

АРХАНГЕЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ

Ф.Н. Юдахин<sup>1</sup>, В.И. Французова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Архангельский научный центр УрО РАН, г. Архангельск, arhsc@mail.ru

<sup>2</sup>Институт экологических проблем Севера УрО РАН, г. Архангельск, vifrancuzova@gmail.com

Анализ сейсмичности выполнялся, как и в [1], для Севера Русской плиты, 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.

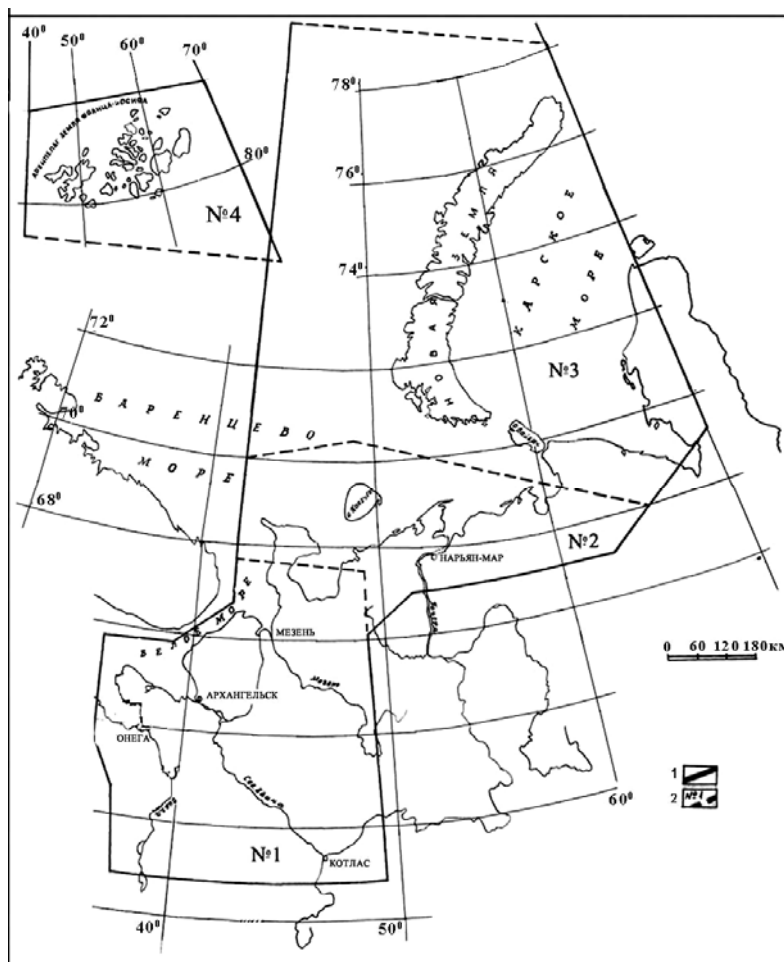


Рис. 1. Карта территории ответственности, контролируемой сейсмическими станциями Архангельской сети

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] четырем цифровым станциям – «Архангельск» (ARH), «Климовская» (KLM), «Пермогорье» (PRG), «Тамица» (TMC) – 28 ноября 2005 г. запущена станция «Пермилово» (PRM) [3] (табл. 1, 2).

Таблица 1. Сейсмические станции Архангельской сети в хронологии их открытия

№	Станция		Дата открытия	Координаты		$h_y$ , м	Тип грунтов в месте установки приборов
	Название	Код		$\varphi^\circ$ , N	$\lambda^\circ$ , E		
1	Архангельск Arkhangelsk	ARH	03.11.2002	64°33'029"	40°30'56.2"	23	Рыхлые отложения
2	Климовская Klimovskaya	KLM	25.11.2003	60°51'14"	39°31'07"	157	Валунно-галечниковые отложения, глины, пески
3	Пермогорье Permogor'e	PRG	27.11.2003	61°38'10"	45°37'38"	84	Оргалиты, песчаники, известняки
4	Тамица Tamitsa	TMC	28.11.2003	64°09'51"	38°02'07"	23	Валунно-галечниковые отложения, глины, пески
5	Пермилово Permilovo	PRM	28.11.2005	63°36'56"	40°30'56"	52	Оргалиты, песчаники, известняки

Таблица 2. Данные об аппаратуре цифровых станций в 2005 г.

