

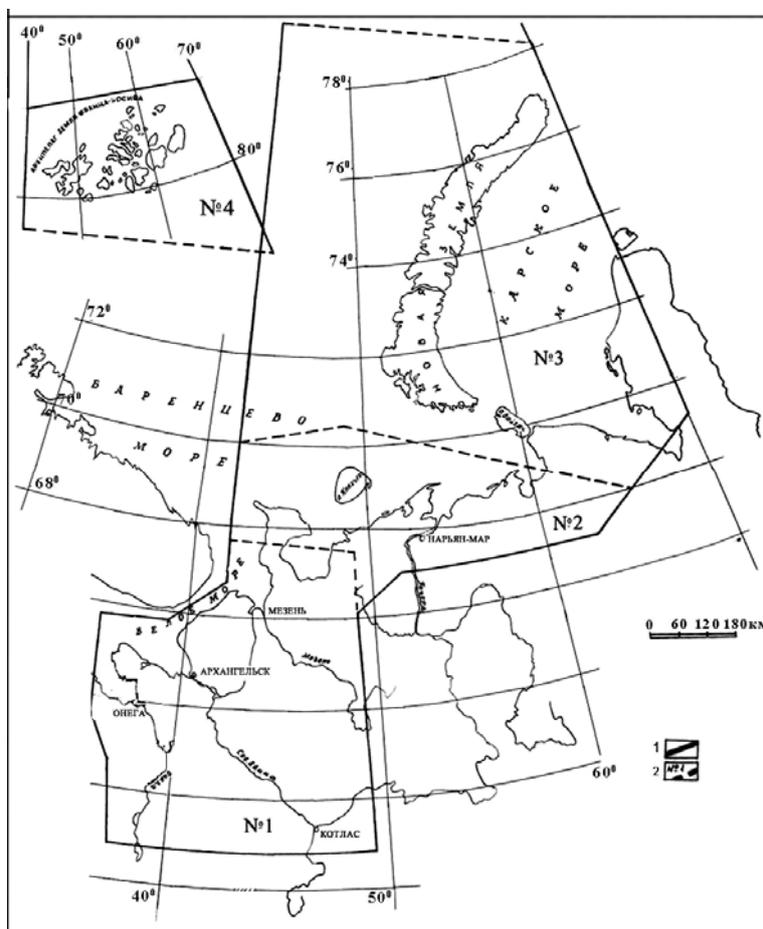
**АРХАНГЕЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ**

**В.И. Французова<sup>1,2</sup>, Я.В. Конечная<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт экологических проблем Севера УрО РАН, г. Архангельск, [vifrancuzova@gmail.com](mailto:vifrancuzova@gmail.com)

<sup>2</sup>Сектор сейсмомониторинга Севера Русской плиты ГС РАН,  
г. Архангельск, [arh\\_seismo@yandex.ru](mailto:arh_seismo@yandex.ru)

Анализ сейсмических событий Севера Русской плиты выполнялся, как и в [1], для части территории региона XIV – «Восточно-Европейская платформа» [2], в пределах 16-угольника (1.  $\varphi=60.8^{\circ}\text{N}$ ,  $\lambda=49.3^{\circ}\text{E}$ ; 2.  $\varphi=60.8^{\circ}$ ,  $\lambda=38.5^{\circ}$ ; 3.  $\varphi=62.6^{\circ}$ ,  $\lambda=37.0^{\circ}$ ; 4.  $\varphi=63.6^{\circ}$ ,  $\lambda=35.9^{\circ}$ ; 5.  $\varphi=65.3^{\circ}$ ,  $\lambda=35.5^{\circ}$ ; 6.  $\varphi=65.8^{\circ}$ ,  $\lambda=35.7^{\circ}$ ; 7.  $\varphi=65.8^{\circ}$ ,  $\lambda=39.0^{\circ}$ ; 8.  $\varphi=66.7^{\circ}$ ,  $\lambda=42.0^{\circ}$ ; 9.  $\varphi=82.0^{\circ}$ ,  $\lambda=42.0^{\circ}$ ; 10.  $\varphi=82.0^{\circ}$ ,  $\lambda=70.0^{\circ}$ ; 11.  $\varphi=68.5^{\circ}$ ,  $\lambda=70.0^{\circ}$ ; 12.  $\varphi=67.0^{\circ}$ ,  $\lambda=62.0^{\circ}$ ; 13.  $\varphi=67.0^{\circ}$ ,  $\lambda=52.0^{\circ}$ ; 14.  $\varphi=65.1^{\circ}$ ,  $\lambda=49.1^{\circ}$ ; 15.  $\varphi=64.8^{\circ}$ ,  $\lambda=50.5^{\circ}$ ; 16.  $\varphi=60.8^{\circ}\text{N}$ ,  $\lambda=49.3^{\circ}\text{E}$ ), изображенного на рис. 1.



**Рис. 1.** Карта территории ответственности, контролируемой сейсмическими станциями Архангельской сети

1, 2 – граница региона и района соответственно; названия районов и их номера: Беломорско-Двинской (№ 1), Тимано-Печерский (№ 2), Новоземельско-Пайхойский (№ 3), Земля Франца-Иосифа (№ 4).

**Сеть станций.** Дополнительно к описанным в [1] пяти цифровым станциям – «Архангельск», «Климовская», «Пермогорье», «Гамица», «Пермилово» запущены две новые станции – «Лешуконское» с 18 октября 2006 г. и «Соловки» – с 26 октября 2007 г. (табл. 1, 2; рис. 2).

