

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

# **ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПРИРОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И КАТАСТРОФЫ**

**Том II**

**ГЕОЛОГИЯ УРАНА,  
ГЕОЭКОЛОГИЯ, ГЛЯЦИОЛОГИЯ**

Москва  
2011

УДК 504.0  
ББК 26.2  
Г35

**Экстремальные природные явления и катастрофы** : в 2 т. / Отв. ред. А.О. Глико;  
ИФЗ РАН. – М. : ИФЗ РАН, 2010; 2011.

ISBN 978-5-91682-012-6

**Г35 Т. 2 : Геология урана, геоэкология, гляциология** / Отв. ред. В.М. Котляков, ИГ РАН;  
отв. сост. А.Л. Собисевич, ИФЗ РАН; – М. : ИФЗ РАН, 2011.

ISBN 978-5-91682-014-0

Во втором томе коллективной монографии изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований, связанных с изучением актуальных проблем современной геологии урановых месторождений, геоэкологии и гляциологии, имеющих целью обеспечение безопасности населения и важных промышленных объектов на территории Российской Федерации. Анализируются основные промышленно-генетические типы урановых месторождений; рассмотрены новые прогрессивные технологии добычи радиоактивных материалов; изучено поведение актинидов в условиях долгосрочного хранения и захоронения отработанного ядерного топлива. Полученные научные результаты отражают современные проблемы безопасности атомной энергетики.

Приведены новые научные данные, связанные с изучением эволюции Антарктического и арктических ледниковых покровов, от состояния которых зависит уровень Мирового океана. Достаточно внимания уделено геоэкологическим проблемам Северного Кавказа. Анализируются уникальные данные, полученные при проведении глубокого кернового бурения ледника на Западном плато вулканической постройки Эльбруса.

Изучены наиболее опасные геоэкологические процессы на территории РФ, которые могут привести к гибели людей, ранению и потере здоровья, а также к значительным материальным ущербам; разработан специальный ГИС-проект, который является готовым к использованию продуктом со всеми элементами, присущими автоматизированной информационной системе специального назначения, содержащей развернутые базы данных.

Полученные новые научные результаты и разработанные технологии уже востребованы на практике.

Для специалистов в области наук о Земле, строительства и чрезвычайных ситуаций.

УДК 504.0  
ББК 26.2

The Volume II of the collective monograph presents the results of both theoretical and experimental studies of actual problems of modern geology of uranium deposits, geoecology and glaciology in order to mitigate issues on public safety and potentially hazardous industrial facilities and consequent risks on the territory of Russian Federation. Primary types of industrial uranium ore deposits are analysed, new progressive technologies of prospecting of radioactive materials are considered, the behaviour of actinides in long-time storages and nuclear waste burial sites are studied. The results obtained represent modern safety problems of nuclear power engineering.

New scientific data related to evolution of glaciers in Arctic and Antarctica governing the global level of world ocean are presented. Specific attention is paid to geoecological problems in Northern Caucasus. Genuine data gathered in the course of deep core drilling on the Western plateau of the Elbrus volcano.

Most significant hazardous geoecological processes on the territory of Russian Federation, threatening populated areas in terms of human health and injury, substantial property damage are studied. The specialized geographical information system (GIS) is the database driven product with high level of automation and it has been developed in frames of the actual research initiative.

The new fundamental scientific results obtained and the new technologies developed are of particular interest for practical applications.

The book will satisfy the needs of specialists in Earth sciences, industrial construction applications and hazard assessment.

ISBN 978-5-91682-014-0  
ISBN 978-5-91682-012-6

© Российская академия наук, 2011  
© Коллектив авторов, 2011

*B.B. Адушкин<sup>1</sup>, П.П. Фирстов<sup>2</sup>*

# ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛОЗИВНЫХ ПРОЦЕССОВ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ И ИХ ПРОЯВЛЕНИЕ В ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ В АТМОСФЕРЕ

<sup>1</sup> Учреждение Российской академии наук Институт динамики геосфер РАН

<sup>2</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

## ВВЕДЕНИЕ

Пепловые облака, генерируемые вулканическими извержениями, представляют высокую опасность для авиатрасс. Вблизи восточного побережья Камчатки и непосредственно над ним проходят авиатрассы, связывающие Американский континент с Японией и странами Юго-Восточной Азии. При сильных извержениях вулканов на Камчатке их пепловые шлейфы не раз пересекали международные авиатрассы, создавая опасность для авиалайнеров. Поэтому оперативное оповещение авиационных служб Тихоокеанского региона о готовящихся или начавшихся эксплозивных извержениях вулканов Камчатки представляется крайне актуальным. С 1993 г. в рамках группы KVERT (Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team) на основании комплексного мониторинга вулканов Камчатки (сейсмический, видео и визуальный, спутниковый) выдаются оперативные заключения о пепловой опасности от эксплозивных извержений здешних вулканов. Это дает возможность авиационным службам изменять трассы полета и снизить вероятность попадания самолетов в эруптивные облака [Грина, Гордеев, 2007; Neal *et al.*, 2009].

Технология мониторинга пепловой опасности может быть построена на базе акустического зондирования эксплозивных [Адушкин и др. 1984; Фирстов, Кравченко, 1985]. Технически это стало возможным в связи созданием Международной системы мониторинга в рамках Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. Международная система инфразвукового мониторинга включает 60 инфразвуковых станций, причем три станции находятся на территории Российской Федерации и одна из них непосредственно на Камчатке. В дополнение к этим станциям Камчатский филиал Геофизической службы РАН планирует развернуть сеть пунктов для реги-

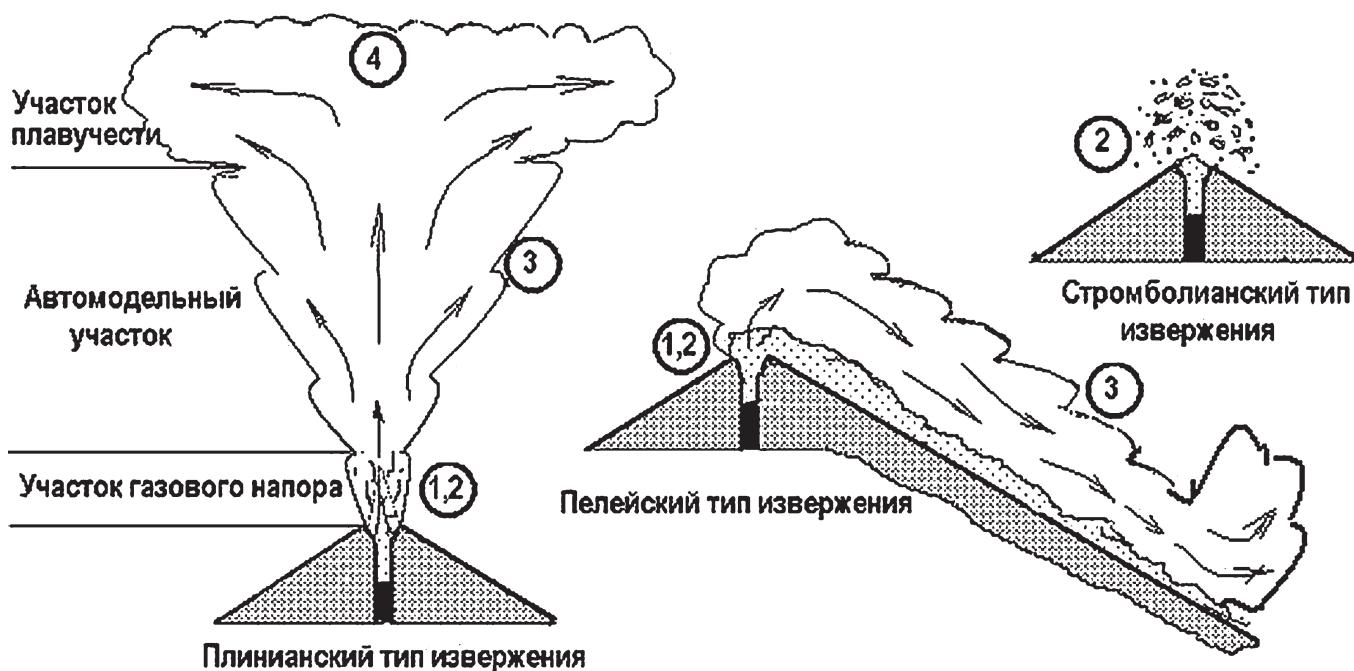
страции волновых возмущений от вулканических извержений в непосредственной близости от наиболее активных вулканов Камчатки.

Ниже проведен анализ вулканических извержений с использованием акустических методов, который в комплексе с другими методами позволил установить характерные особенности развития катастрофических извержений вулканов Шивелуч и Безымянный.

## ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В АТМОСФЕРЕ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ВУЛКАНИЧЕСКИМИ ИЗВЕРЖЕНИЯМИ

Феноменологическая классификация волновых возмущений в атмосфере, наблюдавшихся при вулканических извержениях, выполнена нами с использованием натурных наблюдений на вулканах Камчатки [Firstov, 1994, 1996]. Она включает:

1. *Аэродинамический шум* ( $f = 20\text{--}1000 \text{ Гц}$ ), который генерируется результате взаимодействия потока дисперсионного материала с окружающей средой. Аэродинамические шумы характерны для извержений всех типов в моменты, когда из кратера происходит истечение струи любого состава.
2. *Импульсные акустические возмущения (AC)* ( $f = 1\text{--}10 \text{ Гц}$ ) обусловлены нестационарными процессами, имеющими место в кратерной зоне во время дегазации и фрагментации магмы при ее поступлении на дневную поверхность. Фрагментация сильновязких магм может идти по различным



**Рис. 1.** Основные типы вулканической активности и преобладающие для них классы волновых возмущений в атмосфере, которые указаны цифрами в кружках

физическим законам (волна дробления, коалесценция пузырьков), при этом возникают возмущения с разными характерными временами, обусловленные скоростью протекания процесса. Часть АС являются слабыми воздушными ударными волнами [Фирстов и др., 1978а].

3. **Инфразвук** ( $f = 0,003\text{--}1 \text{ Гц}$ ) генерируется сильными конвективными процессами, сопровождающими формирование эруптивных облаков в результате выноса продуктов извержений, что приводит к формированию восходящей конвективной колонки, пульсации которой  $b$  служат источниками инфразвуковых возмущений в атмосфере.
4. **Длинноволновые возмущения** ( $f < 0,003 \text{ Гц}$ ) возникают в результате формирования очень мощной эруптивной колонки, высота которой в отдельных случаях превышает границу тропопаузы. Как правило, длинноволновые возмущения сопровождают извержения типа «направленный взрыв», когда в атмосферу выносится очень большое количество горячего, мелкодисперсного вулканического материала и вулканических газов.

На рис. 1 схематически показано, какие классы волновых возмущений в атмосфере характерны для тех или иных типов вулканической активности. Первые два класса АС связаны с процессом отделения летучих от поднимающегося по магматическому каналу силикатного расплава и обусловлены работой, которую он совершает при их расширении. Этот процесс сопровождается фрагментацией (разрушением) расплава с образованием раскаленных обрывков лавы и вулканического пепла. «Вулканическая взрывчатка» обладает низкой плотностью энерговыделения по

сравнению с взрывчатыми веществами, поэтому вулканические «взрывы» по параметрам отличаются от взрывов взрывчатых веществ. Акустические сигналы этих двух классов в той или иной мере присущи всем типам извержений.