Станция		Тип АЦП и сейсмометра	Перечень каналов	Частотный диапазон, Гц	Частота опроса, Гц	Разрядность АЦП	Чувствительность, велосигграф – отсчет/(м/с)
Название	Код						
Климовская Klimovskaya	KLM	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 Permogor'e	PRG	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 Tamitsa	TMC	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 Arkhangelsk	ARH	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 Permilovo	PRM	GSR-24+CGM-40T	SH(N, E, Z)	0.5–20	50	24	$3.10 \cdot 10^{16}$

Новая станция оснащена комплектом короткопериодной цифровой аппаратуры с АЦП GSR-24 разработки фирмы «Geosig-LTD» и короткопериодными датчиками CMG-40T. Внешний вид аппаратуры GSR-24 и амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) датчиков приведены на рис. 2 а, б.

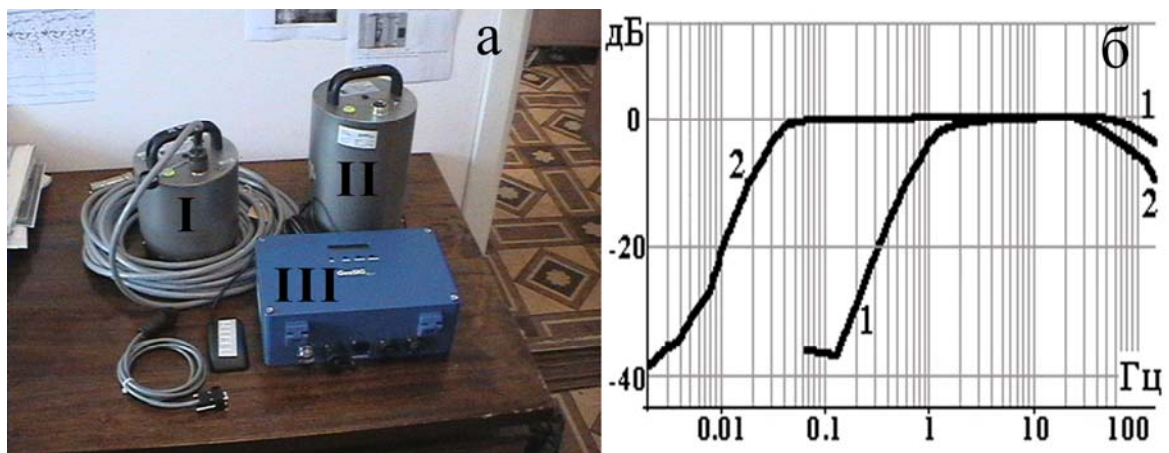


Рис. 2. Комплект аппаратуры разработки фирмы «Geosig-LTD» (а) и амплитудно-частотные характеристики короткопериодных (1) и широкополосных (2) датчиков (б)

I – контейнер с тремя короткопериодными (N, E, Z) датчиками CMG-40T; II – контейнер с тремя широкополосными (N, E, Z) датчиками Guralp; III – регистратор.

Станции Архангельской сети представлены на рис. 3.

Особо следует отметить достаточно высокое качество регистрации сейсмических событий на станции «Климовская» с двумя комплектами аппаратуры (короткопериодной и широкополосной), выявленные в процессе ее эксплуатации.

**Методика обработки и сохранения данных.** Создание сети сейсмических станций предполагает в качестве последующего шага организацию системы обработки данных регистрирующих сейсмических станций. Для этих целей создан в г. Архангельске информационно-обрабатывающий центр [4]. Структура обмена информацией станций с центром представлена на рис. 4, согласно которой данные о землетрясениях с сейсмических станций переписываются на zip-диски и пересылаются в центр по почте.

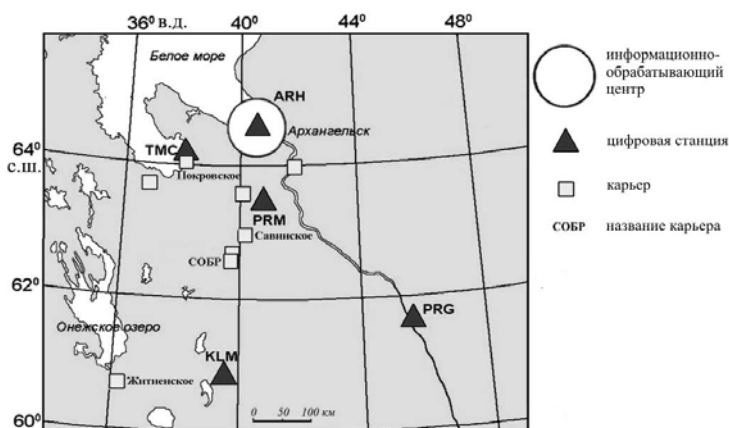


Рис. 3. Карта расположения сейсмических станций Архангельской сети и промышленных карьеров



Рис. 4. Схема передачи данных с сейсмических станций в Центр обработки

варительно занесенными в базу сейсмических записей и преобразованными во внутренний формат WSG. Разработаны конверторы для следующих форматов: xdata, css, dass и др.