**Таблица 1.** Сейсмические станции Архангельской сети, работавшие в 2006–2007 гг. (в хронологии их открытия)

№	Станция		Дата открытия	Координаты		$h_y$ , м	Подпочва	Ведомственная организация
	Название	Код		$\varphi^\circ$ , N	$\lambda^\circ$ , E			
1	Архангельск	ARHR	03.11.2002	64°33'029"	40°30'56.2"	23	Рыхлые отложения	ИЭПС УрО РАН
2	Климовская	KLMR	25.11.2003	60°51'14"	39°31'07"	157	Валунно-галечниковые отложения, глины, пески	ГС РАН
3	Пермогорье	PRGR	27.11.2003	61°38'10"	45°37'38"	84	Оргалиты, песчаники, известняки	ГС РАН
4	Тамица	TMCR	28.11.2003	64°09'51"	38°02'07"	23	Валунно-галечниковые отложения, глины, пески	ГС РАН
5	Пермилово	PRMR	28.11.2005	63°36'56"	40°30'56"	52	Оргалиты, песчаники, известняки	ИЭПС УрО РАН
6	Лешуконское	LSHR	18.10.2006	64°52'12"	45°43'48"	60	Валунно-галечниковые отложения, глины, пески	ИЭПС УрО РАН
7	Соловки	SLVR	26.10.2007	65°01'12"	35°42'36"	8	Валунно-галечниковые отложения, глины, пески	ИЭПС УрО РАН

**Таблица 2.** Данные об аппаратуре цифровых станций в 2007 г.

Название и местоположение станции	Тип АЦП и сейсмометра	Перечень каналов	Частотный диапазон, Гц	Частота опроса, Гц	Разрядность АЦП	Чувствительность, велосиграф-отсчет/(м/с)
«Климовская» д. Климовская, Коношенский р-н	SDAS+CM-3-KB	SH (N, E, Z)	0.5–16	40	16	$1.08 \cdot 10^{10}$
	SDAS+CM-3-KB	SL (N, E, Z)	0.5–16	40	16	$3.38 \cdot 10^8$
	SDAS+CM-3-OC	BH (N, E, Z)	0.02–7	20	16	$7.19 \cdot 10^9$
	SDAS+CM-3-OC	BL (N, E, Z)	0.02–7	20	16	$2.24 \cdot 10^8$
«Пермогорье» д. Пермогорье Красноборский р-н	SDAS+CM-3-KB	SH (N, E, Z)	0.5–16	40	16	$1.09 \cdot 10^{10}$
	SDAS+CM-3-KB	SL (N, E, Z)	0.5–16	40	16	$3.41 \cdot 10^8$
«Тамица» д. Тамица Онежский р-н	SDAS+CM-3-KB	SH (N, E, Z)	0.5–16	40	16	$1.08 \cdot 10^{10}$
	SDAS+CM-3-KB	SL (N, E, Z)	0.5–16	40	16	$3.36 \cdot 10^8$
«Архангельск» г. Архангельск	SDAS+CM-3-KB	SH (N, E, Z)	0.5–6	20	16	$2.00 \cdot 10^{10}$
	SDAS+CM-3-KB	SL (N, E, Z)	0.5–6	20	16	$2.63 \cdot 10^{10}$
«Пермилово» пос. Самодед Плесецкий р-н	GSR-24+CMG-40T	SH (N, E, Z)	0.5–20	50	24	$3.10 \cdot 10^{16}$
«Лешуконское» с. Лешуконское, Лешуконский р-н	GSR-24+CMG-3ESP	BH(N, E, Z)	0.033–20.6	50	24	$3.10 \cdot 10^{16}$
«Соловки» (SLVR) пос. Соловецкий Приморский р-н	GSR-24+CMG-40T	SH(N, E, Z)	1–20.6	50	24	$3.10 \cdot 10^{16}$

Новые станции оснащены комплектом короткопериодной цифровой аппаратуры с АЦП GSR-24 разработки фирмы «Geosig-LTD» и короткопериодными датчиками CMG-3ESP и CMG-40T соответственно. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) датчиков CM-3 и CMG приведены на рис. 3.