Вторые два класса АС связаны с образованием в атмосфере эруптивного облака в виде конвективной колонны с хорошо развитой турбулентностью, которая служит источником инфразвуковых волн в атмосфере. Третий класс АС характерен почти для всех типов эксплозивных извержений (вулканский, пелейский, плинианский). Четвертый класс характерен для сильных эксплозивных извержений. С точки зрения информативности о количестве пепла, выброшенного в атмосферу, последние два класса представляют наибольший интерес.

## О МЕХАНИЗМАХ ГЕНЕРАЦИИ ИНФРАЗВУКА КОНВЕКТИВНЫМИ ПРОЦЕССАМИ В ЭРУПТИВНОЙ КОЛОННЕ

Результаты изучения эруптивных облаков обобщены в монографии [Sparks *et al.*, 1997]. Механизм возбуждения акустических возмущений в стратифицированной среде, обусловленный конвективным подъемом нагретых продуктов от площадных пожаров или мощных взрывов, был рассмотрен в 1980-х годах прошлого столетия в работах школы известного

отечественного ученого Ю.А. Гостинцева [Гостинцев и др., 1980, 1985; Гостинцев, Шацких, 1989].

Характеризуя процессы генерации АС, отметим, что конфигурация поднимающегося конвективного элемента зависит от соотношения между временем тепловыделения  $t_B$  и характерным временем подъема продуктов до высоты зависания  $t_N$  в стратифицированной атмосфере. Если  $t_B \gg t_N$ , то имеет место струйное течение, при обратном соотношении в атмосфере образуется облако конечных размеров – термик. Для стационарной струи нагретых продуктов в устойчиво стратифицированной атмосфере, как и для термика, выделяются три характерные области движения: начальная (участок газового напора), автомодельная и стадия зависания вблизи уровня теплового равновесия.

Конвективные элементы обоих типов (термик и струя в поле ветра) по отношению к окружающей атмосфере можно рассматривать как движущиеся и меняющие свой объем образования, которые возбуждают в атмосфере акустические волны. При этом их дальнейшее распространение определяется стратификационными свойствами атмосферы, т. е. распределением давления, плотности и температуры по высоте.

Логично рассматривать площадь горячих отложений, возникающих во время плинианского и пелейского типов извержений, как постоянно действующий «мягкий» источник тепловыделения, в результате которого возникает конвективная колонка. В соответствии с конвективным механизмом генерации воздушных волн, их интенсивность и энергия для «мягкого» постоянно действующего источника тепловыделения определяется изменением во времени эффективного объема поднимающейся в атмосфере струи продуктов. Наиболее длинноволновые возмущения в атмосфере возбуждаются на частотах, определяемых временем существования очага [Гостинцев, Шацкий, 1989].

В ряде работ приведено теоретическое обоснование зависимости энергии акустического источника  $E_{\text{а.и.}}$  от скорости тепловыделения  $Q$  в очаге сильных взрывов и площадных пожаров [Гостинцев, Шацкий, 1989; Гостинцев и др., 1985]:

$$E_{\text{а.и.}} = 90 \frac{\pi \rho_0 \alpha}{\chi h C_0} \left( \frac{g \beta}{\pi \rho_0 c_p} \right)^{1/2} Q^{3/2} N^{3/2}, \quad (1)$$

где  $\alpha = dh/dx = 0,15$  – тангенс угла расширения струи;  $\rho_0$ ,  $c_p$  – плотность и теплоемкость воздуха, соответственно;  $\beta = 1/T_a$  – коэффициент термического расширения;  $T_a$  – температура окружающего воздуха;  $C_0$  – скорость звука в воздухе;  $h$  – эффективная высота, зависящая от стратификации атмосферы;  $N$  – коэффициент Вайселя–Брента;  $\chi$  – турбулентный коэффициент температуропроводности.

Используя (1) можно определить расход пепла исходя из допущения, что при эксплозивных извержениях эруптивная колонна существует за счет тепла,

**Таблица 1.** Зависимость высоты подъема термика или конвективной струи на автомодельном участке от времени для источников разного типа (импульсный, постоянно действующий) и геометрии (точечный, линейный) по Ю.А. Гостинцеву и др. [1980]

Тип источника	Геометрия источника	
	точечный	кольцевой (линейный)
Импульсный	1. $H \sim t^{1/2}$	2. $H \sim t^{2/3}$
Постоянно действующий	3. $H \sim t^{3/4}$	4. $H \sim t$

выносимого в атмосферу мелкой пирокластикой (вулканическим пеплом), а время той или иной стадии извержения по характерным изменениям в АС.

Поскольку в магме содержится от 0,5 до 6 % по весу ювенильной воды, то конденсация перегретого пара должна влиять на динамику подъема эруптивного облака, что будет находить отражение в волновых возмущениях в атмосфере. В пользу этого предположения указывают результаты киносъемки распространения верхней границы эруптивных облаков, возникавших во время эксплозий вулкана Карымский. Киносъемка фиксирует последнюю стадию взрывного процесса, при этом максимальная скорость фронта в первые секунды определяется кинетической энергией, запасенной выбрасываемым материалом в результате разрушения «пробки». После ее разрушения проходит еще довольно длительное истечение пеплогазовой смеси из кратера вулкана в результате декомпрессии и последующей фрагментации магмы в подводящем канале. Установлена зависимость характерного размера поднимающегося термика или струи от времени для источников различных типов и геометрии [Гостинцев и др., 1980]. Характерным размером при этом можно считать высоту верхней границы или максимальный радиус всплывающих в поле силы тяжести продуктов тепловыделения (в основном мелкие частицы пепла) на автомодельном участке. В табл. 1 приведены зависимости  $H \sim f(t^\mu)$  для источников разного типа.

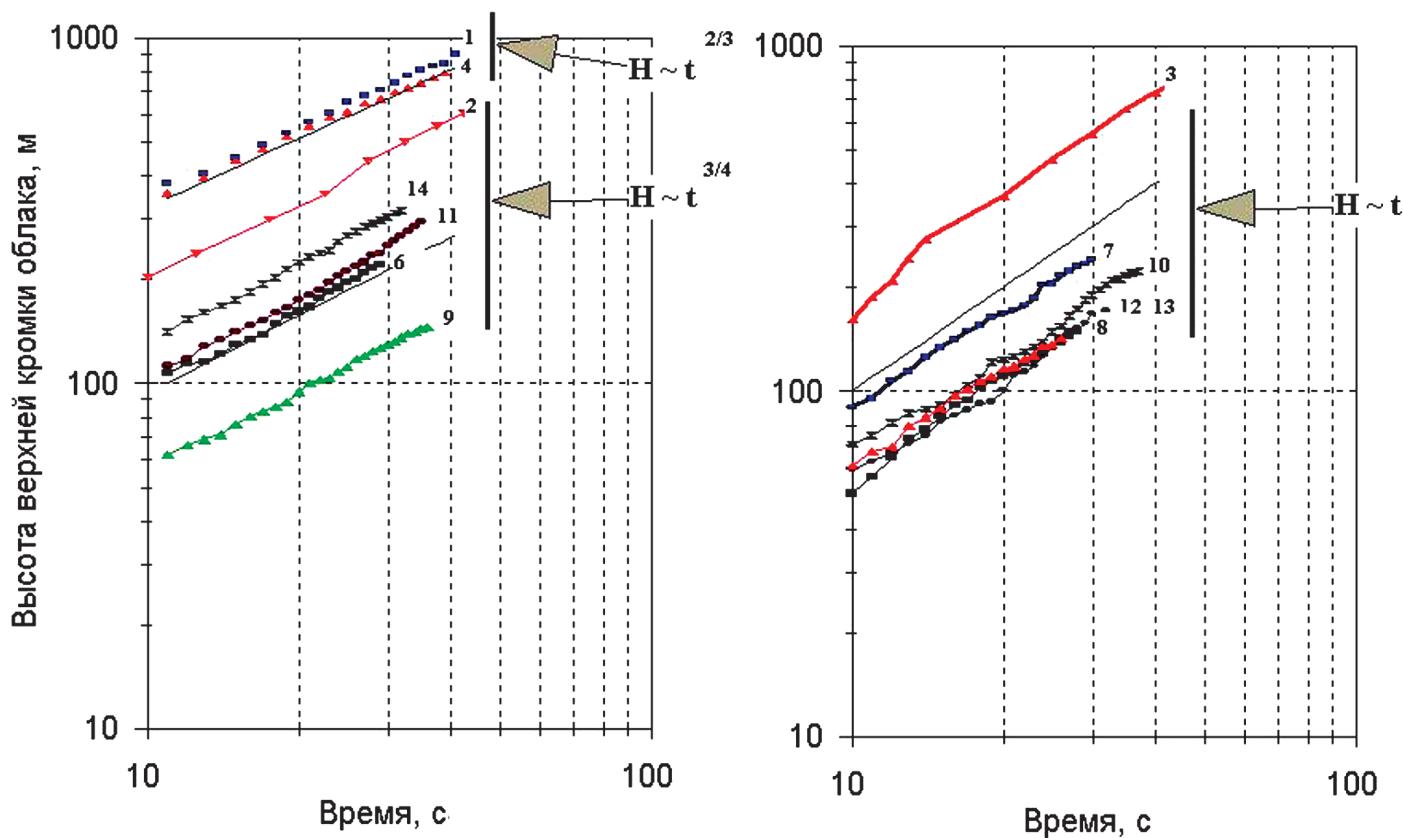
В табл. 2 приведены основные данные, полученные на основе киносъемки развития эруптивных облаков 14 эксплозий вулкана Карымского: визуальная характеристика эксплозии; начальная скорость фронта эруптивного облака ( $v$ , м/с); коэффициент  $\mu$ , который рассчитывался на автомодельном участке после 10-секундного развития облака методом наименьших квадратов, исходя из соотношения  $\lg H = \mu \lg t + b$ . На рис. 2 показаны экспериментальные данные. Методика киносъемки и расчет начальной скорости фронта эруптивного облака описаны в работе [Фирстов и др., 1978б].

Как следует из приведенных данных из 14 эксплозий для восьми наблюдается развитие высоты эруптивного облака по закону  $H \sim t$  (кольцевой, постоянно действующий) или  $H \sim t^{0.75}$  (кольцевой, импульсный).

**Таблица 2.** Основные данные развития эруптивных облаков во время эксплозий вулкана Карымский, вычисленные по данным киносъемки

Номер	Дата	Время GMT	Визуальная характеристика эксплозии	$v^{\max}$ , м/с	$\mu$	Тип источника
1	2.VI.1970	22:23	Сильная, пепловая	87	0,67	2
2	9.VI.1970	00:49	Умеренная, пеплогазовая, переходящая в продувку	72	0,78	3
3	9.VI.1970	20:40	Умеренная, пеплогазовая, переходящая в продувку	52	1,04	4
4	10.VI.1970	00:16	Пеплогазовая продувка	34	0,63	2
5	14.VI.1970	04:30	Слабая пеплогазовая	40	0,42	1
6	25.VI.1970	23:38	Слабая газопепловая, переходящая в продувку	23	0,75	3
7	25.XI.1970	23:47	Слабая газопепловая, переходящая в продувку	19	0,90	4
8	26.XI.1970	02:50	Газопепловая продувка	6	1,00	4
9	28.XI.1970	02:03	Газопепловая продувка	9	0,74	3
10	28.XII.1976	03:06	Газопепловая, переходящая в продувку	24	0,93	4
11	28.XII.1976	03:07	Газопепловая, переходящая в продувку	22	0,79	3
12	15.I.1977	00:04	Газопепловая	13	0,96	4
13	17.I.1977	00:33	Газопепловая	12	0,94	4
14	23.I.1977	06:37	Газопепловая	22	0,77	3

Примечание. Кольцевой (линейный) тип источника в таблице выделен серым цветом.



