичича в земной коре при вибросейсмическом зондировании “очаговой” и “поверхностных” зон дилатансии. Наличие трещин в этих зонах и изменение их объемной плотности в течение периодов между сеансами мониторинга можно определить по изменению коэффициентов анизотропии и скоростей распространения волн. Происходит расщепление поперечной волны  $S$  на две –  $SV$  и  $SH$  – на границах зон дилатансии. По запаздываниям  $\Delta t_{SV}$ ,  $\Delta t_{SH}$ , моментов вступления соответствующих волн в точки  $B_{SV}^i$ ,  $B_{SH}^i$  относительно порождающих их волн в точке  $A_i$  можно хорошо известными методами определить глубину и форму границ, а также величину скорости волн.

Для модели трещиноватости типа [24] скорости всех трех типов волн  $v_P$ ,  $v_{SV}$ , и  $v_{SH}$  приближенно определяются формулой

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{1 + ef(\gamma)}},$$

где  $v_0$  – скорость волны в среде до появления трещин;  $f(\gamma)$  – функция одна и та же для всех типов волн ([25]);  $\gamma$  – угол между направлением распространения волны и направлением, нормальным к ориентации плоских трещин. Величина  $e$  из (5) и (6) является у нас искомой функцией  $\Theta(x, y, z, t_k)$ .

Эта величина может быть определена не только из наблюдений по схеме вибромониторинга, но и по режимным сейсмологическим наблюдениям скоростей  $v_P(t_k)$ ,  $v_{SV}(t_k)$  и  $v_{SH}(t_k)$  на сейсмостанциях. В этом случае она определяется менее детально и точно из-за меньшей плотности точек наблюдения и более низкой точности определения времен запаздывания волн. Ее рискованно использовать в качестве “хорошего” начального приближения для многодисциплинарного мониторинга функции плотности трещин.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты NN 96-05-66058, 98-05-64538, 00-15-98544).

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Mei Shirong*. Progress in earthquake prediction in China during the 80ies // J. Earth. Predict. Res. 1992. Vol.1, N 1. P.43–57.
2. *Zhang Guomin, Zhang Zhaocheng*. The study of multidisciplinary earthquake prediction in China // J. Earth. Predict. Res. 1992. Vol.1, N 1. P.71–85.
3. *Ma Li, Chen Jianmin, Chen Qifu, Liu Guiping*. Features of precursor fields before and after the Datong-Yanggao Earthquake swarm // J. Earth. Predict. Res. 1995. Vol.4. P.1–30.
4. *Alekseev A.S.* A multidisciplinary mathematical model of combined foreshock for earthquake prediction research // J. Earth. Predict. Res. 1993. Vol.2, N 2. P.137–150.
5. *Alekseev A.S., Glinsky B.M., Kovalevsky V.V., Mikhailenko B.G.* A multidisciplinary mathematical model for earthquake prediction studies and vibroseismic monitoring of seismic prone zones. Proc. 2nd int. conf. on seism. and earthq. engineering. May 15-17. Teheran. JJEES, 1995. Vol.1. P. 97–104.
6. *Журков С.Н.* Кинетическая концепция прочности твердых тел // Вестн. АН СССР. 1968. N 3. С.46–52.

7. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. К вопросу о прогнозировании разрушения горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977. N 8. С.11–18.
8. Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Лабораторные и теоретические исследования процессов подготовки землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1974. N 10. С.107–112.
9. Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Основы физики очага и предвестники землетрясений // Физика очага землетрясений. М.: Наука, 1975. С.6–29.
10. Соболев Г.А. Изучение образования и предвестников разрыва сдвигового типа в лабораторных условиях // Поиск предвестников землетрясений. М.: Наука, 1978. С. 86–99.
11. Нерсесов И.Л., Семенов А.Н., Симбирева И.Г. Пространственно-временное распределение времен пробега поперечных и продольных волн в Гармском районе // Экспериментальная сейсмология. М.: Наука, 1971. С.334–345.
12. Miao Liangtian. Monitoring and prediction of the datong earthquake // J. Earth. Predict. Res. 1993. N 2. P.299–310.
13. Wang Chunhua Liao Sugiong. Experimental study of the preparation and occurrence of strong earthquakes // J. Earth. Predict. Res. 1996. N 5. P.525.
14. Alekseev A.S. Complementary features of geophysical methods and the computational aspect of joint data inversion. Proc. 54th meeting of European association of exploration geophysicists. Paris, 1992. P.750–751.
15. Brace W.F., Paulding B.W., Scholz C. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks // J. Geophys. Res. 1966. Vol.71, N 16. P.3939–3952.
16. Николаевский В.Н. Обзор: Земная кора, дилатансия и землетрясения // Успехи науки и техники. М.: Мир, 1982. С.133–215.
17. Mindlin R., Cheng D. The unit force in elastic half-space // J. Appl. Phys. 1950. Vol.21, No 9. P.118–133.
18. Alekseev A.S., Glinsky B.M., Kovalevsky V.V., Mikhailenko B.G. The problems of active seismology. Trans. of 2nd int. conference “The structure of upper mantle”. Moscow, 1997. P.1–8.
19. Alekseev A.S., Kovalevsky V.V. Powerful vibrator for deep earth interior investigations. LX Annu. Intern. Meeting Soc. of Exploration Geophysicists. Sept. 23–27. San-Francisco. California, 1990. P.956–957.
20. Nur A. Effects of stress on velocity anisotropy in rocks with cracks // J. Geophys. Res. 1971. Vol.78, N 8. P.2022–2034.
21. Crampin S. Seismic wave propagation through a cracked solid: Polarization as a possible dilatancy diagnostic // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1978. N 53. P.467–496.
22. Crampin S. Effective anisotropic elastic constants for wave propagation through cracked solids // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1984. N 76. P.135–145.
23. Budiansky B., O’Connell R.J. Elastic moduli of a cracked solid // Int. J. Solids Struct. 1976. N 12. P.81–97.
24. Hoenig A. Elastic moduli of a nonrandomly cracked body // Int. J. Solids Struct. 1979. N 15. P.137–154.
25. Garbin H., Knopoff L. Elastic moduli of a medium with liquid-filled cracks // Quart. Appl. Math. 1975. N 33. P.301–303.
26. Разрушение: Математические основы теории разрушения / Под ред. Г. Либовица. Т.2. М.: Мир, 1975. 764 с.