

**ЭКСПЕРТНОЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ
ПО ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ
РАЙОНОВ СТРОИТЕЛЬСТВА БЕРЕГОВЫХ ОБЪЕКТОВ
ПРОЕКТА «САХАЛИН-1»**

Проф. В.И.Уломов,
Заведующий Лабораторией
континентальной сейсмичности
Института физики Земли
Российской академии наук

г. Москва, 4 ноября 2003 г.

**ЭКСПЕРТНОЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ
ПО ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ
РАЙОНОВ СТРОИТЕЛЬСТВА БЕРЕГОВЫХ ОБЪЕКТОВ
ПРОЕКТА «САХАЛИН-1»**

(проф. В.И.Уломов, Объединенный институт физики Земли РАН)
г. Москва4 ноября 2003 г.

1. ВВЕДЕНИЕ.

Настоящее Экспертное заключение (далее Заключение) выполнено по заказу ООО «АББ Луммус Глобал» в связи с необходимостью оказания услуг по оценке сейсмической опасности строительства пяти (1–5) объектов проекта «Сахалин 1» (табл. 1, рис. 1).

Этой проблеме посвящены десятки Исследований и Отчетов (см. Приложение). Большинство из них отражает самые разные методические подходы и нередко базируется на разнородных исходных материалах. Этим в значительной степени обусловлены различные оценки величины возможных сейсмических воздействий на рассматриваемые ниже строительные объекты.

Наиболее профессионально выполнены Исследования и Отчеты, представленные фирмой ABS-Consulting и Институтом морской геологии и геофизики (ИМГГ, г. Южно-Сахалинск). Этим материалам уделено основное внимание Эксперта.

Поскольку самым главным и наиболее ответственным звеном в оценке сейсмической опасности является конструирование адекватной модели зон возникновения очагов землетрясений (зоны ВОЗ), главная задача заключалась в выборе наиболее аргументированной модели зон ВОЗ и в выполнении на ее основе расчетов по оценке сейсмической опасности указанных объектов. При этом акцент делался на использование принятой в России методологии оценки сейсмической опасности, разработанной при создании комплекта нормативных вероятностных карт Общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97 (см. СНиП-II-7-81*, 2000 г.).

Основные результаты выполненных исследований:

1. Изучены и обобщены результаты Исследований и Отчетов по оценке сейсмической опасности, выполненные российскими и иностранными компаниями для районов планируемого строительства объектов Проекта «Сахалин-1». Перечень этих материалов приведен в Приложении к настоящему Заключению. Кроме этих материалов нами рассмотрены дополнительные отчеты и публикации. В число таких работ вошли результаты, ранее полученные в Институте физики Земли РАН при выполнении исследований по Общему сейсмическому районированию территории Российской Федерации (ОСР-97), а также по созданию в 1995 г. после катастрофического Нефтегорского землетрясения Временной схемы сейсмического районирования Сахалина (ВС-95).

2. На первом этапе, на основе исходных данных, содержащихся в Исследованиях и Отчетах, и вероятностных методов, использовавшихся при создании комплекта официальных нормативных карт ОСР-97 (А, В, С), выполнены проверочные расчеты по оценке сейсмической опасности. Выполнен также аналитический обзор сейсмотектонических данных и моделей, составленных другими специалистами. Дано объяснение расхождений между результатами анализа, проведенного Экспертом и другими специалистами. По согласованию с Заказчиком, особое внимание уделено моделям источников землетрясений, представленным ИМГГ (А.И.Иващенко, г. Южно-Сахалинск) и фирмой ABS-Consulting (Paul C.Thenhaus, Risk Consulting Division).

3. На втором этапе, с целью разрешения существующих несоответствий и разногласий, используя личные встречи, дискуссии и переписку, были сделаны определенные шаги по усовершенствованию модели источников землетрясений о. Сахалин и сопредельной территории. Чрезвычайно полезным было обсуждение 30 сентября сейсмологических

проблем с Директором Службы сейсмической опасности доктором P.C.Thenhaus ("ABS-Consulting") – одним из основных авторов ABS-модели источников землетрясений Сахалина. В дискуссии приняли участие д-р G.S.Johnson (HPA), д-р А.И.Иващенко (ИМГГ), координатор проекта «Сахалин1» Yuri Dershteller (ExxonMobil) и его помощник M. Sandler (ExxonMobil). В результате обсуждения появилось взаимопонимание и выяснилась принципиальная близость российских и американских подходов к вероятностному анализу сейсмической опасности. Вместе с тем, сохранились расхождения в конструировании моделей источников землетрясений и их сейсмологической параметризации.