**Рис. 2.** Зависимость высоты подъема верхней кромки эруптивного облака от времени при эксплозиях вулкана Карымского



**Рис. 3.** Эксплозия вулкана Карымский. Фото А.Г. Маневича

Кольцевой источник предполагает подпитку энергией по периферии эруптивного облака, что возможно или за счет конденсации перегретого водяного пара, или за счет экзотермических реакций вулканических газов и раскаленных продуктов извержения с кислородом воздуха (процессы окисления или горения). Наиболее вероятна конденсация пара из ювенильной воды, выбрасываемой в атмосферу, что хорошо видно на фото (рис. 3), где запечатлено начало эксплозии вулкана Карымский.

## РЕКОНСТРУКЦИЯ ДИНАМИКИ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ШИВЕЛУЧ 12 НОЯБРЯ 1964 г.

Вулкан Шивелуч – самый северный среди действующих вулканов Камчатки. Для него характерны катастрофические извержения с выносом ювенильной пирокластики в виде тефры и пирокластических потоков объемом один кубический километр и более.

За последние 10 тыс. лет подобные извержения происходили в среднем раз в 100 лет.

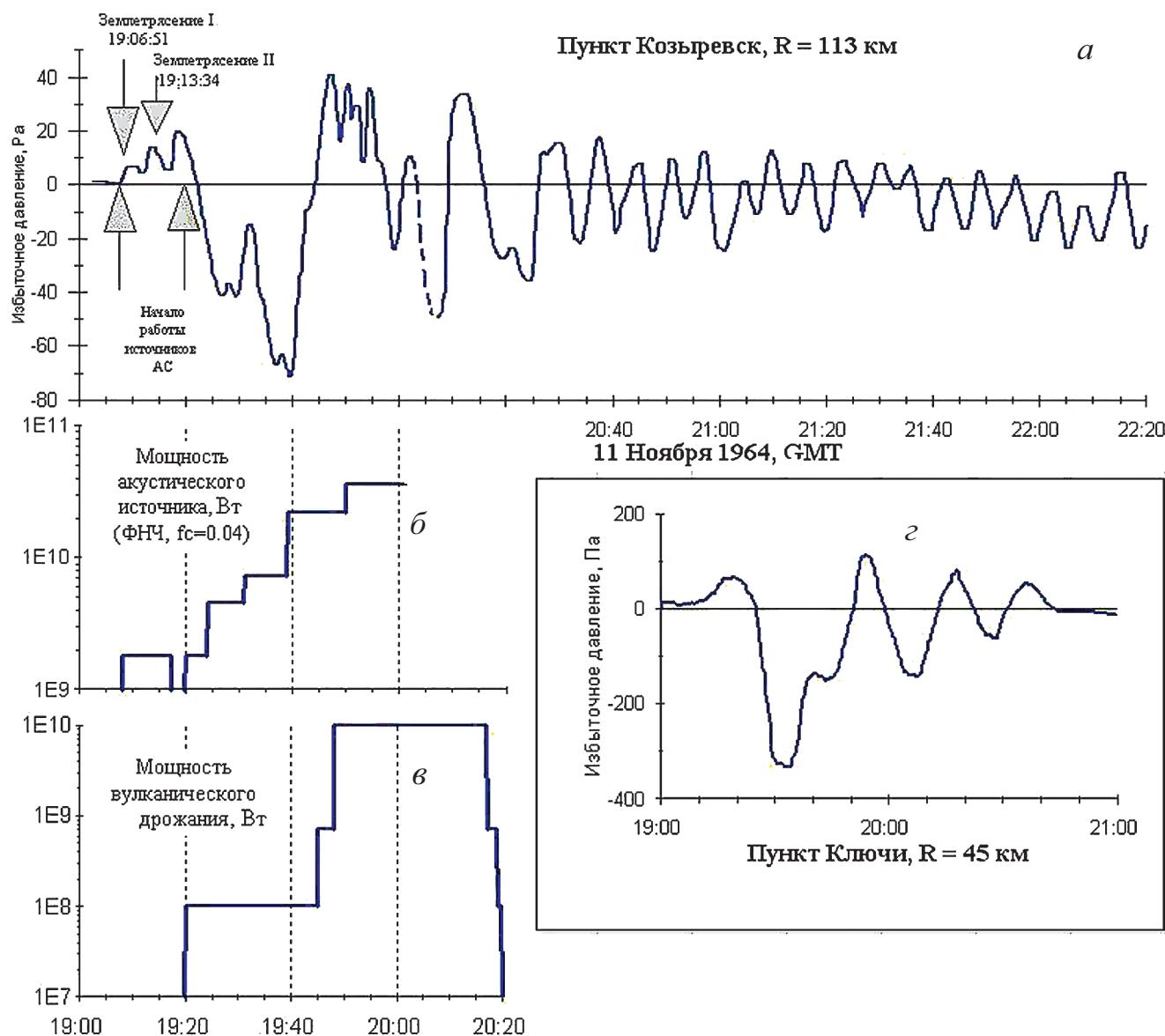
Последнее катастрофическое извержение типа «направленный взрыв» на вулкане Шивелуч произошло 12 ноября 1964 г. [Горшков, Дубик, 1969]. Материал отложений «направленного взрыва» полностью резургентный, его объем оценивается 1,5 км<sup>3</sup>. Вслед за процессом, разрушившим постройку вулкана, началась плинианская деятельность, в результате которой было выброшено 0,3 км<sup>3</sup> пепла. Поверхность «взрывных» отложений была покрыта обширным плащом пирокластических потоков, формирование которых произошло на последнем этапе извержения. Объем пирокластических потоков оценивается в 0,3–0,5 км<sup>3</sup>. Площадь отложений направленного взрыва составила 100 км<sup>2</sup>. На «агломерате направленного взрыва» выделен слой резургентного пепла мощностью 4–8 см, который возник, по мнению авторов работы [Белоусов, Белоусова, 1995], во время фреатических взрывов на следующей стадии извержения после образования «агломерата направленного взрыва».

В работе [Горшков, Дубик, 1969], выполненной на основании изучения свежих вулканических отложений и геофизических данных, описан один из первых вариантов сценария динамики извержения. Он сводится к тому, что во время извержения произошел направленный выброс большого объема материала старой постройки по баллистической траектории. На основании барограмм высказано предположение о двойном «взрыве». В работе [Токарев, 1967] выполнена реконструкция динамики извержения, в которой исключался мощный одноактный взрыв, а отдавалось предпочтение серии взрывов, следующих один за другим.

Интерес к извержениям типа «направленный взрыв» стимулировало катастрофическое извержение вулкана Сент-Хеленс 18 мая 1980 г. (США, штат Вашингтон), все стадии которого были задокументированы с помощью фото- и киноматериалов, что дало возможность детально изучить процесс извержения вулкана и предложить несколько иную схему развития подобных извержений [The 1980 eruption..., 1981]. Опираясь на вновь полученные данные, полученные путем расшифровки акустической и сейсмической информации, нами проведена новая реконструкция извержения вулкана Шивелуч [Фирстов, 1996].

### Сейсмические явления и волновые возмущения в атмосфере, сопровождавшие извержение вулкана Шивелуч

Сейсмичность вулкана перед извержением изучалась по данным ближайшей станции Ключи, расположенной в 45 км от вулкана [Токарев, 1967]. На станции без пропуска регистрировались землетрясения с  $K \geq 7$  ( $K = \lg E$ , Дж). Извержению предшествовало множество вулканических землетрясений, первые из которых начали отмечаться за 10 месяцев. До начала ноября в основном происходили землетрясения с  $K \leq 8$ .



**Рис. 4.** Длинноволновое акустическое возмущение, восстановленное по записи микробарографа в пункте Козыревск (а), мощность источника «высокочастотного» акустического излучения (б), мощность вулканического дрожания (в), запись флюктуаций атмосферного давления метеорологическим барографом в пункте Ключи (г)

В начале ноября сейсмичность вулкана Шивелуч резко возросла, что выразилось в росте числа землетрясений и увеличении их энергетического класса. Наиболее сильное землетрясение роя, непосредственно предварявшее извержение, с энергетическим классом  $K = 12,3$  ( $E = 10^K$  Дж), произошло в  $19^h 06^m 51^s$  GMT (землетрясение I), а в  $19^h 13^m 34^s$  произошло землетрясение несколько слабее первого –  $K = 11,7$  (землетрясение II), после чего на фоне интенсивного дрожания слабые землетрясения выделить было невозможно, а землетрясений с  $K \geq 9$  больше не фиксировалось. Извержение сопровождалось квазигармоническим колебанием грунта – вулканическим дрожанием, которое было зарегистрировано близкими и удаленными сейсмическими станциями Камчатки.

Вариации атмосферного давления, сопровождавшие это извержение, были зарегистрированы близлежащими метеостанциями. Длительность длинноволновых акустических возмущений (ДАВ) составляла около одного часа с максимальным перепадом давления около 400 Па, и небольшой амплитудой первой фазы избыточного давления  $DP_{+1} = 32$  Па, при фазе разрежения длительностью около 20 мин, и последующими двумя периодами колебаний  $DP$  длительностью также около 20 мин. На рис. 4, г приведена копия барограммы, записанной на метеостанции Ключи, расположенной на расстоянии 46 км от вулкана.

Для извержений типа «направленный взрыв» механизм образования ДАВ обсуждался в работе [Адушикин и др., 1984]. Первый полупериод ДАВ связан

с выносом в атмосферу вулканических газов и материала фрагментации с температурой значительно выше температуры воздуха, что приводит к возникновению начального импульса длительностью несколько минут (7,7–13,2 мин), обусловленного изменением эффективного объема поднимающейся струи продуктов в атмосфере до точки зависания.

После образования конвективной колонны плинианскую деятельность можно рассматривать как постоянно действующий источник тепла и массы, который некоторое время поддерживает в атмосфере существование струи от поверхности Земли до тропопаузы и выше. Возникает мощный подсос воздуха и формируется фаза разрежения, которая связана как с суммарной мощностью тепловыделения, так и с конденсацией большого количества перегретого ювелирного пара, которая служит основной причиной формирования глубокой фазы разрежения. Не исключена возможность подпитки струи теплом в результате окислительных реакций вулканических газов с кислородом воздуха по периферии колонны.

После уменьшения удельной теплоемкости источника ниже определенного порога конвективная струя теряет высоту, происходит опускание переохлажденных по отношению к точке равновесия продуктов извержения, вызывающее сжатие нижних слоев атмосферы, которое фиксируется в виде второй фазы сжатия.

Запись флюктуаций атмосферного давления на микробарограмме в пункте регистрации Козыревск, расположеннном в 113 км от вулкана, была переданы авторам П.И. Токаревым и приведена на рис. 5, а. Вследствие воздействия на гальванометр колебаний грунта, вызванных приходом сейсмических волн, сильные землетрясения хорошо видны на барограмме в виде отдельных импульсов.