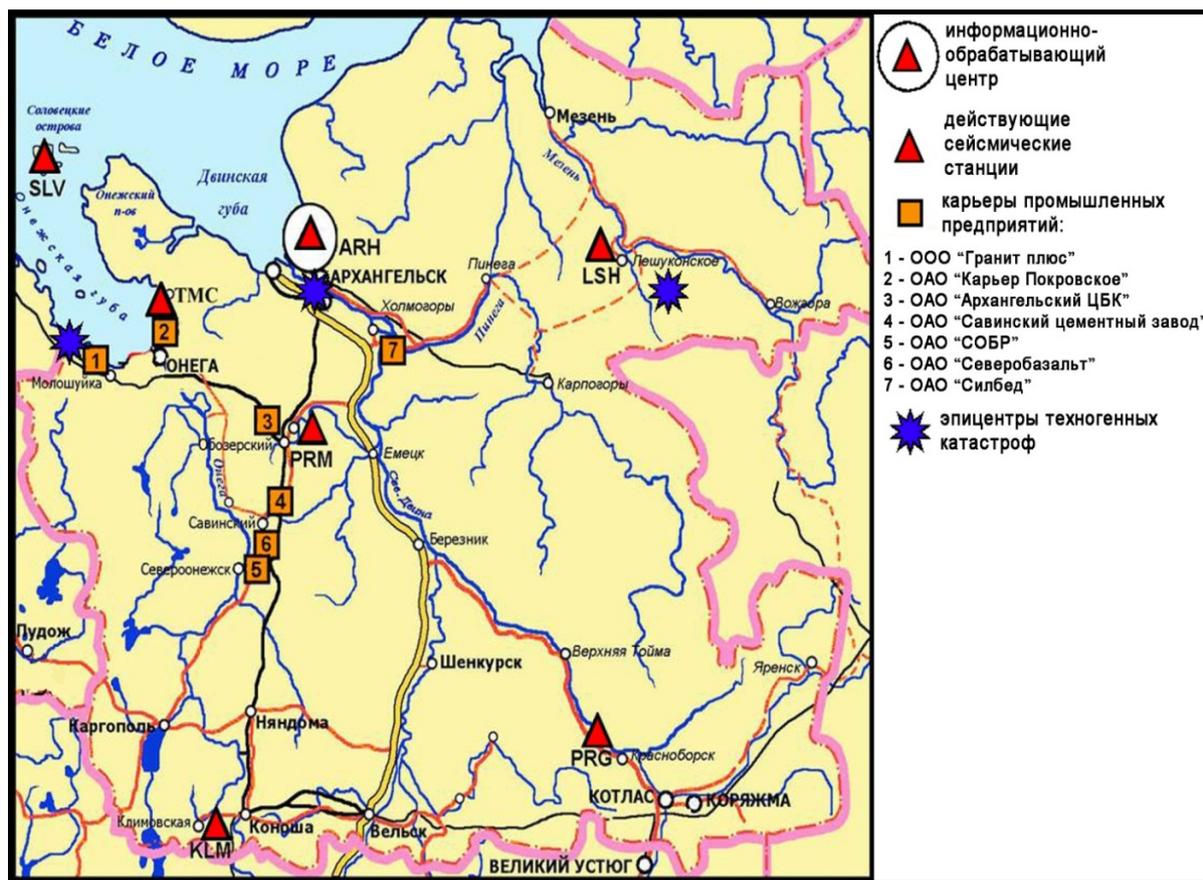


Рис. 2. Сейсмические станции Архангельской сети в 2007 г. и эпицентры техногенных катастроф в 2006 и 2007 гг.

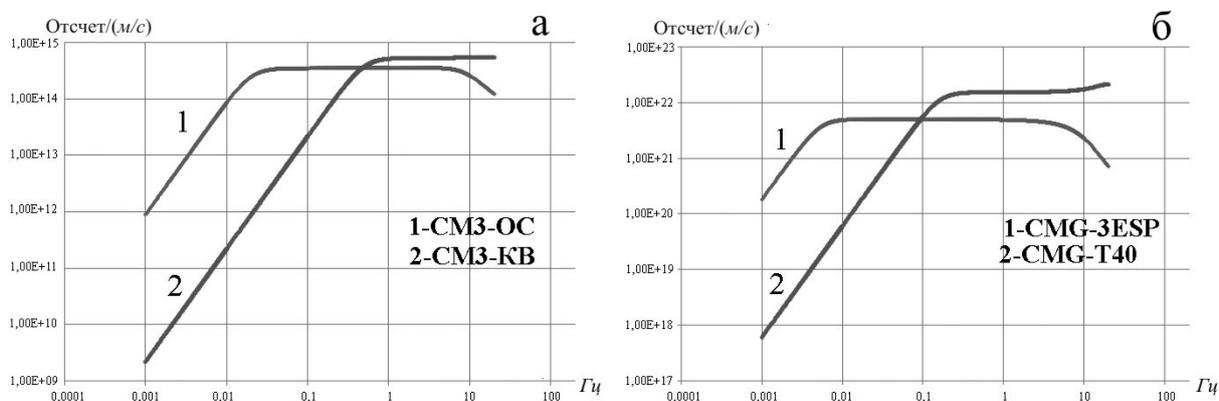


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика датчиков CM-3(а) и CMG(б)

**Методика обработки и сохранения данных** детально описана в [1]. Тектонических землетрясений на территории Архангельской области в 2006–2007 гг. не наблюдалось, записывались и анализировались лишь удаленные землетрясения в телесеismicкой зоне, а в ближней зоне – исключительно техногенные события.

**Техногенная сейсмичность** регистрировалась в большей части от воздействий карьерных взрывов, не представляющих особого интереса. Более значимыми оказались записи и их исследования трех техногенных катастроф:

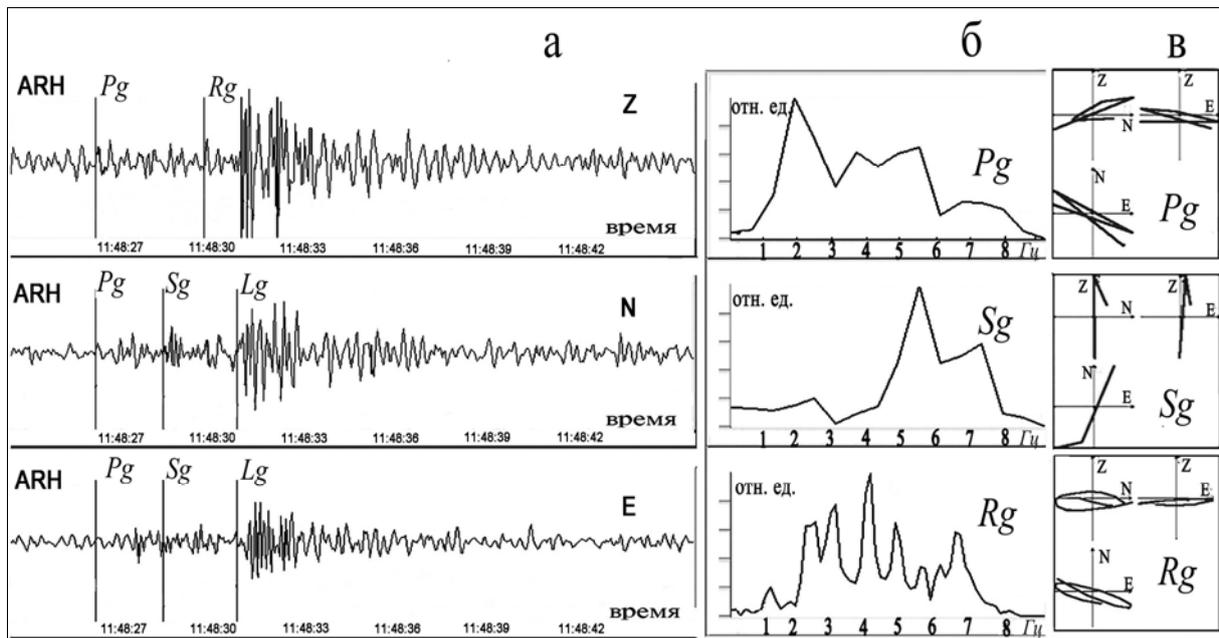
- 1 – взрыва на Соломбальском доке;
- 2 – от падения ступени ракеты «Булава»;

3 – от падения топливной ступени ракеты, запущенной с космодрома «Плесецк». Ниже рассматривается подробно каждая из них.

**1. Взрыв**, произошедший 16 марта 2006 г. в  $11^{\text{h}}48^{\text{m}}16^{\text{s}}$  на Соломбальском доке завода «Красная кузница», был зарегистрирован в г. Архангельск станцией «Архангельск», через два года после первого, зарегистрированного здесь же и этой же станцией 15.03.2004 г. Взрыв явился следствием аварии, произошедшей при сварочных работах на топливных баках плашкоута «Вайново», и сопровождался человеческими жертвами [3]. Для этого взрыва условия возбуждения сейсмических волн характеризуются следующим образом. Техногенный взрыв произошел в ближней ( $\Delta \approx 2-3$  км) зоне, где  $\Delta$  – эпицентральное расстояние от эпицентра взрыва до пункта регистрации, трасса распространения сейсмических волн включает дно р. Северная Двина.

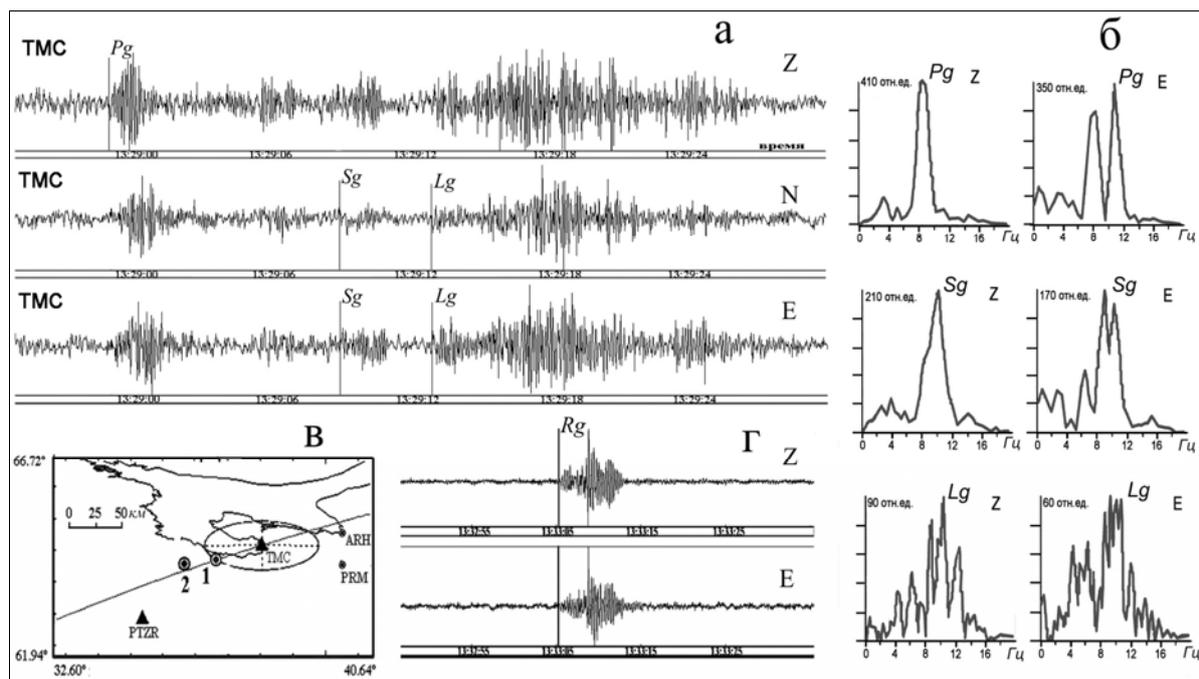
Волновые формы и фрагменты обработки коротких участков записи этого события представлены на рис. 4. Энергетическая оценка взрыва проведена по палетке Т.Г. Раутиан [4] и равна  $K_p=6.8$  с пересчетом в магнитуду  $M=1.6$  по формуле Раутиан [5]:

$$K_p=4+1.8 M.$$



**Рис. 4.** Волновые формы записи (а), спектры  $Pg$ -,  $Sg$ - и  $Rg$ -волн (б), диаграммы движения частиц (в) взрыва 16.03.2006 г. в  $11^{\text{h}}48^{\text{m}}16^{\text{s}}$  на плашкоуте «Вайново» в г. Архангельск