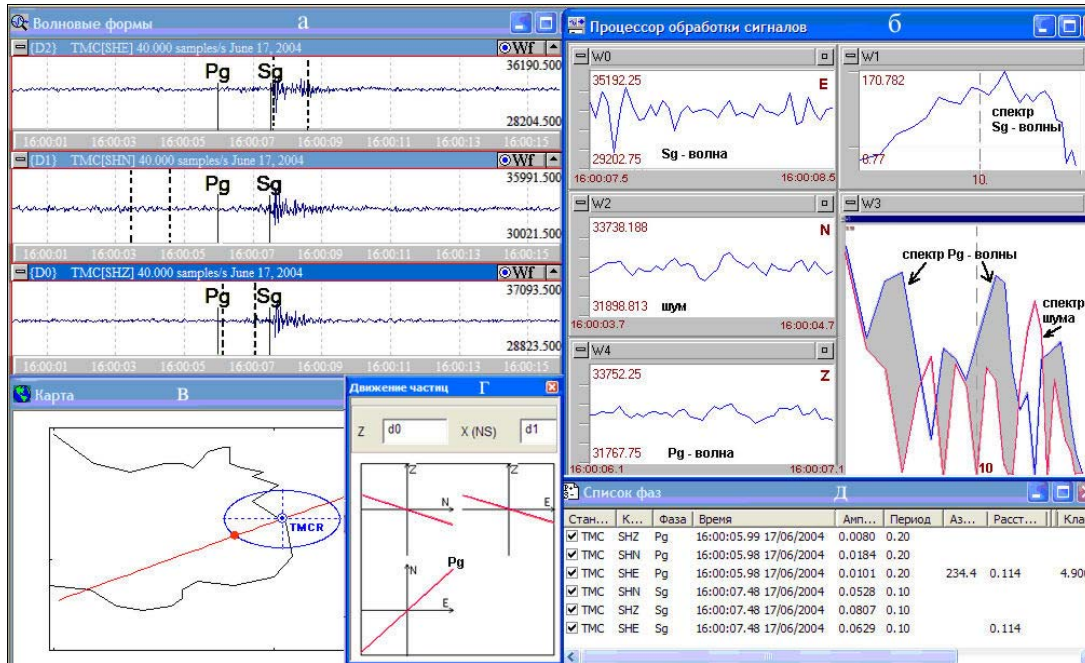
Полученные результаты обработки записываются в базу данных, а затем используются для определения кинематических и динамических параметров землетрясений. Замеры вступлений фаз и амплитуд заносятся в базу данных «Станционный бюллетень», далее пересылаются в ССД ГС РАН. Для интерпретации цифровых сейсмических записей с помощью программы WSG предлагается использовать один из вложенных в нее электронных вариантов годографов. Как правило, это годограф IASPEI-91 [5], наиболее распространенный в настоящее время, рекомендуемый для идентификации фаз и локаций эпицентров землетрясений, и традиционный годограф Джеффриса–Булена [6].

В центре на основе данных обработки ведется составление альбома характерных форм записи землетрясений, типичных волновых форм записей землетрясений из разных районов и зон земного шара.

В 2005 г. на этапе опытной эксплуатации станций сейсмической сети ставилась задача использования результатов обработки записей сейсмических событий в службах ГС РАН, и прежде всего в ее Службе срочных донесений (ССД) [7]. Результаты описаны ниже.

**Записи близких сейсмических событий.** Установлено, что станциями Архангельской сети регистрируются близкие слабые сейсмические события различного вида и, вероятно, различной природы. Однозначная идентификация природы этих событий пока затруднена из-за особенностей их возникновения и распространения от источника до регистрирующей станции и требует накопления информации и тщательной ее интерпретации. Ниже описаны два близких события, одно из которых зарегистрировано еще 17 июня 2004 г., но в [1] оно не было описано, а другое – 22 октября 2005 г.