4. По просьбе Эксперта, д-ром P.C.Thenhaus были дополнительно представлены количественные данные о геометрических и сейсмологических параметрах модели источников землетрясений северной части Сахалина, необходимые для расчетов сейсмической опасности по технологии ОСР-97. Такие же материалы ИМГГ (но с большим опозданием) были представлены А.И.Иващенко. На их основе нами выполнен большой объем вычислительных работ по преобразованию полученных материалов для технологии ОСР-97 и географической информационной системы (GIS ESRI ArcView 3.3 и ArcGis 8.3), а также по составлению большого числа таблиц и графиков, часть которых приведена ниже. При создании заключительной версии ИМГГ–модели зон ВОЗ важную роль сыграли новые результаты изучения палеосейсмодислокаций, выявленных в последнее время на о. Сахалин специалистами ИМГГ, в том числе по заказу фирмы ABS-Consulting.

5. В процессе работы, по мере выполнения проверок и расчетов, Экспертом представлялись Заказчику еженедельные Информационные отчеты, содержащие анализ имеющихся материалов, а также результаты текущих расчетов, направленных на совершенствование модели источников землетрясений и проверку результатов, полученных основными исследователями – ИМГГ и ABS Consulting. Особенно много времени ушло на итерационное внесение необходимых корректив в модель источников землетрясений, представленную А.И.Иващенко и несколько раз (вплоть до последнего момента) претерпевавшую те или иные изменения.

6. Особое внимание уделено созданию основополагающих моделей зон ВОЗ и их сейсмологической параметризации, поскольку от этого зависит достоверность и надежность всех последующих построений и расчетов. В итоге рассмотрены четыре версии моделей зон ВОЗ Сахалина и сопредельной территории: (1) Временная схема сейсмического районирования о. Сахалин – ВС-95, составленная в 1995 г. сразу же после разрушительного Нефтегорского землетрясения; (2) модель, использованная в ОСР-97; (3) самая последняя по времени модель фирмы ABS, представленная д-ром P.C.Thenhaus, и (4) модель ИМГГ, представленная после ряда итераций д-ром А.И.Иващенко. В итоге за основу при расчетах по технологии ОСР-97 принята наиболее аргументированная версия модели ИМГГ, модифицированная при участии Эксперта и А.И.Иващенко.

7. По условиям Заказчика, при оценке сейсмической опасности делался акцент на 1000-летний период повторяемости сейсмических воздействий. Ниже нами показано, что благодаря новым данным о выявленных на Сахалине палеосейсмодислокациях и более продолжительных, чем это считалось прежде, периодах повторяемости вдоль них крупных землетрясений, оценка сейсмической опасности на северо-востоке Сахалина, представленная картами ОСР-97, оказалась завышенной на 0.6–0.8 баллов (см. разницу в правом столбце таблицы 1). Следует заметить, что согласно принятым в России (как и в бывшем СССР) оценкам сейсмической интенсивности в целочисленных единицах шкалы MSK-64 (баллы), на нормативных картах комплекта ОСР-97 границы между зонами разной интенсивности проведены по расчетным изолиниям, соответствующим 5.5, 6.5, 7.5, 8.5, 9.5 и т.д. баллов. На самом же деле, как видно из табл. 1, в преобладающем большинстве случаев различия (Δ_{msk}) новых и прежних оценок состоят в долях балла. Однако этого оказалось достаточно, чтобы официальные оценки карты ОСР-97-В (повторяемость 1000 лет) сместились на целый балл в сторону уменьшения сейсмического эффекта.