С целью изучения спектрального состава АС, записанного на станции Козыревск, вычислялась спектральная плотность мощности (СПМ), которая сравнивалась с СПМ для часового участка записи флюктуаций атмосферного давления, предшествующих сигналу (рис. 6). Спектр плотности мощности вычислялся при помощи быстрого преобразования Фурье с прямоугольным временным окном. Кривая СПМ для фонового участка записи в целом имеет наклон, близкий к  $\sim f^{-5/3}$ , что согласуется с представлениями о спектре колебаний атмосферного давления, обусловленных турбулентностью атмосферы. В области низких частот выделяются три спектральных пика на частотах  $9,2 \cdot 10^{-4}$ ;  $2,1 \cdot 10^{-3}$ ;  $3,3 \cdot 10^{-3}$  Гц (18,1; 7,8; 5,0 минут). Рассчитанная частота Брента–Бейселя ( $N_z$ ) выше тропопаузы имеет среднее значение  $N_z \approx 0,02 \text{ c}^{-1}$  ( $T = 5,2$  мин), что близко к значению третьего спектрального пика. Кривая СПМ флюктуаций атмосферного давления, сопровождавших извержение, лежит на два порядка выше кривой фонового участка и имеет спектральные пики на частотах, не совпадающих со спектральными пиками фоновой кривой.

По характеру изменения уровня кривой СПМ в зависимости от частоты с некоторой долей условности ее можно разбить на четыре участка (см. рис. 6):

1.  $0,1\text{--}1,0$  Гц – падение уровня пропорционально  $\sim f^{-3}$ ;
2.  $0,01\text{--}0,1$  Гц – падение уровня пропорционально  $\sim f^3$  до  $0,04$  Гц и затем постоянный уровень до  $0,1$  Гц, на этом участке выделяются два спектральных пика с частотами  $0,014$  и  $0,013$  Гц (1,1; 1,3 минуты);
3.  $0,005\text{--}0,01$  Гц – квазипостоянный уровень, ограниченный слева резким минимумом на частоте  $\sim 0,05$  Гц с четырьмя спектральными пиками на частотах:  $0,0095$ ;  $0,0082$ ;  $0,007$ ;  $0,0064$  Гц (1,8; 2,0; 2,4; 2,6 минуты);
4.  $>0,005$  Гц – диапазон длинноволновых возмущений, к сожалению, отфильтрованный амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) прибора, где можно выделить два спектральных пика на частотах:  $0,0043$ ;  $0,0012$  Гц (3,5; 13,6 минуты).

Согласно данному разбиению была выполнена фильтрация сигнала; отфильтрованные кривые приведены на рис. 5, б – д. На кривой, отфильтрованной фильтром высоких частот (ФВЧ) с  $f_{\text{гр}} = 0,1$  Гц (см. рис. 5, б), хорошо выделяются вступление двух АС. Первое вступление в  $19^{\text{h}}14^{\text{m}}20^{\text{s}}$  по времени близко к времени возникновения землетрясения II. Через 8 минут началось плавное уменьшение амплитуды АС, которая в  $19^{\text{h}}22^{\text{m}}40^{\text{s}}$  достигла фона, а в  $19^{\text{h}}26^{\text{m}}40^{\text{s}}$  началось ее медленное возрастание.

Опираясь на предшествующие работы по изучению АС от вулканических извержений [Фирстов, 2003], можно полагать, что диапазон волновых возмущений  $0,05\text{--}1$  Гц связан с нестационарными процессами, происходящими во время истечения пеплогазовой струи из кратера вулкана (отдельные взрывы, сверхзвуковые скачки), а также с крупномасштабными пульсациями в эруптивной колонне. Нестационарные процессы приводят к генерации слабых воздушных ударных волн, которые в дальней зоне трансформируются в инфразвуковые волны с частотой  $0,1\text{--}1$  Гц.

На кривой, отфильтрованной полосовым фильтром с граничными частотами  $f_{\text{грв}} = 0,1$  и  $f_{\text{грн}} = 0,01$  Гц, также выделяются вступления двух АС, но, начиная с  $19^{\text{h}}37^{\text{m}}$ , появляются интенсивные колебания с периодом около минуты, максимальная амплитуда которых приходится на  $19^{\text{h}}47^{\text{m}}$ . Изменение интенсивности сигнала на этих периодах указывает на возрастание мощности процесса массопереноса тепла и вещества в атмосфере.

Для восстановления реальных ДАВ, в отфильтрованный ФНЧ с  $f_{\text{гр}} = 0,005$  Гц сигнал станции КЗР была введена поправка на АЧХ. Длинноволновые колебания и последующий шлейф колебаний атмосферного давления с  $T \sim 6$  минут, приведенные по времени к очагу, показаны на рис. 4, а, где также продемонстрирована запись флюктуаций атмосферного давления, зарегистрированных метеорологическим барографом в Ключах. По форме записи ДАВ в пун-

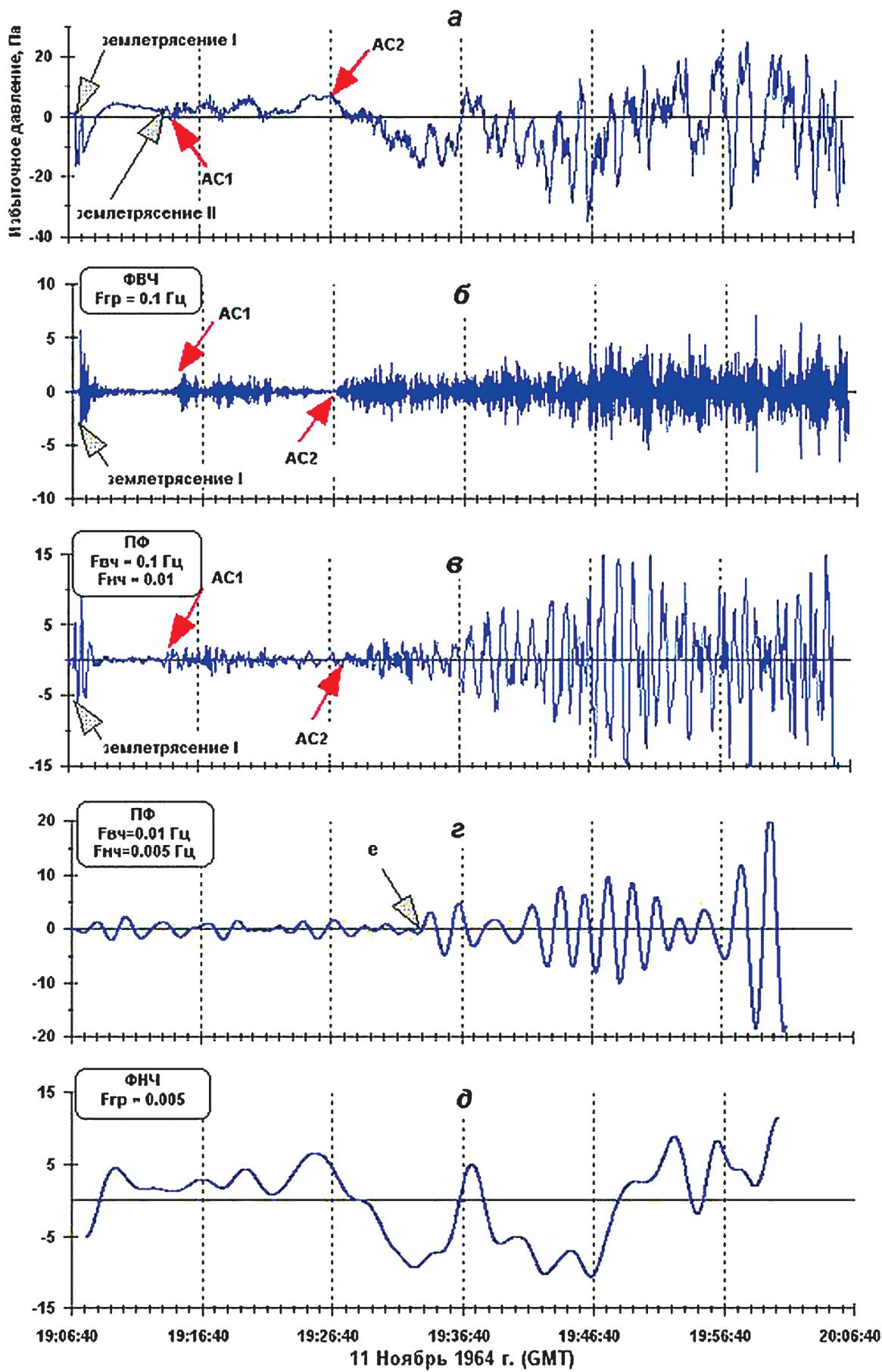
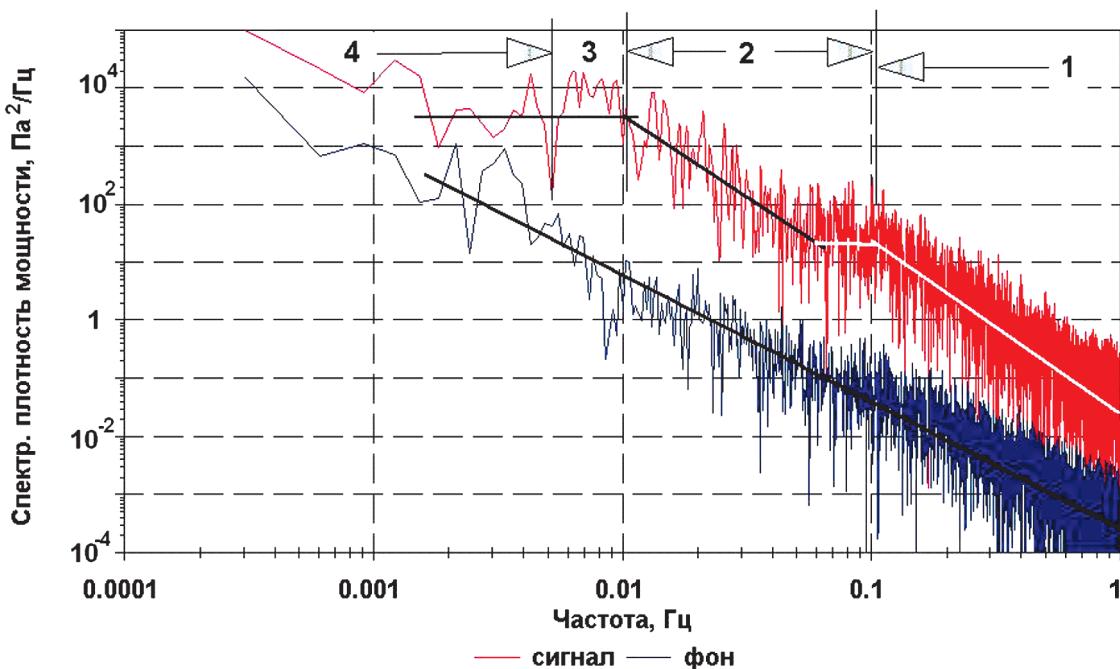


Рис. 5. Запись волновых возмущений от извержения вулкана Шивелуч в ноябре 1964 г. (а) и кривые, отфильтрованные с различной полосой пропускания (б–д)



**Рис. 6.** Спектральная плотность мощности волновых возмущений, записанных микробарографом на станции Козыревск во время извержения вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г., и фона, предшествовавшего извержению

ктах Козыревск и Ключи близки (см. рис. 4, а, г), а спадание амплитуды с расстоянием, пропорциональное  $\sim 1/r$ , свидетельствует в пользу того, что эти колебания относятся к волнам Лэмба.