Первое записано на станции «Тамица» и представлено на рис. 5 а–в.



**Рис. 5.** Местное сейсмическое событие 17 июня 2004 г. в 16<sup>h</sup>00<sup>m</sup>, зарегистрированное станцией «Тамица» а – волновые формы; б – спектральный анализ записи; в – положение станции и эпицентра; г – движение частиц; д – результаты обработки события.

Для более уверенного и точного выделения фаз производился спектральный анализ шума и предполагаемых *Pg*- и *Sg*-волн (рис. 5, б). При наложении спектров шума и *Pg*-волны наблюдается различие в частотном составе этих записей, а именно: в сейсмологическом диапазоне частот с пиком при  $f=6$  Гц спектр *Pg*-волны значительно превышает спектр шума (на рис. 5, б область превышения залита серым фоном). На спектре предположительно *Sg*-волны тоже наблюдается пик на частоте  $f=11$  Гц. Таким образом, по выделенным особенностям записи сделано предположение о локальном характере сейсмического события, наложенного на запись сейсмического шума. Эпицентральное расстояние составляет  $\Delta=0.114^\circ$ , для определения ориентировочных координат эпицентра сейсмического события вычислен азимут со станции на эпицентр. Азимутальный луч направлен на северо-восток, что практически совпадает с направлением движения частиц *Pg*-волны на диаграмме рис. 5, г. По всей вероятности, эпицентр находится к юго-западу от станции, т.е. в Онежской губе, в переходной зоне сопряжения Балтийского щита и Русской плиты. Полученные по одной станции координаты эпицентра равны  $\varphi=64.1^\circ\text{N}$ ,  $\lambda=37.8^\circ\text{E}$ .

Второе событие, произошедшее 22 октября 2005 г. с  $K_p=8.3$  в 13 км к северо-западу от г. Архангельска, можно отнести к землетрясениям. Оно записано на станциях «Климовская», «Пермогорье», «Тамица», «Архангельск», а также соседними сетями Петрозаводска и Финляндии [8]. Его волновые формы представлены на рис. 6.

Внешний вид записей архангельских станций (рис. 6) неодинаков, и при фильтрации исходного сигнала короткопериодным фильтром от 3 до 6 Гц третьего порядка уверенное выделение сейсмических фаз *Pn*-, *Pg*-, *Sn*-, *Sg*- и *Lg*-волн возможно только на записях станции «Климовская». На записях других станций можно выделить только первые вступления группы *P*-волн и одну из фаз группы *S*-волн. Причина кроется в повышенном уровне шумов вблизи

станций «Пермогорье», «Тамица», «Архангельск». На рис. 6, б показано расположение эпицентра землетрясения. Из сравнения его параметров, по данным Архангельского центра ( $\varphi=64.63^\circ\text{N}$ ,  $\lambda=40.32^\circ\text{E}$ ,  $h=2\text{ км}$ ,  $t_0=17^{\text{h}}46^{\text{m}}46^{\text{s}}$ ,  $K_p=8.3$ ,  $M=2.38$ ), ССД ГС РАН ( $\varphi=64.63^\circ\text{N}$ ,  $\lambda=40.32^\circ\text{E}$ ,  $t_0=17^{\text{h}}46^{\text{m}}36^{\text{s}}$ ,  $M=2.8$ ) и финских сейсмологов ( $\varphi=64.60^\circ\text{N}$ ,  $\lambda=41.77^\circ\text{E}$ ,  $M_L=2.8$ ), видно, что первые два решения почти не различаются.