**2. Падение ступени ракеты «Булава»** зарегистрировано сейсмической станцией «Тамица» (место падения см. на рис. 5) как сейсмический отклик геологической среды на пограничном с соседней Карелией участке. Запуск ракеты производился с подводной лодки 25.10.2006 г. в  $13^{\text{h}}28^{\text{m}}34^{\text{s}}$  (время по Гринвичу). Трасса распространения сейсмических волн от места падения ракеты «Булава» на участке сопредельной Карелии, на расстоянии 84 км от станции «Тамица», проходила в зоне выхода Балтийского щита на Русскую платформу. Отметим, что при производстве техногенного взрыва в приземном слое атмосферы возникает акустический фронт, движущийся вдоль поверхности земли, который при взаимодействии с низкоскоростным слоем земной поверхности способствует возбуждению всех типов сейсмических волн, в том числе поверхностной волны, распространяющейся с фазовой скоростью, близкой к скорости звука [6]. В рассматриваемом случае произошло взаимодействие акустической волны с твердой средой, состоящей из низкоскоростного осадочного слоя, с фазовой скоростью, сравнимой со скоростью звука в воздухе (300–350 м/с), лежащего на высокоскоростном полупространстве, что привело к возникновению ударно-взрывной (сейсмоакустической) волны [7, 8]. Волновые формы этой волны представлены на рис. 5 г и ниже, отдельно, на рис. 7. На рис. 5 в показаны два решения эпицентра падения по данным двух служб: (1) – Архангельского информационно-обрабатывающего центра (АИОЦ); (2) – Карельского научного центра (КарНЦ в г. Петрозаводске).



**Рис. 5.** Волновые формы записи падения ступени ракеты «Булава» 25.10.2006 г. в  $13^{\text{h}}28^{\text{m}}34^{\text{s}}$  с  $K_p=8.7$  (а); спектры записи вертикальной (Z) и горизонтальной (E) составляющих Pg-, Sg- и Rg-волн (б); сейсмические станции («Петрозаводск»–PTZR и «Тамица»–TMC) и, соответственно, два решения (1, 2) эпицентра падения ступени (в); вертикальная и горизонтальная составляющие волновых форм сейсмоакустической волны (г)

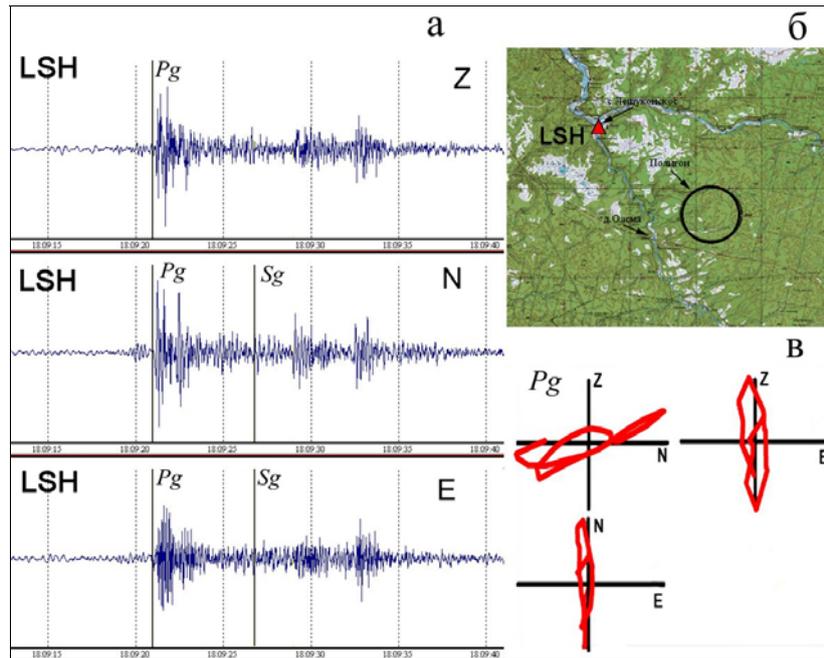
Результаты обработки данных от падения ступени ракеты следующие: по данным Архангельской службы (АИОЦ) на станции «Тамица» (TMC) –  $t_0=13^{\text{h}}28^{\text{m}}34.0^{\text{s}}$ ,  $\varphi_1=63.70^{\circ}\text{N}$ ,  $\lambda_1=35.65^{\circ}\text{E}$ ; службы Института геологии Карельского научного центра РАН (ИГ КарНЦ РАН) на станции «Петрозаводск» (PTZR) –  $t_0=13^{\text{h}}29^{\text{m}}57.19^{\text{s}}$ ,  $\varphi_2=63.56^{\circ}\text{N}$ ,  $\lambda_2=35.65^{\circ}\text{E}$ . Предположительно ударно-воздушная волна регистрируется через  $\Delta t=04^{\text{m}}07^{\text{s}}$  после начала вступления сейсмических волн. Сопоставление полученных решений эпицентра этого события двумя службами (рис. 5 в) показывает заметное различие по широте  $\varphi$ . По мнению авторов, положение эпицентра, по данным станции «Тамица», возможно, более точное, поскольку получено с использованием дополнительной информации, связанной с выделением на ее записи ударно-воздушной волны. Из этого эпизода ясно, что наличие ударно-воздушной волны на сейсмограмме не только позволяет распознать взрыв, но и уточнить координаты его источника.