На рис. 4 кроме длиннопериодного волнового возмущения показано также изменение мощности «высокочастотной» части АС, отфильтрованного ФВЧ с  $f_c = 0,04$  Гц (см. рис. 4, б), и вулканического дрожания (см. рис. 4, в). Времена всех сигналов приведены к очагу с учетом скорости распространения сейсмических и акустических волн. Мощность АС и вулканического дрожания вычислялась по стандартной методике, с использованием данных работы [Токарев, 1967].

На основании совместного анализа сейсмического и акустического сигналов выделены времена переломных моментов и составлена хронологическая табл. 3. Через  $\sim 70$  с после самого сильного землетрясения в течение около 10 минут регистрировались инфразвуковые колебания – АС1. С учетом времени пробега акустического сигнала, время возникновения источника, которому обязано появление АС1, можно отнести к  $19^{h}07^{m}40^{s}$ . В этот период на сейсмической станции Ключи ( $\Delta = 45$  км) сигнал отсутствовал. На этом этапе извержения интенсивность акустического излучения позволила зарегистрировать АС на удалении 113 км, в то время как мощность сейсмического источника была недостаточной, чтобы сейсмический сигнал был зафиксирован на расстоянии 45 км. Как показано в работе [Фирстов и др., 1990], при гравитационных потоках мощность акустического сигнала превосходит мощность сейсмического на порядок

и более, что подтверждается инструментальными наблюдениями.

Возможность диагностики больших обвалов горных пород на основе инфразвуковых колебаний в атмосфере была показана в работе [Bedard, 1989]. Обвал горных пород и льда ледника Беринг объемом 0,05 км<sup>3</sup> с вершины Стеллера (Аляска) высотой 2,9 км 14 сентября 2005 г. породил лавину протяженностью 9,5 км. Распространение лавины сопровождалось сейсмическим и акустическим эффектами, причем двойная амплитуда инфразвукового сигнала с частотой 0,2–0,3 Гц и длительностью  $\sim 3$  минуты в Фэрбенксе на расстоянии 540 км составляла около одного Паскаля [Arnoult et al., 2005]. Этот обвал произошел на леднике Беринг, несмотря на низкую температуру тела потока. Над его поверхностью возникло турбулентное облако, которое стало источником инфразвуковых колебаний в атмосфере.

На основе этого факта в совокупности с геологическими данными можно предположить следующую схему начала извержения. Перед началом извержения скорость сейсмотектонических деформаций резко возросла, что служит свидетельством интенсивного роста напряжений в районе вулкана в результате быстрого подъема магмы к дневной поверхности. При этом механизм очага трех наиболее сильных землетрясений роя характеризуется однотипными подвижками, близкими к горизонтальному сдвигу, и хорошо вписывается в региональную систему напряжений [Зобин, 1979]. Глубина очагов, предварявших извержение, заключена в интервале 0–10 км. Исходя из энергии землетрясения, радиус очага землетрясения с  $K = 12,3$

**Таблица 3.** Последовательность сейсмических и акустических явлений начала извержения вулкана Шивелуч 11 ноября 1964 г. (Время GMT)

Событие	Время (GMT)	Характеристика событий	Визуальные данные
Землетрясение I	19:06:51	Самое сильное событие роя, $K = 12,3$	
Начало работы акустического источника №1	19:07:40	Четкое вступление	Высота пылевоздушного облака 1,5–2 км
Землетрясение II	19:13:34	$K = 11,7$ , после него землетрясений с $K > 9$ не зарегистрировано	
Окончание работы акустического источника №1	19:16:10		
Начало работы сейсмического источника	19:20:00	Вулканическое дрожание с амплитудой 0,5 мкм	Высота эруптивной колонны 7–8 км
Начало работы акустического источника №2	19:20:00	Плавное нарастание сигнала, появление колебаний с периодом ~2 мин	
Усиление амплитуд сейсмического и акустического сигналов	19:48:00		Высота эруптивной колонны 10–15 км

(19<sup>h</sup>06<sup>m</sup>51<sup>s</sup>) должен составлять единицы километров. При малой глубине очага землетрясения постройка вулкана могла быть нарушена, что привело к потере устойчивости склона и его обрушению. Обрушение склона породило обвальную лавину, отложения которой, протяженностью 16 км, выделяются по геологическим данным [Богоявленская и др., 1985]. При движении лавины часть энергии за счет сил трения «перекачалась» в энергию упругих колебаний грунта, а над телом лавины образовался пылевоздушный поток, который дал начало конвективному облаку – источнику акустических колебаний инфразвукового диапазона. Акустический источник I работал в течение ~8,5 мин, что близко к расчетному времени движения обвальной лавины, если принять среднюю скорость движения 30 м/с, которая была зафиксирована во время извержения вулкана Сент-Хеленс в 1980 г. [The 1980 eruption..., 1981].

После окончания работы первого акустического источника в течение почти 4 мин сигналы обоих видов не регистрировались. После обвала извержение не получило бурного развития, как это произошло в 1980 г. на вулкане Сент-Хеленс. Отсутствие криптокупола и большая глубина внедрения магмы обусловили инертность процесса. Только спустя 12 минут после обвала (в 19<sup>h</sup>20<sup>m</sup>) на ленте станции Ключи появилось вулканическое дрожание, одновременно начали регистрироваться воздушные волны. Появление вулканического дрожания и АС связано с началом плинианской стадии извержения. В этот период высота эруптивной тучи достигла 7–8 км.

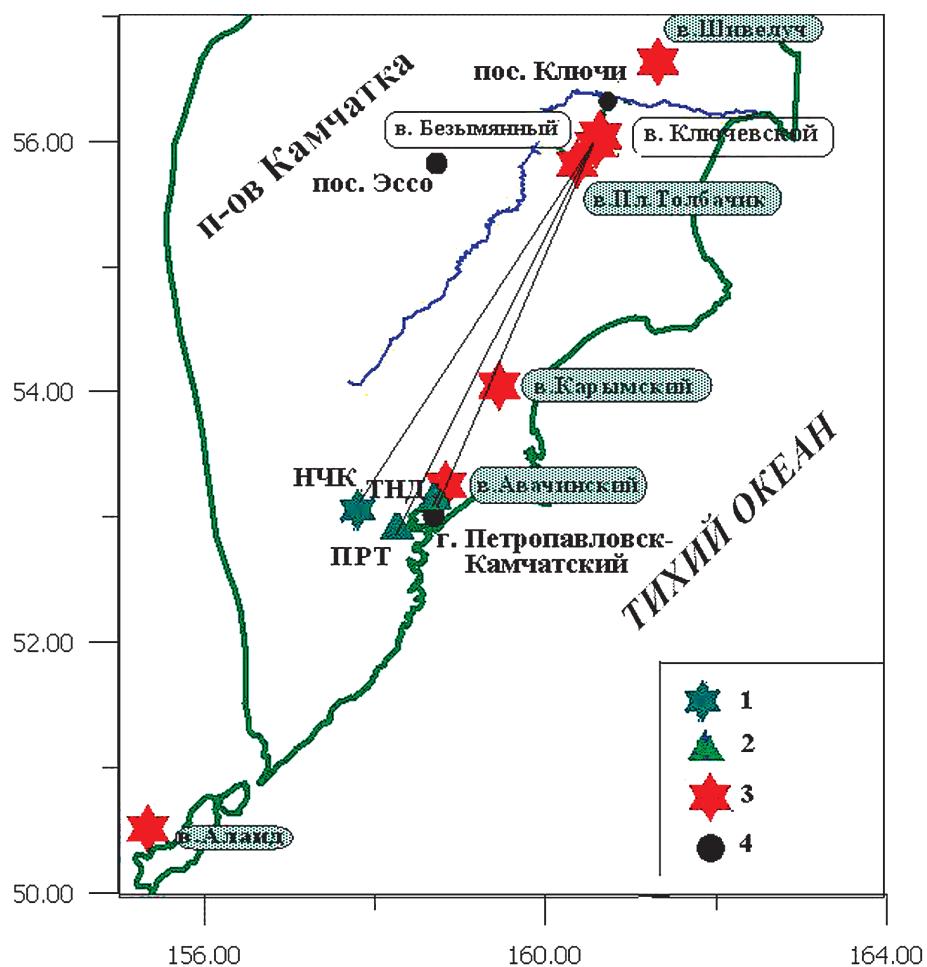
В 19<sup>h</sup>48<sup>m</sup> резко возрастает амплитуда вулканического дрожания и к этому моменту приурочена вторая положительная фаза длинноволновых возмущений в атмосфере (см. рис. 4). Интенсивность волновых возмущений в атмосфере зависит от тепловыделения в источнике. Резкое увеличение тепловыделения приводит к нарушению стационарности процесса и возникновению фазы избыточного давления в длинно-

волновой части спектра АС. Этот период извержения мы связываем с началом излияния пирокластических потоков и, возможно, с новым обвалом части постройки, отложения которого значительно увеличили мощность тепловыделения и, соответственно, высоту конвективной колонны, достигшей максимума 10–15 км.

По энергии акустического сигнала, зарегистрированного в пункте Козыревск (см. рис. 5, а) оценивалась тепловая мощность (1), на основании которой, исходя из допущения, что при сильных эксплозивных извержениях эруптивная колонна существует за счет тепла, выносимого в атмосферу мелкой пирокластикой (вулканическим пеплом), оценивался расход пепла. Время извержения определялось по характерным изменениям в АС. При плотности пепла 1,4 т/м<sup>3</sup> объем выброшенного пепла оценивается в 0,35–0,45 км<sup>3</sup>, что удовлетворительно совпадает с результатами, полученными на основании изучения продуктов извержения геологическими методами различных авторов – 0,3 км<sup>3</sup> [Богоявленская и др., 1985; Белоусов, Белоусова, 1995].

## ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ ОТ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННОГО, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ АКУСТИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ ЮЖНОЙ КАМЧАТКИ

В районе Южной Камчатки в настоящее время работают три акустические станции: IS44 – Начики, Паратурка и Тундровая.



**Рис. 7. а – схема расположения действующих вулканов и пунктов наблюдений на Камчатке.**  
1 – станция Начики (IS44); 2 – стационарные станции Паратунка и Тундровая; 3 – действующие вулканы;  
4 – населенные пункты

Все станции оснащены аппаратурой с близкими амплитудно-частотными характеристиками. Они позволяют регистрировать АС в диапазоне частот 0,003–10 Гц.

Схема размещения станций относительно наиболее активных вулканов п-ова Камчатка показана на рис. 7. Рассмотрим записи волновых возмущений, сопровождавших наиболее сильные извержения вулкана Безымянного, в период 2006–2009 гг.