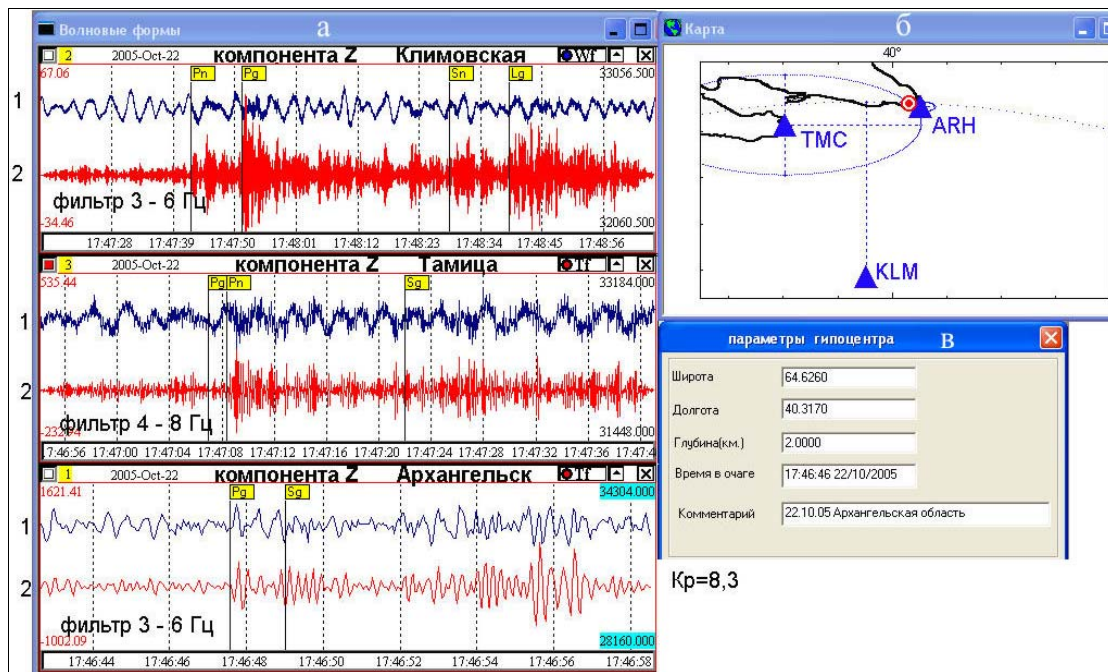


Рис. 6. Волновые формы землетрясения 22 октября 2005 г. с  $K_p=8.3$  на станциях «Климовская», «Пермогорье», «Архангельск» (а); карта с расположением эпицентра и регистрирующих станций (б); параметры землетрясения (в)

Карта эпицентров телесеismicических событий, обработанных по записям станций Архангельской сети, представлена на рис. 7, из которой видно, что наибольшее число землетрясений регистрируется из Тихоокеанской зоны (Камчатка, Курильские и Японские острова) и района Северной Суматры (афтершоки землетрясения 26.12.2004 г.).

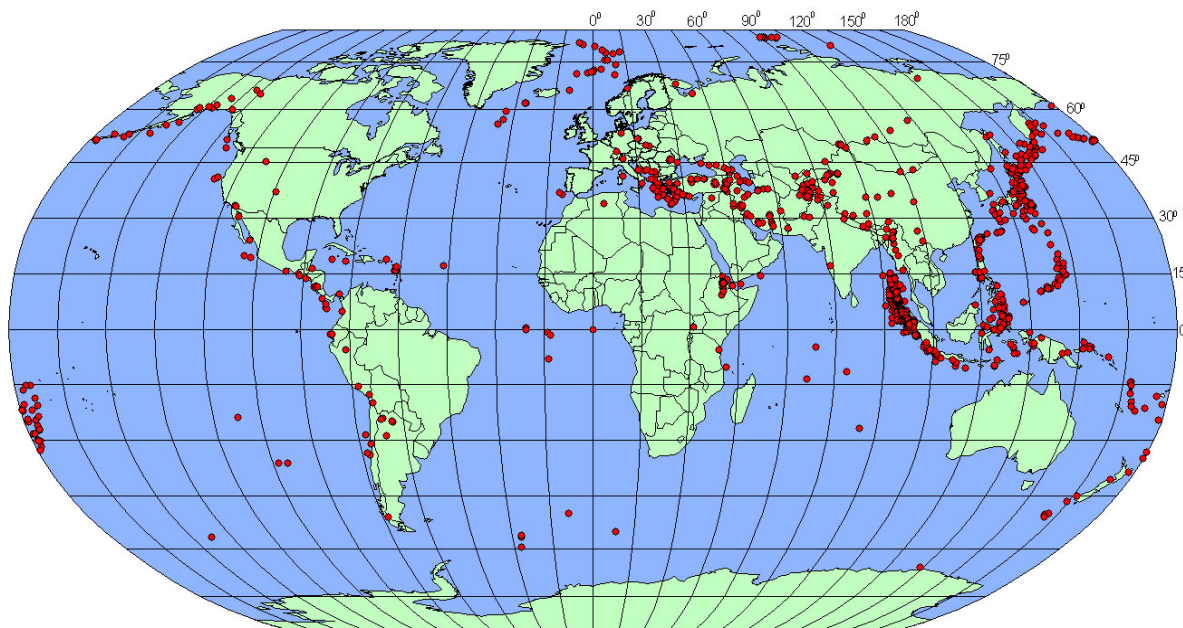


Рис. 7. Карта эпицентров землетрясений, зарегистрированных станциями Архангельской сети в 2005 г.