**3. Падение топливной ступени** космической ракеты, запущенной с космодрома «Плесецк», зарегистрировано станцией «Лешуконское» вблизи пос. Лешуконское 07.06.2007 г. в  $18^{\text{h}}09^{\text{m}}09^{\text{s}}$ . Волновые формы записи этого падения вместе с фрагментом обработки представлены на рис. 6. Локализация места падения проведена по записям одной станции.

Взрыв от падения космического объекта произошел в болотистой местности в точке с  $\varphi=63.95^{\circ}\text{N}$ ;  $\lambda=45.56^{\circ}\text{E}$ , в 46 км от станции «Лешуконское», что явилось причиной наличия на сейсмограммах значительного микросейсмического фона.

**Анализ волновых форм записей** сейсмических событий показал, что наряду с общими для них закономерностями возбуждения сейсмических волн наблюдаются отличия, специфические для каждого отдельного события. Они являются отражением различий в природе источников генерации волн, трассах распространения волн от источника к регистрирующей станции, геологическими условиями под станциями «Архангельск», «Тамица», «Лешуконское».

Волновые пакеты всех трех взрывов имеют практически одинаковую структуру: содержат группы P-, S- и поверхностных волн, но различаются длительностью, частотно-амплитудным составом этих волн, обусловленным вышеуказанными особенностями возбуждения, распространения, регистрации.



**Рис. 6.** Волновые формы записи падения топливной ступени ракеты, запущенной с космодрома «Плесецк» 07.06.2006 г. в  $18^{\text{h}}09^{\text{m}}09^{\text{s}}$  (а); карта полигона с расположением станции «Лешуконское» (б); движение частиц в  $Pg$ -волне (в)

Записи объемных  $Pg$ - и  $Sg$ -волн представляют интерференционную картину с несколькими экстремумами, регистрируемыми в виде отдельных импульсов. Продольные и поперечные волны имеют прямолинейную ось синфазности колебаний, что подтверждается диаграммами движения частиц на рис. 4 в и 6 в.

При взрывах вслед за  $S$ -волной вступают поверхностные волны, интенсивность которых зависит как от мощности источника, так и, особенно, от характеристик среды, в которых волны распространяются. В связи с меньшим затуханием с расстоянием этих волн, по сравнению с объемными волнами, они доминируют на записи, например на записях станций «Тамица» и «Архангельск» (рис. 4 а; 5 а). Однако на записях станции «Лешуконское» поверхностные волны плохо выражены (рис. 6, а). Кроме того, на этой станции пока что по не выясненным причинам на записи всех групп волн можно наблюдать дополнительные, хорошо выраженные вступления волновых пакетов. Можно предположить, что эти вступления связаны с отражением от неизвестных границ в верхней части земной коры в районе падения ступени или под станцией. Важно отметить, что для данного события оказалось возможным достаточно надежно выделить вступления благодаря высокому значению соотношения сигнал/помеха. Через  $\sim 140$  с на записи отмечается предположительно вступление волны релейского типа с преобладающей частотой  $\sim 3.5$  Гц, что указывает на возможность принадлежности ее ударно-воздушной волне, уже отмеченной выше. Ее наличие на записи позволило также уточнить локализацию места падения ступени, которое попало как раз в зону падения предыдущих ступеней от космических объектов, запускаемых с космодрома «Плесецк», как свидетельствуют об этом жители окрестных сел (рис. 6 б).

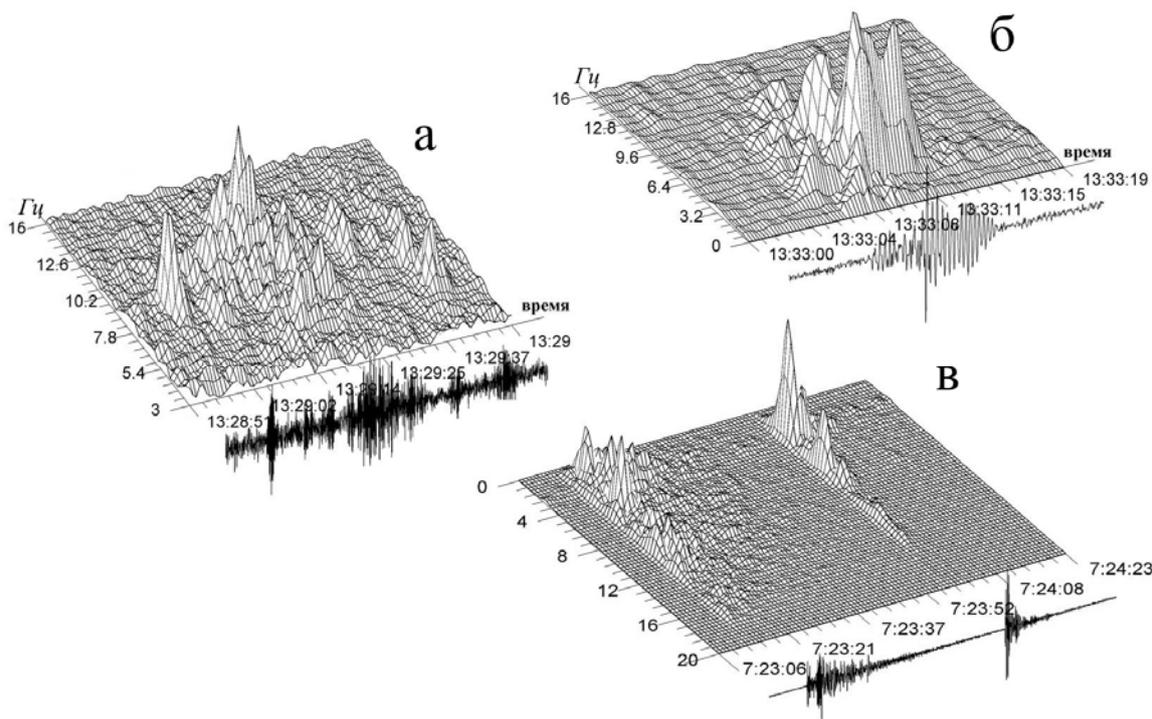
Для рассматриваемого сейсмического события техногенный тип источника может быть выявлен исходя из подтверждения двух пунктов разработанной методики идентификации (рис. 6 б): из-за наличия ударно-воздушной волны и высокого значения соотношения максимумов в спектрах  $Pg$ - и  $Sg$ -волн на канале  $Z$  (в высокочастотной области для  $f=16-22$  Гц  $Pg/Sg \gg 1$  или  $\lg(Pg/Sg) \gg 0$  [9]).