#### **Волновые возмущения в атмосфере, сопровождавшие извержение вулкана Безымянного 9 мая 2006 г.**

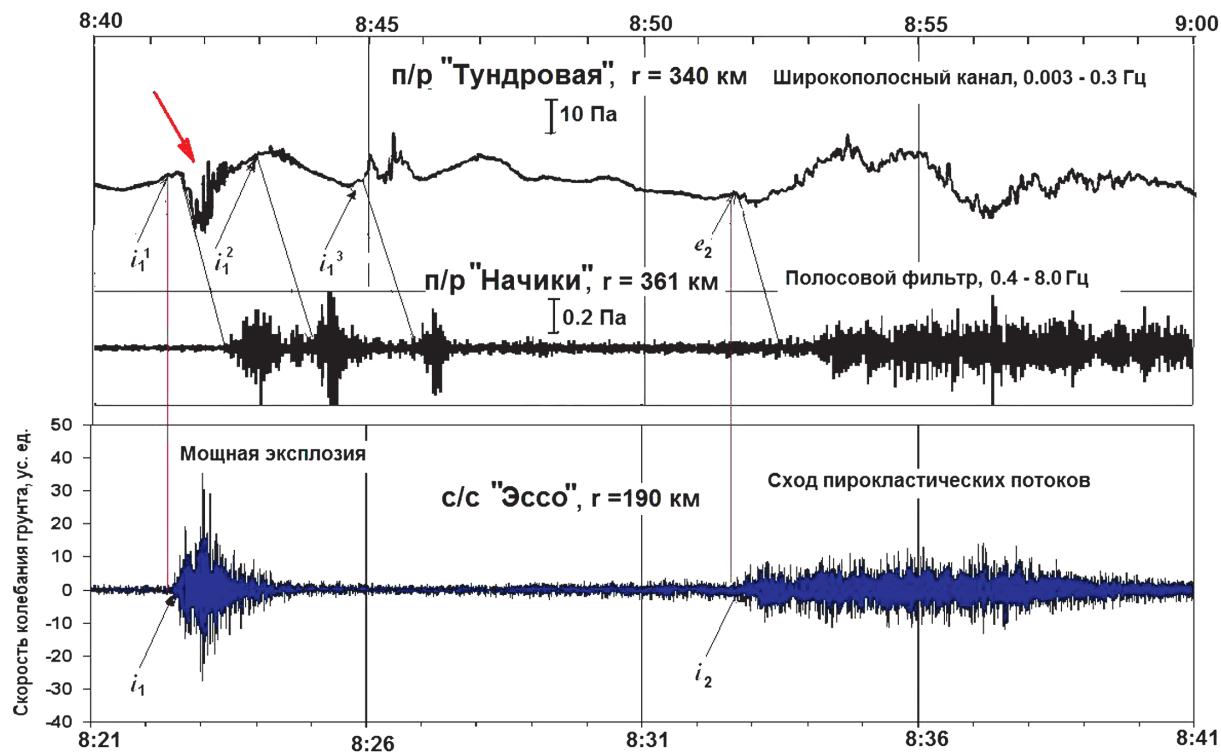
Режимные видеонаблюдения, организованные КФ ГС РАН, позволили с большой детальностью изучить динамику извержения вулкана Безымянного и выделить две фазы [Дроздин, Дроздин, 2007]:

1. Фазу декомпрессии, начавшуюся с образования парового облака высотой до 2,4 км над кратером вулкана в период 5<sup>h</sup>30<sup>m</sup> – 7<sup>h</sup>35<sup>m</sup>, после чего высота облака начала увеличиваться с одновременным

появлением над кратером пеплового шлейфа и, наконец, мощной эксплозии в 8<sup>h</sup>23<sup>m</sup>;

2. Фазу схода и формирования пирокластического потока (8<sup>h</sup>32<sup>m</sup> – 8<sup>h</sup>38<sup>m</sup>), во время которой образовалась эруптивная колонна высотой более 11 км над ур. моря.

Волновые возмущения, сопровождавшие это извержение, были зарегистрированы в пунктах регистрации Тундровая (340 км) и Начики (361 км), а сейсмический сигнал хорошо записался на с/с «Эссо» на расстоянии 190 км от вулкана [Фирстов, Тристанов, 2009]. Обе фазы активности хорошо выражены на записях акустических и сейсмического сигналов. Акустический эффект от первой фазы извержения на записях в обоих пунктах представлен тремя цугами колебаний (рис. 8). На канале с узкополосной полосой пропускания в Начики он представлен тремя цугами с  $2\Delta P \leq 0,5$  Па. На широкополосном канале в Паратунке первый цуг представлен длинноволновым возмущением с фазой длительностью около 60 с, на которую накладываются более «высокочастотные» колебания. Второй цуг «высокочастотных» колебаний



**Рис. 8.** Волновые возмущения в атмосфере, зарегистрированные микробарографами в поселках Тундровый и Начики, а также сейсмические эффекты, зарегистрированные на сейсмической станции Эссо, во время извержения вулкана Безымянного 9 мая 2006 г. Стрелкой отмечена фаза разрежения длинноволнового акустического возмущения

слабо выражен, а третий цуг представляет длинноволновое возмущение с обращением фазы на  $180^\circ$ . Как указывалось выше, «высокочастотные» колебания ( $f = 0,2\text{--}1,0$  Гц) генерируются нестационарными процессами (взрыв, сверхзвуковое истечение и т. д.) и развитой турбулентностью эруптивных облаков.

С целью оценки условий распространения АС рассматривалась стратификация метеорологических величин в тропосфере по данным радиозондирования на метеостанции Ключи. На трассе вулкан – акустические станции на высоте 9,5 км выделяется волновод толщиной не более 500 м, где скорость звука уменьшается от 0,31 до 0,26 км/с; волновод формирует последующие два цуга волн после прихода прямой волны. Второй цуг представляет отраженную волну. Третий цуг связан с распространением акустической энергии вдоль волновода.

Четко выраженное ДАВ, сопровождавшее первую фазу извержения, связано с конденсацией ювенильного перегретого пара, что подтверждается возникновением парового облака высотой до 2,4 км.

### Волновые возмущения в атмосфере, сопровождавшие извержение вулкана Безымянного 16 декабря 2009 г.

Извержение произошло в 21<sup>h</sup>44<sup>m</sup> (время GMT). К сожалению, визуальных наблюдений этого извержения из-за плохой погоды нет, но на спутниковых снимках

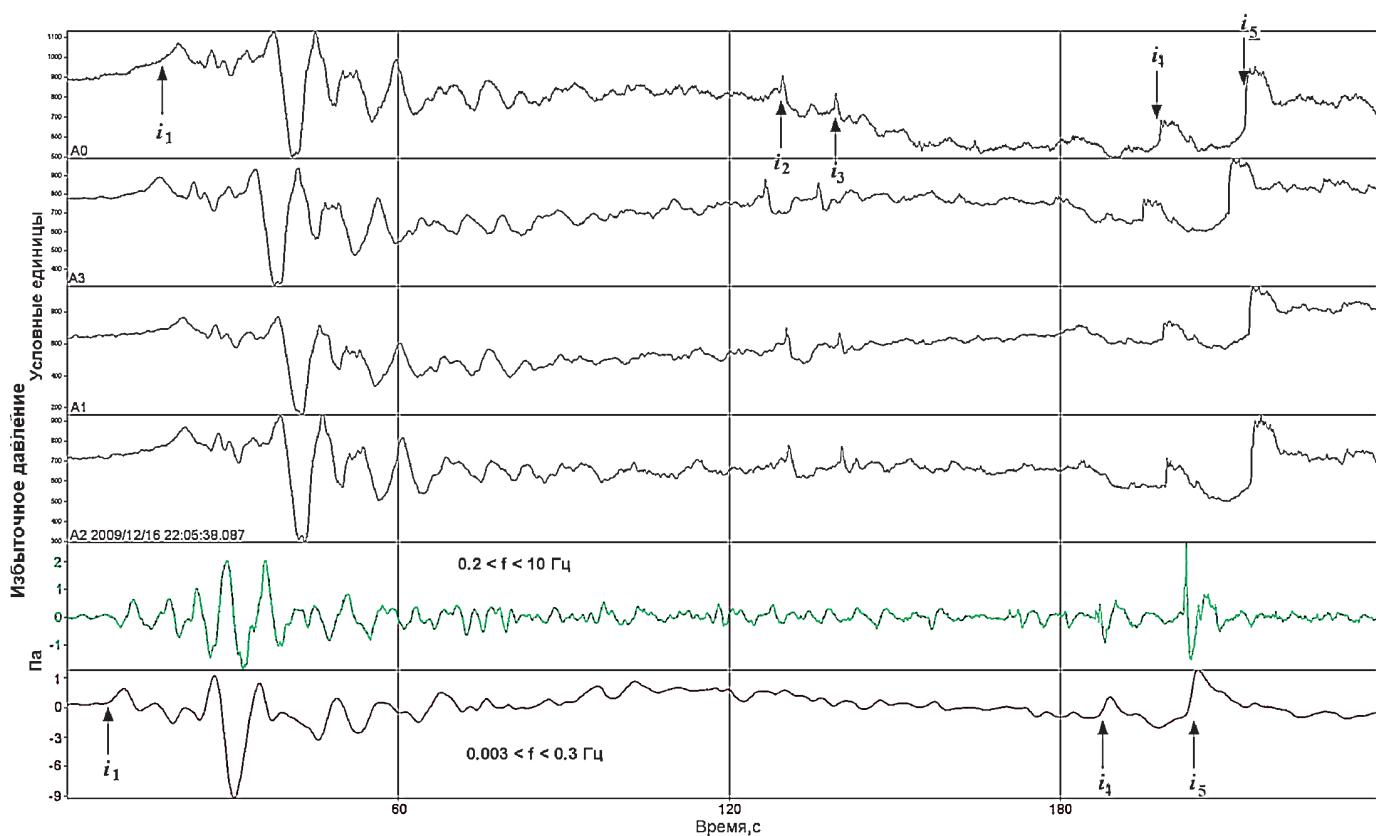
просматривались отложения продуктов извержения длиной порядка 10 км, а шлейф пепла на высоте 10–15 км, сносимый ветром восточного направления, протягивался не несколько сотен километров.

Волновые возмущения в атмосфере, сопровождавшие это извержение, были записаны на станциях Начики, (IS44) и Паратунка, а сейсмический сигнал был зарегистрирован всеми станциями района Ключевской группы вулканов.