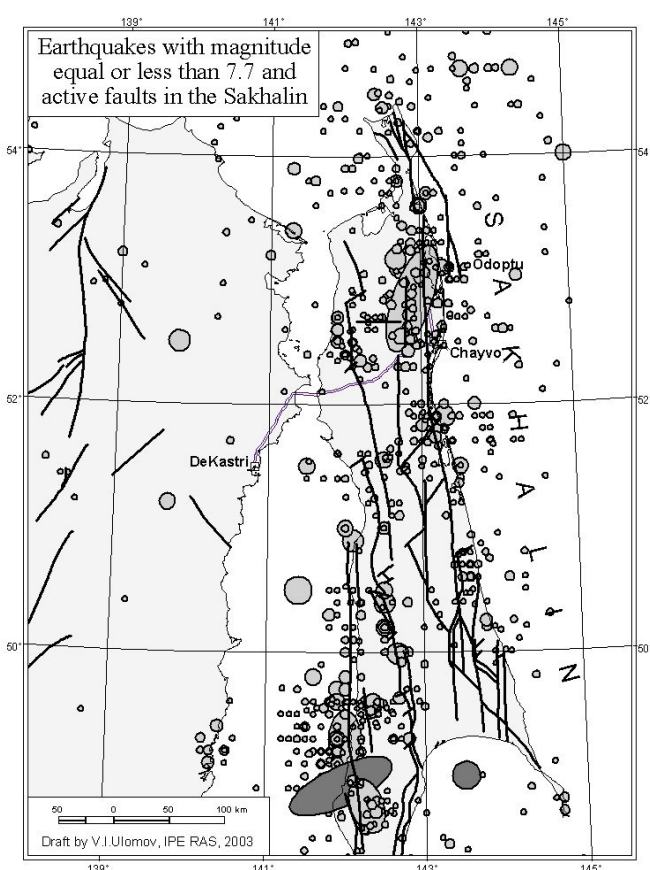
Таблица 1.

No	Facility	Latitude, °N	Longitude, °E	OCP-97-B	IMGG-2003	Δ_{MSK}
1	Chayvo OPF	52.505	143.185	9.89	9.09	0.80
2	Chayvo Drill Pad	52.477	143.284	9.66	8.98	0.68
3	Odoptu South Drill Pad	53.066	143.277	9.68	9.01	0.67
4	Odoptu North Drill Pad	53.146	143.260	9.81	9.16	0.65
5	De-Kastri Export Terminal	51.497	140.832	8.19	7.59	0.60

Таким образом, для районов проектируемых объектов (1–5) Проекта «Сахалин-1» обоснованы и приняты в качестве исходных следующие величины сейсмической интенсивности, соответствующие периоду повторяемости 1000 лет: Chayvo OPF – 9, Chayvo Drill Pad – 9, Odoptu South Drill Pad – 9, Odoptu North Drill Pad – 9, De-Kastri Export Terminal – 8 баллов MSK-64 для грунтов 2-й категории по СНиП-II-7-81*.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЕЙСМИЧНОСТИ ОСТРОВА САХАЛИН.

Остров Сахалин характеризуется высокой сейсмичностью, обусловленной его местоположением на стыке Тихоокеанской и Евразийской литосферных плит (рис. 1 и 2).



Преобладающее число очагов слабых и умеренных землетрясений сосредоточено здесь в верхней части земной коры на глубинах до 15–20 км. Максимум их распределения расположен на глубинах 10 ± 2 км. Наиболее сильные сейсмические события создают в эпицентральных областях сотрясения интенсивностью 9–10 и более баллов по шкале MSK-64 и значительные остаточные деформации земной поверхности. Вероятность выхода очагового разрыва на земную поверхность очень высока при землетрясениях с магнитудой $M_s \geq 7.0$. Самыми глубокими (до 650 км) очагами в этом регионе характеризуется Курило–Камчатская зона погружения Тихоокеанской литосферной плиты под материк. Глубокофокусные очаги землетрясений этой зоны прослеживаются под южной частью о. Сахалин. Сейсмический эффект на земной поверхности от них относительно невысок.