Из анализа табл. 3, где представлен частотный диапазон  $P$ -,  $S$ -,  $LR$ -волн, и из сопоставления рис. 4 б, 5 б следует, что частотные характеристики различных взрывов отличаются порой значительно, в частности для падений ступеней ракет наблюдается появление в спектрах диапазона более высоких частот (в случае падения ступени ракеты «Булава» – от 10 до 11 Гц, а для топливной ступени – от 12 до 19 Гц), что естественно отражается на соответствующих сонограммах.

**Таблица 3.** Диапазон преобладающих частот сейсмических волн техногенных катастроф на территории Архангельской области

Природа события	$K_p$	$M_{расч}$	$\Delta$ , км	Интервалы преобладающих частот сейсмических волн, Гц						
				$\Delta f_p$ , Гц	$\Delta f_s$ , Гц		$\Delta f_{LR}$ , Гц			Ударно-воздушная волна
					N	E	N	E	Z	
Взрыв на плашкоуте	6.8	1.6	2–3	1.5–3 3.5–5	4.5–6.5		2–7			
Падение ступени ракеты	8.7	2.6	80	8–10	8–11		7–11			3.0–4.0, $f_{несущ} = 3.5$
Падение топливной ступени космического объекта			~46	1–6 7–12 16–19	3–7 8.5–10.5	5–7	4–6	3–5 13–15	1–2.5 4–7 9–11 16–19	

Различия в структурах волновых полей сейсмических волн рельефно видны на трехмерных сонограммах. Для примера рассмотрены записи станции «Тамица» падения ракеты «Булава» и взрыва в карьере «Покровское», где различия видны наиболее ярко: для сейсмических волн – на сонограмме рис. 7 а, б и ударно-воздушной, сейсмоакустической волны – рис. 7 в. На них просматриваются в виде куполов вступления  $P$ -,  $S$ - и  $LR$ -волн, хорошо видны также различия в интенсивностях и в частотных диапазонах отдельных волновых пакетов сейсмических волн для разных источников возбуждения и трасс распространения. Эти сонограммы позволяют на качественном уровне хотя бы зрительно оценить соотношения максимумов спектров  $P$ - и  $S$ -волн в различных частотных окнах и таким образом в короткие сроки идентифицировать тип воздействия.



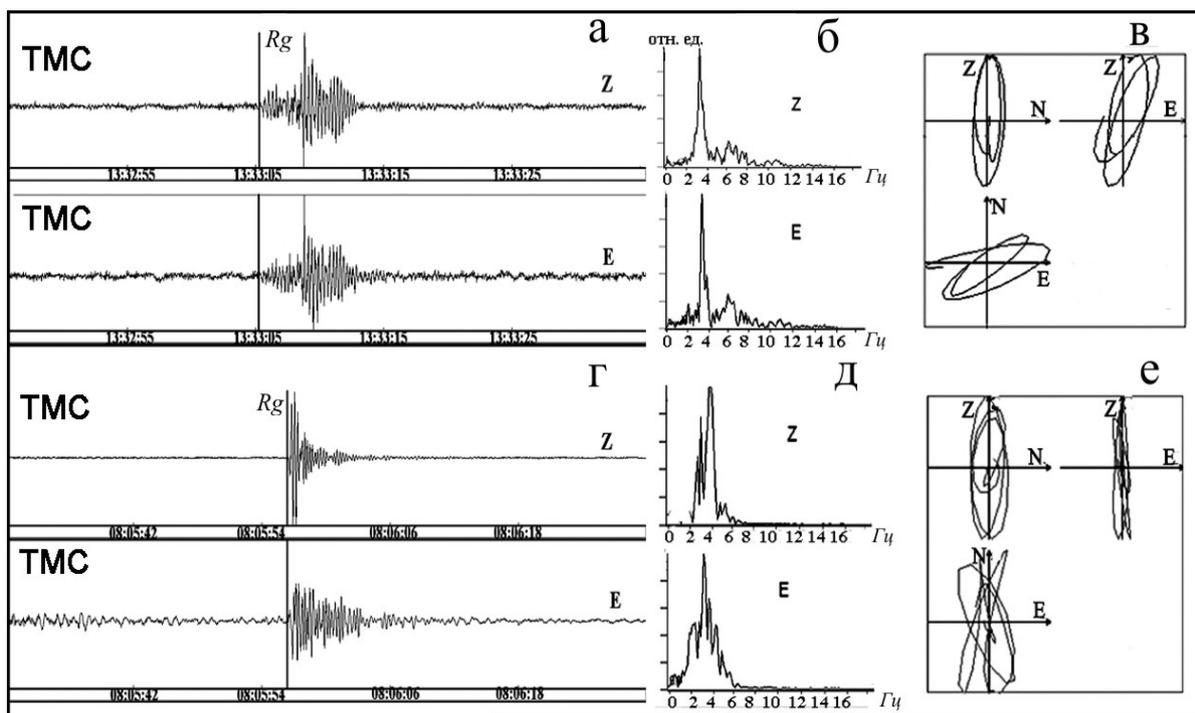
**Рис. 7.** Сонограммы записей станцией «Тамица» при падении ступени ракеты «Булава» 25.10.2006 г. двух типов волн – сейсмических (а) и ударно-воздушной (в), в сравнении с записью взрыва из карьера «Покровское», произведенного 15.03.2006 г. (15.5 т ВВ)