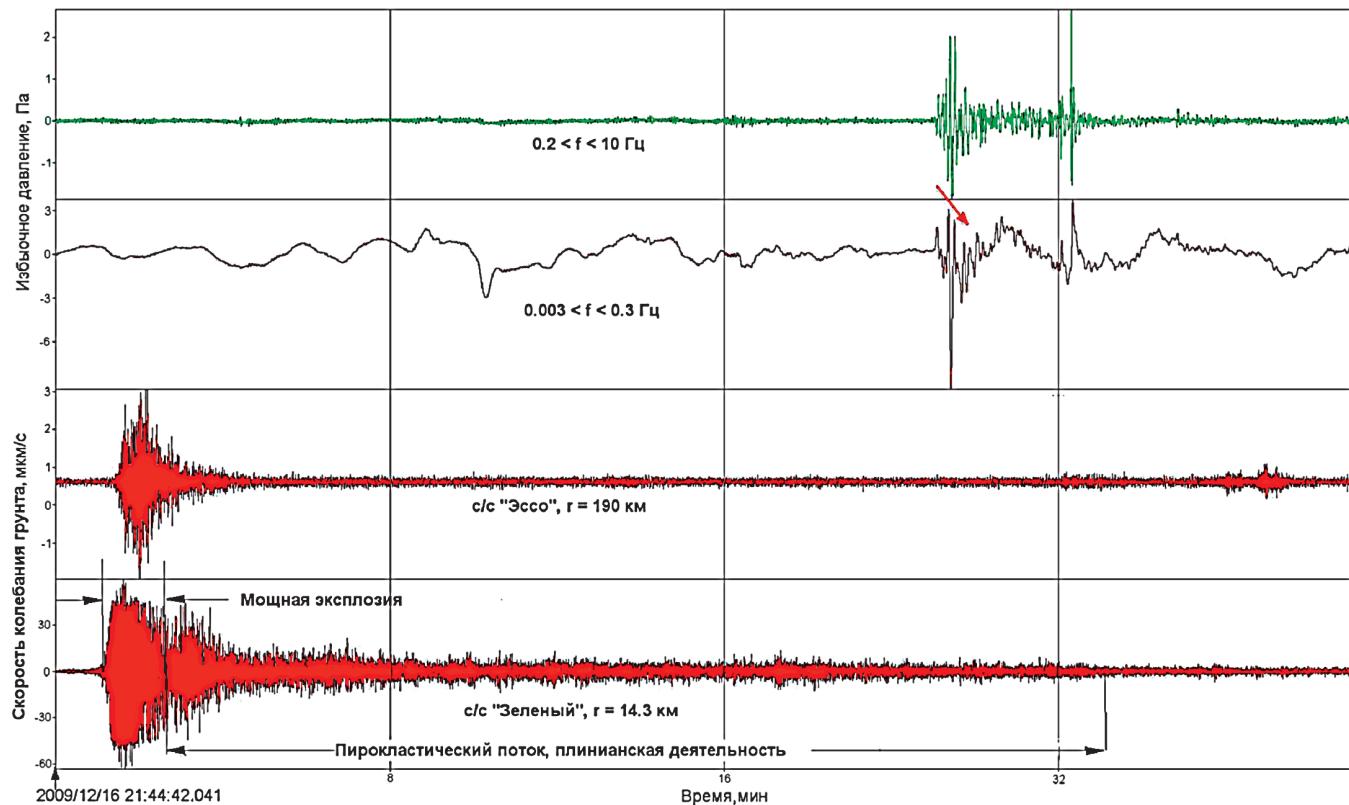
На рис. 9 показана запись акустического сигнала на четырех каналах станции Начики (IS44) и на стационарной акустической станции Паратунка (365 км). На всех каналах станции Начики четко выделяются вступления пяти отдельных групп волн, а на двух каналах станции Паратунка с различными АЧХ выделяются только три вступления.

На основании данных станции Начики рассчитывался азимут прихода фронта отдельных групп инфразвуковых волн. Азимут на источник составлял  $33,6^\circ \pm 1,7^\circ$ , в то время как азимут на вершину вулкана Безымянного был равен  $31^\circ$ . Удовлетворительное совпадение вычисленных азимутов с направлением на вулкан дает право считать, что пространственно источники отдельных групп волн связаны с процессом извержения вулкана.

На рис. 10 приведены записи акустического и сейсмического сигналов, сопровождавших извержение. Для обоих случаев характерна фаза разрежения длинноволнового акустического возмущения, которая связана



**Рис. 9.** Запись волновых возмущений, сопровождавших извержение вулкана Безымянного, на четырех каналах станции Начики (A0 – A3) и двух каналах станции Паратунка



**Рис. 10.** Волновое возмущение в атмосфере, зарегистрированное в пункте Паратунка каналами с разными АЧХ, сопровождавшее извержение вулкана Безымянного 16 декабря 2009 г., и запись соответствующего сейсмического сигнала в ближней и дальней зонах. Стрелкой отмечена фаза разрежения длинноволнового акустического возмущения

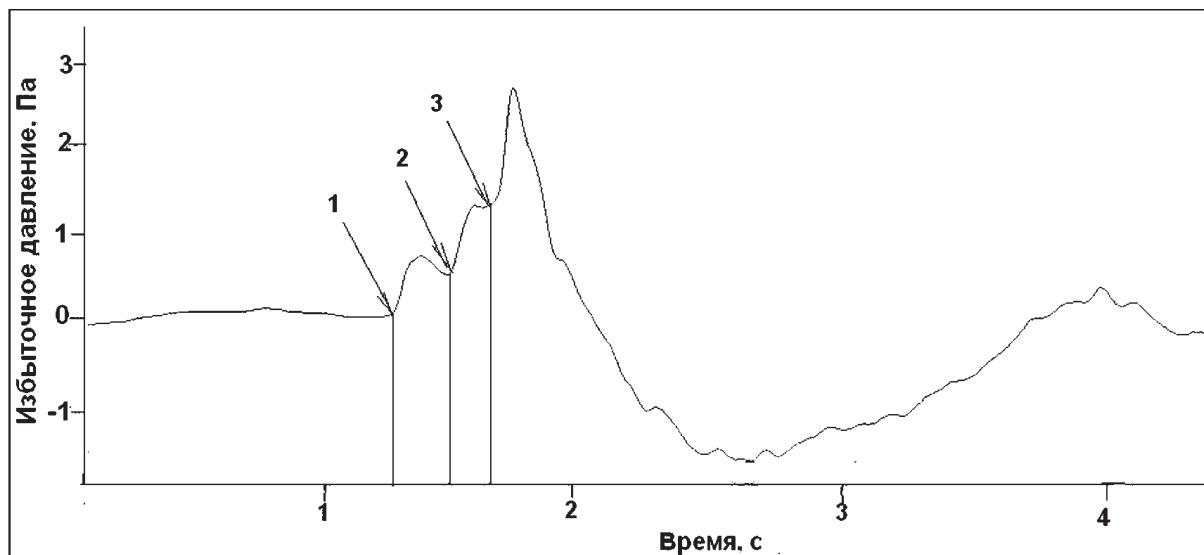


Рис. 11. Форма импульса № 5 на станции Паратунка

с конденсацией ювенильного водяного пара, выброшенного в атмосферу в результате мощной эксплозии. По амплитуде сигнал 2006 г. превосходит почти вдвое сигнал 2009 г., что говорит о большей роли ювенильного материала при извержении в 2006 г.

Сейсмический сигнал на сейсмостанции Эссо в фазе декомпрессии в обоих случаях близок как по амплитуде  $2A_{\max} \sim 5$  мкм/с, так и по длительности ( $L \sim 120$  с). В отличие от извержения 2006 г., фаза фрагментации вновь поступившей порции лавы с образованием пирокластических потоков в 2009 г. началась сразу после фазы декомпрессии и процесс был значительно слабее, чем в 2006 г., так как сейсмический сигнал этой фазы на с/с Эссо не записался, но хорошо виден на станции Зеленая, расположенной в 14,3 км от кратера вулкана.

Мощная эксплозия с последующей сразу за ней плинианской деятельностью и извержением пирокластических потоков породили конвективную колонну с достаточно большой нагрузкой пепла, что не могло не вызвать электростатические процессы в эруптивной колонне и образование молний. На рис. 11 приведена детальная форма пятого импульса. По форме импульс напоминает классическую ударную волну с длительностью фазы сжатия 0,8 с; ее передний фронт состоит из трех хорошо выраженных ступеней длительностью около 0,2 с.

Как известно, электрические процессы при вулканических извержениях связаны с их интенсивностью, типом активности и минералогическим составом извергнутых продуктов [Руленко, 1994]. Источником импульсного сигнала № 5 с большой долей достоверности можно считать вертикальный электрический разряд в эруптивном облаке, когда оно достигло наивысшей точки. В этом случае длина ступенчатого лида составила не менее 10 км.

С точки зрения генерации инфразвука разряд можно рассматривать как вертикальный линейный источник, формирующий цилиндрическую волну Лэмба, которая в некоторых случаях может распространяться в нижней тропосфере на значительные расстояния.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Динамика эксплозивных извержений находит отражение в атмосферных волновых возмущениях. При достаточно сильных извержениях здесь генерируются инфразвуковые колебания, обусловленные выносом в атмосферу большого количества мелкодисперсного, горячего материала. Сход и формирование пирокластических потоков сопровождаются генерацией акустических сигналов диапазона 0,2–1,0 Гц, связанных с жизнью турбулентного вихря в конвективной колонке. Кинематические и динамические параметры акустических сигналов определяются скоростью тепловыделения извергнутого материала. Для длинноволновых возмущений, регистрируемых во время сильных эксплозивных извержений, характерна глубокая фаза разряжения длительностью несколько минут, формирующаяся в результате конденсации паров воды ювенильного происхождения. По-видимому, этому также могут способствовать реакции окисления вулканических газов и раскаленных продуктов извержения атмосферным кислородом.

Использование акустических технологий в задачах мониторинга вулканических извержений позволяет повысить эффективность оценки прогноза пепловой опасности для авиации, который сейчас делается группой KVERT по комплексу данных (сейсмический, видео и визуальный, спутниковый).

## ЛИТЕРАТУРА

- Адушкин В.В., Гостинцев Ю.А., Фирстов П.П.* О природе воздушных волн при сильных эксплозивных извержениях // Вулканология и сейсмология. 1984. № 5. С. 3–11.
- Белоусов А.Б., Белоусова М.Г.* Извержение вулкана Шивелуч в 1964 г. (Камчатка) – плинианское извержение, предварявшееся крупномасштабным обрушением постройки // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4–5. С. 116–127.
- Богоявленская Г.Е., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В. и др.* Катастрофические извержения типа направленных взрывов на вулканах Сент-Хеленс, Безымянный, Шивелуч // Вулканология и сейсмология. 1985. № 2. С. 3–26.
- Гирина О.А., Гордеев Е.И.* Проект KVERT – снижение вулканической опасности для авиации при эксплозивных извержениях вулканов Камчатки и Северных Курил // Вест. ДВО РАН. 2007. № 2. С. 100–109.
- Горшков Г.С., Дубик Ю.М.* Направленный взрыв на вулкане Шивелуч // Вулканы и извержения. М.: Наука, 1969. С. 3–37.
- Гостинцев Ю.А., Суханов Л.А., Соловьев А.Ф.* Предельные законы нестационарных свободновосходящих турбулентных конвективных движений в атмосфере // Докл. РАН. 1980. Т. 252, № 2. С. 311–315.
- Гостинцев Ю.А., Иванов Е.А., Куличков С.Н. и др.* О механизме генерации инфразвуковых волн в атмосфере большими пожарами // Докл. РАН. 1985. Т. 283, № 3. С. 573–576.
- Гостинцев Ю.А., Шацкий Ю.В.* Генерация длинноволновых акустических возмущений в атмосфере всплывающими продуктами горения и взрыва. Препринт. Черноголовка, 1989. 33 с.
- Дроздин В.А., Дроздин Д.В.* Активность вулкана Безымянного 9.05.2006 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 1. Вып. 9. С. 105–110.
- Зобин В.М.* Динамика очага вулканических землетрясений. М.: Наука, 1979. 90 с.
- Руленко О.П.* Экспериментальное исследование электризации вулканических облаков. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб., 1994. 21 с.
- Токарев П.И.* Гигантское извержение вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. и его предвестники // Физика Земли. 1967. № 9. С. 11–22.
- Фирстов П.П.* Реконструкция динамики катастрофического извержения вулкана Шивелуч 11 ноября 1964 г. на основании данных о волновых возмущениях в атмосфере и вулканическом дрожании // Вулканология и сейсмология. 1996. № 4–5. С. 33–47.
- Фирстов П.П.* Вулканические акустические сигналы диапазона 1,0–10 Гц и их связь с эксплозивным процессом. Петропавловск-Камчатский, 2003. 90 с.
- Фирстов П.П., Адушкин В.В., Сторчеус А.В.* Ударные воздушные волны, зарегистрированные во время Большого трещинного Толбачинского извержения в сентябре 1975 г. // Докл. РАН. 1978а. Т. 259, № 5. С. 1078–1081.
- Фирстов П.П., Кравченко В.М.* Некоторые особенности начала пароксимального извержения вулкана Карымский в мае 1970 г. по сейсмическим и акустическим данным // Тезисы докладов VI всесоюзного вулканологического совещания. Вып. 1. Вулканическая деятельность, ее механизм, связь с геодинамикой; прогноз извержений и землетрясений. 1985. С. 182.
- Фирстов П.П., Суханов А.А., Пергамент В.Х., Радионовский М.В.* Акустические и сейсмические сигналы от снежных лавин // Докл. РАН. Т. 312, № 1. 1990. С. 67–71.
- Фирстов П.П., Токарев П.И., Лемзиков В.К.* Киносъемка выбросов и схема эксплозивного процесса вулкана Карымского // Бюлл. вулк. станции. 1978б. № 55. С. 27–35.
- Фирстов П.П., Тристанов А.Б.* Особенности процесса генерации волновых возмущений в атмосфере во время извержений пирокластических потоков и мощной эксплозивной деятельности андезитовых вулканов // Материалы ежегодной конференции, посвящ. Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. С. 50–61.
- Arnoult K.M., Wilson C.R., Olson J.V., Szuberla C.A.* Infrasound associated with Mt. Steller avalanche // Infra Matics. 2005. № 12. P. 4–8. <http://www.inframatics.org/newsletter.html>
- Bedard A.J.* Detection of avalanches using atmospheric infrasonic // 57<sup>th</sup> Ann. Western Snow Conference. Fort Collins, Colorado. April 18–20. 1989. P. 52–58.
- Firstov P.P.* Wave perturbation in the atmosphere as a method of remote monitoring of volcanic eruptions // Intern. Volcanol. Congress. JAVEI. Ankara. Theme 7. 1994.
- Firstov P.P.* Wave disturbances in the atmosphere as a source of information on dynamics of volcanic eruptions // EOS. 1996. F 813. V. 318–3.
- Neal C., Girina O., Senyukov S., Rybin A. et al.* Russian eruption warning systems for aviation // Natural Hazards. Springer Netherlands. V. 51, № 2. November 2009. P. 245–262.
- Sparks R.S., Bursik M.I., Carey S.N. et al.* Volcanic plumes. Waley. 1997. 573 p.
- The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington. Washington: D.C., 1981. 843 p.