Особо отметим, что с вводом в эксплуатацию широкополосной сейсмической станции «Климовская» стала возможной регистрация землетрясений из района Северной и Южной Америки, Аляски, а также Атлантического и Индийского океанов, Арктического региона. Ниже приведены два примера записи далеких событий.

1. Для демонстрации хорошего качества записи землетрясений станцией «Климовская» на рис. 8 представлены волновые формы корового землетрясения, произошедшего 6 марта 2005 г. в 05<sup>h</sup>21<sup>m</sup> в районе о. Северная Земля с  $M_S=6.1$ ,  $MPSP=6.2$  по [9],  $M_s=6.1$ ,  $m_b=5.9$  по [10]. Для сравнения помещены также записи трех станций ГС РАН – «Ловозеро», «Пулково», «Обнинск» [11].

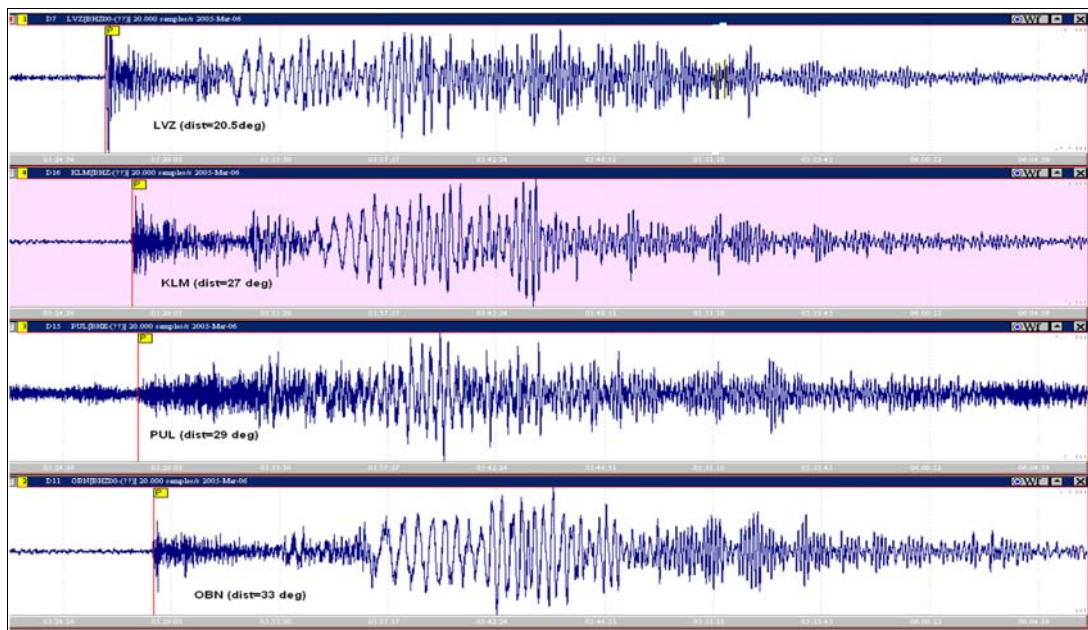


Рис. 8. Волновые формы записей землетрясения 6 марта 2005 г. в 05<sup>h</sup>21<sup>m</sup>44.6<sup>s</sup> с  $M_S=6.1$ ,  $h=33$  км в Арктике на станциях «Ловозеро», «Климовская», «Пулково», «Обнинск»

Сопоставление показывает, что на записи станции «Климовская» (широкополосный канал Z) четко выделяются вступления групп P-, S- и поверхностных волн. Такие же четкие вступления наблюдаются и на сейсмограммах станций «Ловозеро» и «Обнинск». Но на записи в «Пулково» выделение вступлений указанных волн затруднено из-за значительного фона микросейсм. Следует отметить, что интерпретация вступлений сейсмических волн требует большого опыта интерпретатора [11].