Сопоставление структуры записей падения «Булавы» 25.10.2006 г. и карьерного взрыва 15.03.2006 г., зарегистрированных одной и той же станцией «Тамица», интересны с точки зрения появления на записях ударно-воздушной волны, что хорошо отражается на сонограммах. Это сопоставление представляет особый интерес из-за сходства путей распространения сейсмических волн. В обоих рассматриваемых случаях трассы проходят в практически мало разли-

чающихся средах Онежского прогиба в пределах Балтийского щита, что проявляется прежде всего в наличии на записях всех каналов ударно-воздушной волны, не отмечаемой на других, ранее рассматриваемых трассах. О наличии этих волн указывают похожие для обоих случаев диаграммы движения частиц и спектральный состав, содержащий одинаковый диапазон частот с преобладающей частотой, равной  $3.5 \text{ Гц}$  (рис. 7).

Исследуя характер этих волн на сейсмограммах станции «Тамица», следует отметить, что эти волны поверхностного (рэлеевского) типа, на что указывают схожие диаграммы движения частиц на разных каналах (N, E, Z), и, кроме того, для них характерно наличие практически одинакового диапазона частот с частотой  $f=3.5 \text{ Гц}$ .

Заметим, что регистрация этих волн на записях сейсмических событий (рис. 8) однозначно определяет их принадлежность к техногенным воздействиям, и по этой причине является безусловным признаком опознания типа сейсмического воздействия как техногенного.



**Рис. 8.** Волновые формы записи (а), спектры (б) и диаграмма движения частиц (в) ударно-воздушной волны от падения ступени ракеты «Булава»; то же (г, д, е) – для ударно-воздушной волны от взрыва в карьере «Покровское» на одной и той же станции («Тамица»)

В заключение заметим, что регистрация станциями «Архангельск», «Тамица» и «Лешуконское» чрезвычайных техногенных взрывов позволила начать исследования структуры волновых полей взрывов для случаев возбуждения их источниками разной природы и различных трасс распространения сейсмических волн. По мере накопления материала такие исследования будут продолжены, что позволит расширять банк данных «масок-образов» техногенных взрывов и чрезвычайных катастроф.

Эти данные необходимы для получения срочной информации о произошедших чрезвычайных ситуациях, и прежде всего для оценки сейсмического риска промышленных объектов г. Архангельска и всей области для своевременного оповещения соответствующих служб (МЧС, Министерства обороны) о возникающих дестабилизирующих факторах, а также для оценки ущерба, нанесенного в результате катастроф.

#### Л и т е р а т у р а

1. Юдахин Ф.Н., Французова В.И. Архангельская область // Землетрясения Северной Евразии, 2005 год. – Обнинск: ГС РАН, 2011. – С. 251–258.
2. Введение. (См. наст. сб.).

3. **Габсатарова И.П., Французова В.И., Юдахин Ф.Н., Морозов А.Н.** Сейсмологическая интерпретация техногенного взрыва в г. Архангельске // Геодинамика и геологические изменения в окружающей среде северных регионов. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. – Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2004. – С. 148–153.
4. **Раутиан Т.Г.** Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км // Экспериментальная сейсмика (Труды ИФЗ АН СССР; № 32(199)). – М.: Наука, 1964. – С. 88–93.
5. **Раутиан Т.Г.** Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности (Труды ИФЗ АН СССР; № 9(176)). – М.: ИФЗ АН СССР, 1960. – С. 75–114.
6. **Китов И.О., Кузнецов О.П., Недошивин Н.И.** Определение высоты акустического источника по сейсмическим данным // Динамические процессы в ионосфере: геофизика сильных возмущений. – М.: Наука, 1994. – С. 125–131.
7. **Французова В.И.** Отклик геологической среды на воздействие разнотипных источников // Мониторинг геологических процессов. Материалы IX Международной научной конференции – Киев: Киевский национальный университет, 2009. – С. 429–434.
8. **Французова В.И., Николаев А.В., Морозов А.Н.** Идентификация разных типов техногенных источников по характеру акустических сигналов. – Геоэкология. Инженерная геология // Гидрогеология. Геоэкология. – 2012. – № 3. – С. 245–255.
9. **Французова В.И., Николаев А.В., Морозов А.Н.** Идентификация промышленных взрывов по данным региональной сейсмометрии в Архангельской области // Геоэкология. Инженерная сейсмология. Гидрогеология. Геоэкология. – 2010. – № 5. – С. 433–445.