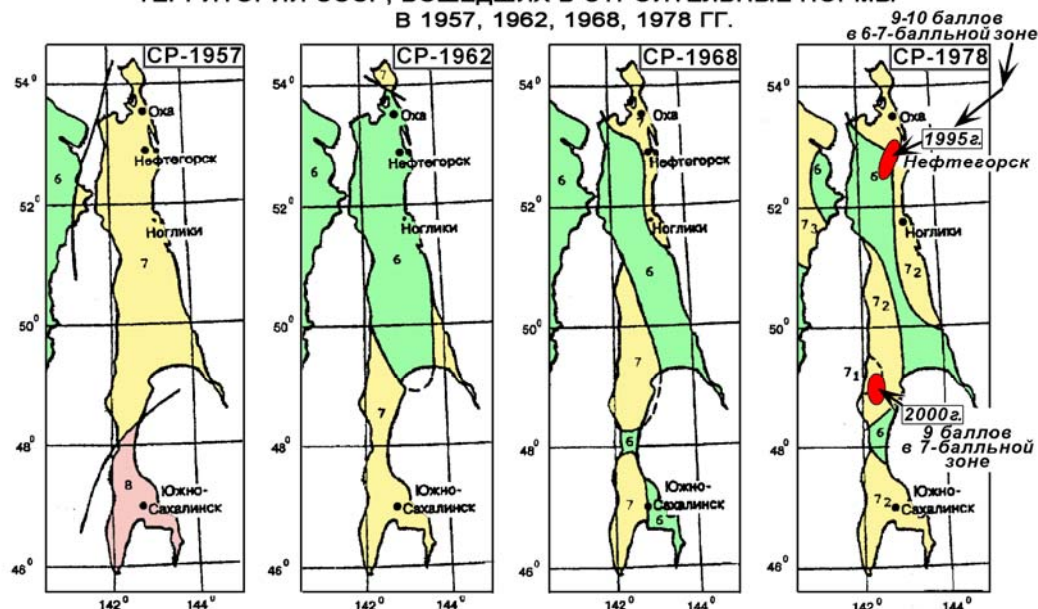
Рис. 1. Сейсмичность и сейсмоактивные разломы о. Сахалин и сопредельной территории.

Кружками показаны очаги землетрясений с магнитудой $M=6.5$ и меньше, эллипсами – с $M=7.0$ и больше. Ориентация и протяженность эллипсов соответствует простиранию и размерам сейсмических очагов. Светлым серым цветом помечены очаги внутри земной коры, темно-серым цветом – глубокофокусные очаги. Здесь же показано местоположение объектов Одопту, Чайво и трассы проекта «Сахалин-1».

Сильные внутрикоровые землетрясения северной и центральной части Сахалина, представляющие непосредственную опасность объектам проекта «Сахалин-1», связаны с наиболее крупными тектоническими разломами – Пильтун-Гаромайским, протягивающимся в меридиональном направлении вдоль восточного побережья на материковой части Сахалина и Верхне-Пильтунским, являющимся его юго-западным ответвлением. К последнему

был приурочен очаг катастрофического Нефтегорского землетрясения 1995 г. ($M_s = 7.4-7.7$, $I_0 = 9-10$ баллов). До этого момента сейсмичность острова представлялась умеренной и до создания в 1991–1997 гг. в Объединенном институте физики Земли (ОИФЗ) Российской академии наук нового комплекта карт Общего сейсмического районирования (ОСР-97) территории Северной Евразии здесь ожидалось лишь землетрясения интенсивностью до $I_0 = 6-7$ баллов (рис. 2, сверху).

**ФРАГМЕНТЫ ПРЕЖНИХ КАРТ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ
ТЕРРИТОРИИ СССР, ВОШЕДШИХ В СТРОИТЕЛЬНЫЕ НОРМЫ
В 1957, 1962, 1968, 1978 ГГ.**



**ФРАГМЕНТ КОМПЛЕКТА ВЕРОЯТНОСТНЫХ КАРТ
ОБЩЕГО СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ
ОБРАЗЦА 1997 Г. - ОСР-97 (А,В,С) - о. САХАЛИН**