# СОДЕРЖАНИЕ

<i>Ю.Г. Гатинский, Д.В. Рундквист, Г.Л. Владова, Т.В. Прохорова</i> СЕЙСМО-ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ГЛАВНЕЙШИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ РОССИИ И БЛИЖНЕГО ЗАРУБЕЖЬЯ . . . . .	13
<i>В.И. Осипов, Н.И. Фролова, С.П. Сущев, В.И. Ларионов</i> ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОГО И ПРИРОДНОГО РИСКА ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ И ТЕРРИТОРИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ . . . . .	28
<i>В.И. Величкин, Б.П. Власов, М.В. Шумилин</i> ОСНОВНЫЕ ПРОМЫШЛЕННО-ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ БЫВШЕГО СССР И РОССИИ . . . . .	49
<i>С.А. Дмитриев, В.И. Величкин, Б.И. Омельяненко</i> ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЖИДКИХ ОТХОДОВ НИЗКОГО И СРЕДНЕГО УРОВНЕЙ РАДИОАКТИВНОСТИ . . . . .	64
<i>В.И. Величкин, В.И. Мальковский, Н.Н. Тарасов, Ю.П. Диков</i> АНАЛИЗ УСЛОВИЙ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ В РАЙОНЕ ОЗЕРА КАРАЧАЙ (ЧЕЛЯБИНСКАЯ ОБЛАСТЬ) . . . . .	77
<i>Б.И. Омельяненко, В.И. Величкин, С.В. Юдинцев</i> ПОВЕДЕНИЕ АКТИНИДОВ В УСЛОВИЯХ ДОЛГОСРОЧНОГО ХРАНЕНИЯ И ЗАХОРОНЕНИЯ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА . . . . .	86
<i>С.В. Юдинцев, Б.И. Омельяненко</i> ГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ИЗОЛЯЦИИ ТЕХНЕЦИЯ . . . . .	99
<i>И.Н. Солодов, А.К. Лисицын</i> ПОЛИЭЛЕМЕНТНЫЕ ЭКЗОГЕННЫЕ ЭПИГЕНЕТИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ УРАНА: ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ И МЕТАЛЛЫ, ИЗВЛЕКАЕМЫЕ СЕРНОКИСЛОТНЫМ ПОДЗЕМНЫМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕМ . . . . .	109
<i>В.А. Петров, В.В. Полуэктов, Р.М. Насимов, А.А. Бурмистров, С.И. Щукин, Й. Хаммер</i> ИЗУЧЕНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА УРАНОВОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ В ГРАНИТАХ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОЯТ . . . . .	124
<i>В.М. Котляков, Л.Н. Васильев, М.Ю. Москалевский</i> БАЛАНС МАССЫ АНТАРКТИЧЕСКОГО ЛЁДНИКОВОГО ПОКРОВА . . . . .	139

<i>Ю.Я. Мачерет, А.Ф. Глазовский, И.И. Лаврентьев</i> ВОДА В ПОЛИТЕРМИЧЕСКИХ И ТЕПЛЫХ ЛЕДНИКАХ . . . . .	152
<i>В.Н. Михаленко, С.С. Кутузов, О.В. Нагорнов, С.А. Тюфлин, И.И. Лаврентьев, С.А. Марченко, В.И. Окопный</i> СТРАТИГРАФИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ФИРНОВО-ЛЕДЯНОЙ ТОЛЩИ НА ЗАПАДНОМ ПЛАТО ЭЛЬБРУСА . . . . .	180
<i>Ю.П. Масуренков, А.Л. Собисевич</i> ЭЛЬБРУССКОЕ ОЛЕДЕНЕНИЕ – ИНДИКАТОР ГЕОТЕРМИЧЕСКОГО И ФЛЮИДНОГО СОСТОЯНИЯ ВУЛКАНА . . . . .	189
<i>А.Н. Хименков, Г.З. Перльштейн, Д.О. Сергеев, А.Н. Власов, В.П. Мерзляков, Ю.В. Халилова</i> ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ РИСКА ОПАСНЫХ ПРОЦЕССОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ . . . . .	205
<i>Е.В. Коротеева, Е.И. Вейсберг, Н.Б. Куянцева, С.А. Лесина</i> ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ДИНАМИКУ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ВОСТОЧНЫХ ПРЕДГОРИЙ ЮЖНОГО УРАЛА . . . . .	213
<i>А.Ю. Кудеярова</i> ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНЫХ СОРБЦИОННЫХ БАРЬЕРОВ ПРИ ЗАФОСФАЧИВАНИИ КИСЛЫХ ПОЧВ . . . . .	223
<i>И.В. Галицкая, И.А. Позднякова, Л.С. Томс</i> МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ПРОГНОЗА И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОПРИРОДНЫМ ГЕОХИМИЧЕСКИМ РИСКОМ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ . . . . .	239
<i>Л.С. Кучмент, А.Н. Гельфан</i> СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ И ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ МАШТАБОВ И РИСКА КАТАСТРОФИЧЕСКИХ НАВОДНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА . . . . .	252
<i>В.В. Адушкин, П.П. Фирстов</i> ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛОЗИВНЫХ ПРОЦЕССОВ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ И ИХ ПРОЯВЛЕНИЕ В ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ В АТМОСФЕРЕ . . . . .	264
<i>А.Ю. Озеров</i> МЕХАНИЗМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ФОНТАНИРОВАНИЯ БАЗАЛЬТОВЫХ ВУЛКАНОВ (ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ И ПРИРОДНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ) . . . . .	279
<i>О.В. Руденко, А.Л. Собисевич, Л.Е. Собисевич</i> О ФИЗИКЕ АКУСТИЧЕСКИХ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ И МЕДЛЕННЫХ ВОЛНАХ В ГРАНУЛИРОВАННОЙ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННОЙ СРЕДЕ . . . . .	299
<i>В.Н. Николаевский</i> ОЧАГ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ – СОБЫТИЯ И ПРЕДВЕСТИКИ УДАРА . . . . .	316
<i>Б.В. Левин, Г.В. Шевченко, В.М. Кайстренко, Т.Н. Ивельская, Т.К. Пинегина, Н.Г. Разжигаева</i> ПРОБЛЕМА ЦУНАМИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ (ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ АСПЕКТ) . . . . .	332
<i>В.А. Семенов, И.И. Мохов, М. Латиф</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В РЕГИОНАХ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ . . . . .	355

---

<i>Ю.Н. Авсюк, А.Л. Собисевич</i>	
ПРИЛИВНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СИСТЕМЫ ЗЕМЛЯ – ЛУНА – СОЛНЦЕ	
И ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЗЕМЛИ . . . . .	373
<i>В.Ч. Хон, И.И. Мохов</i>	
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА К ИЗМЕНЕНИЮ ОРБИТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ	
И КОНЦЕНТРАЦИИ АНТРОПОГЕННЫХ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ . . . . .	392
<i>В.М. Григорьев, Л.В. Ермакова, А.В. Мордвинов, Ю.А. Наговицын, А.Г. Тлатов,</i>	
<i>В.Г. Иванов, Е.В. Милецкий, Е.Ю. Наговицына, А.И. Хлыстова, С.А. Язев</i>	
ВОЗНИКНОВЕНИЕ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА СОЛНЦЕ, ИЗМЕНЕНИЯ ЕГО ГЛОБАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ	
В 11-ЛЕТНЕМ ЦИКЛЕ И НА ДЛИТЕЛЬНОЙ ШКАЛЕ ВРЕМЕНИ . . . . .	399
<i>С.И. Сороко, В.П. Рожков, Е.Г. Сергеева, С.С. Бекшаев, С.С. Андреева, И.В. Николаев</i>	
ОСОБЕННОСТИ МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ	
И ГЕМОДИНАМИКИ МОЗГА У ДЕТЕЙ И ПОДРОСТКОВ	
В УСЛОВИЯХ ЕВРОПЕЙСКОГО И ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО СЕВЕРА . . . . .	413

Научное издание

# ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПРИРОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И КАТАСТРОФЫ

В 2 томах

Том 2

## ГЕОЛОГИЯ УРАНА, ГЕОЭКОЛОГИЯ, ГЛЯЦИОЛОГИЯ

*Печатается по решению Научного совета Программы  
фундаментальных исследований президиума РАН № 4*

Ответственный составитель д.ф.-м.н. Собисевич Алексей Леонидович

Технический редактор В.И. Горбенко  
Компьютерная верстка К.А. Мордвинцев  
Корректор С.Б. Суслова

Подписано в печать 05.09.11. Формат 60×90/8  
Гарнитура Таймс. Бумага мелованная. Печать офсетная  
Усл. печ. л. 54. Тираж 200 экз.

ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН  
123995 ГСП-5, Д-242, Москва, ул. Б. Грузинская, 10

Отпечатано в типографии издательства «ПРОБЕЛ 2000»  
109544 Москва, ул. Рабочая, 91