2. В качестве другого примера телесеismicического землетрясения на рис. 9 показаны волновые формы записи короткопериодными и широкополосными каналами станций «Архангельск», «Тамица», «Пермогорье», «Климовская» сильнейшего ( $M_S=7.6$  [9]) землетрясения в Пакистане 8 октября 2005 г. в 03<sup>h</sup>50<sup>m</sup>. Оно хорошо записано короткопериодными каналами этих станций, причем четко выделяется главный максимум поверхностной волны Рэлея даже без дополнительной фильтрации. Отметим хорошую сходимость результатов обработки ( $\Delta\varphi=0.07^\circ$ ,  $\Delta\lambda=0.2^\circ$ ,  $\Delta M_S=0.1$ ,  $\Delta t_0=3.1^s$ ) службой Архангельской сети и ССД ГС РАН.

**Оценка эффективности работы сети в телесеismicике** выполнена на основе накопленных за 2004–2005 гг. данных о зарегистрированных землетрясениях. Важным критерием эффективности является магнитудная представительность землетрясений. Ее оценка выполнена по материалам обработки региональных ( $\Delta=5\text{--}20^\circ$ ) и телесеismicических ( $\Delta>20^\circ$ ) землетрясений лишь на качественном уровне (табл. 3).

В табл. 3 приведено распределение суммарного числа землетрясений в различных интервалах магнитуд по указанным зонам. Согласно этим данным, из общего числа 1420 событий 1026 (72 %) зарегистрированы в Тихоокеанской зоне, в остальных – значительно меньше. Распределение по магнитудам (табл. 3) свидетельствует о том, что на сейсмических станциях Архангельской сети качественно могут быть выявлены события с  $M\geq 5.0$ .

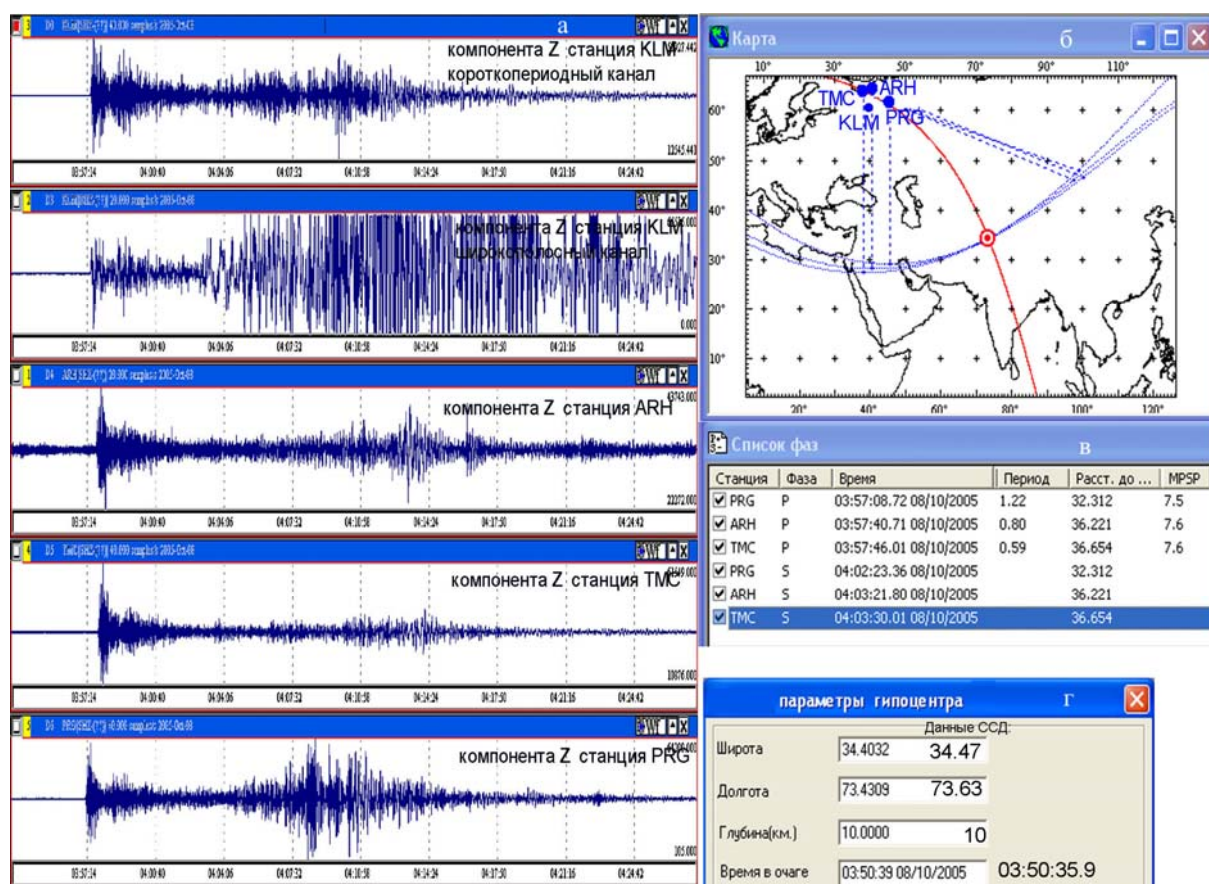


Рис. 9. Волновые формы записи землетрясения 8 октября 2005 г. в 03<sup>h</sup>50<sup>m</sup> с MS=7.6 в Пакистане станциями Архангельской сети (а); местоположение сейсмических станций и эпицентра (б); фрагмент обработки (в); рассчитанные параметры гипоцентра события и сравнение их с данными ССД ГС РАН (г)

Таблица 3. Распределение суммарного за 2004–2005 гг. числа землетрясений, записанных станциями Архангельской сети в различных интервалах магнитуд по зонам

№	Название зоны	h, км	M				N <sub>Σ</sub>
			2.5–3.5	3.6–4.5	4.6–5.5	5.6–6.5	
1	Тихоокеанская	≤ 70	0	47	479	344	870
		≥ 70	0	6	117	33	156
2	Сибирская		1	15	18	3	37
3	Гиндукушская		1	11	60	14	86
4	Европейская и Малоазиатская		16	76	83	11	186
5	Североатлантическая и Арктическая		1	17	29	2	49
6	Экваториальная и Южная Атлантика		0	1	22	13	36
Всего			19	173	808	420	1420

В заключение можно сформулировать широкий круг задач, которые можно решить с помощью сети сейсмических станций на территории Архангельской области:

- участие в сейсмическом мониторинге телесеismicических и региональных землетрясений, проводимого ГС РАН;
- регистрация местных (локальных) землетрясений и проведение макросейсмического обследования их эпицентральных зон;
- мониторинг промышленных взрывов и использование их для изучения строения земной коры и верхней мантии;
- контроль чрезвычайных ситуаций, анализ характера сейсмических записей при удачных и неудачных запусках ракет на космодроме «Плесецк».

## Л и т е р а т у р а

1. Юдахин Ф.Н., Французова В.И., Мехрюшев Д.Ю. Север Русской плиты // Землетрясения Северной Евразии, 2004 год. – Обнинск: ГС РАН, 2010. – С. 220–227.
2. Введение // Землетрясения Северной Евразии, 2004 год. – Обнинск: ГС РАН, 2010. – С. 7–12.
3. Юдахин Ф.Н., Французова В.И. Сейсмическая сеть наблюдений – основа геодинамического мониторинга территории Архангельской области // Материалы Одиннадцатой Международной научной конференции «Строение, геодинамика и минерагенические процессы в литосфере». – Сыктывкар, 2005. – С. 420–422.
4. Юдахин Ф.Н., Французова В.И., Мехрюшев Д.Ю., Габсатарова И.П., Морозов А.Н. Первая оценка регистрационных возможностей сейсмических станций Архангельской сети // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Геодинамика и геологические изменения в окружающей среде северных регионов». – Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2004. – II. – С. 418–422.
5. Kennet B.L.N. (ed.). IASPEI 1991 Seismological Tables. Sydney: Research School of Earth Sciences Australian National University, 1991. – 167 p.
6. Jeffreys H., Bullen K.E. Seismological tables // Brit. Assoc. for the advancement of Sci. – London: Gray-Milne Trust, 1958. – 65 p.
7. Юдахин Ф.Н., Старовойт О.Е., Французова В.И., Мехрюшев Д.Ю. Создание Архангельской сейсмической сети // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Геодинамика и геологические изменения в окружающей среде северных регионов». – Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2004. – II. – С. 414–418.
8. <http://www.seismo.helsinki.fi>
9. Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2005 год / Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ГС РАН, 2005–2006.
10. Bulletin of the International Seismological Centre for 2005. – Berkshire: ISC, 2007.
11. Французова В.И., Габсатарова И.П., Ваганова Н.В., Захарова И.В. Оценка представительности сейсмических станций Архангельской сети при регистрации телесеизмических землетрясений Арктического региона // Материалы Одиннадцатой Международной научной конференции «Строение, геодинамика и минерагенические процессы в литосфере». – Сыктывкар, 2005. – С. 358–361.