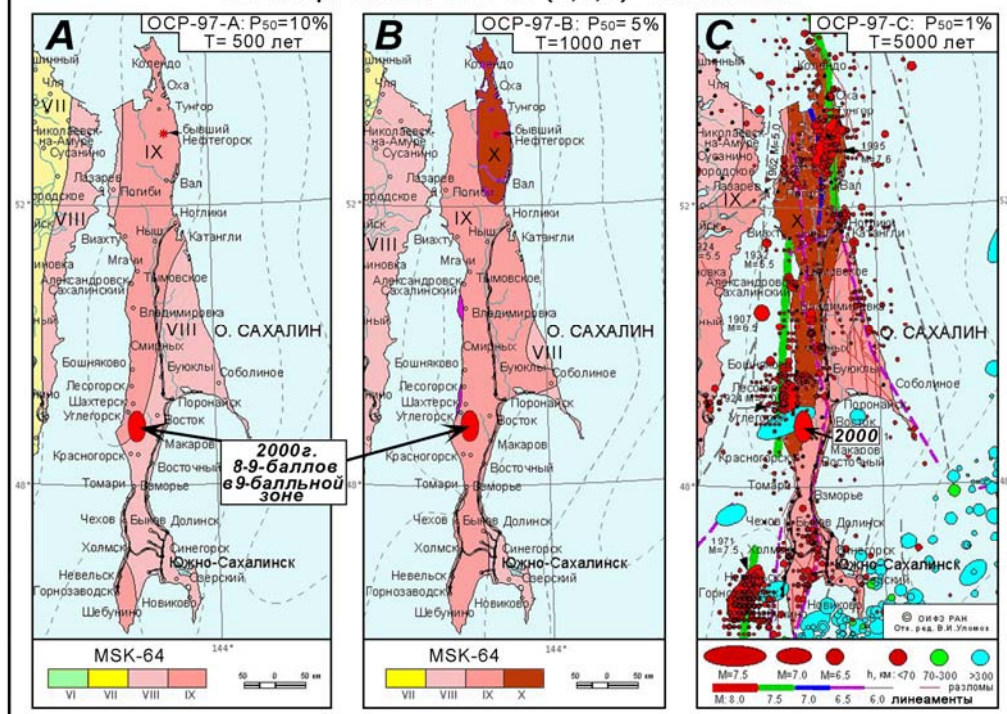


Рис. 2. Фрагменты прежних карт сейсмического районирования о. Сахалин 1957, 1962, 1968 и 1978 гг. и нового комплекта вероятностных нормативных карт ОСР-97 (А, В, С). На карте ОСР-97-С показаны очаги известных землетрясений на рассматриваемой территории. Помечено событие 2000 г., возникшее уже после создания комплекта ОСР-97.

Нефтегорское землетрясение было самым разрушительным из известных за все время землетрясений на территории России. Погибло около 2000 чел. В результате полностью ликвидирован рабочий поселок городского типа Нефтегорск. Не исключено, что техногенные факторы сыграли здесь (как и в случае сильнейших Газлийских землетрясений в Узбекистане в 1976–1984 гг.) роль спускового механизма для накопившихся к этому моменту упругих геодинамических напряжений в регионе. Как уже отмечалось, очаг Нефтегорского землетрясения принадлежит одному из юго-западных ответвлений протяженного Пильтун-Гаромайского разлома, расположенного в непосредственной близости от строительных площадок проекта «Сахалин-1» – Чайво и Одопту.

Другим из известных крупных землетрясений региона о. Сахалин является Моне-ронское землетрясение 1971 г. ($M_s=7.5$), произошедшее на шельфе в 40 км юго-западнее о-ва Сахалин. Его гипоцентр, как и гипоцентр Нефтегорского землетрясения, располагался на глубине 17–18 км. Сильным сейсмическим событием было и недавнее Углегорское землетрясение 2000 г. ($M=7.1$, $I_0 \approx 9$ баллов). Возникнув в южной части острова, вдалеке от населенных пунктов, оно практически не принесло ущерба, но подтвердило повышенную сейсмическую опасность Сахалина, указанную на картах ОСР-97 (см. рис. 2). Можно попутно заметить, что на достоверность карт ОСР-97 указало и другое недавнее землетрясение с магнитудой $M=7.5$, случившееся в 2003 г. в Горном Алтае, где сейсмических событий такой величины ранее не наблюдалось. Вместе с тем, благодаря детальному изучению палеосейсмодислокаций и структуры региональной сейсмичности, при создании карт ОСР-97 в модель источников местных землетрясений были включены линеаменты с $M_{\max}=7.5 \pm 0.2$.

Оценка магнитуды Нефтегорского землетрясения имеет самое непосредственное отношение к адекватной оценке сейсмической опасности территории северо-восточного Сахалина. Вместе с тем, большой разброс значений магнитуд, полученных по данным различных агентств, нередко приводит к произволу в их выборе разными исследователями. В приведенной ниже таблице указаны данные, заимствованные из Международного сейсмологического центра (ISC). Магнитуда m_b , определяемая по объемным сейсмическим волнам, вообще должна быть исключена из рассмотрения, поскольку, как известно, начиная с $m_b > 6.0$, ее величина насыщается и не может использоваться в оценке магнитуды таких крупных событий, как Нефтегорское землетрясение.

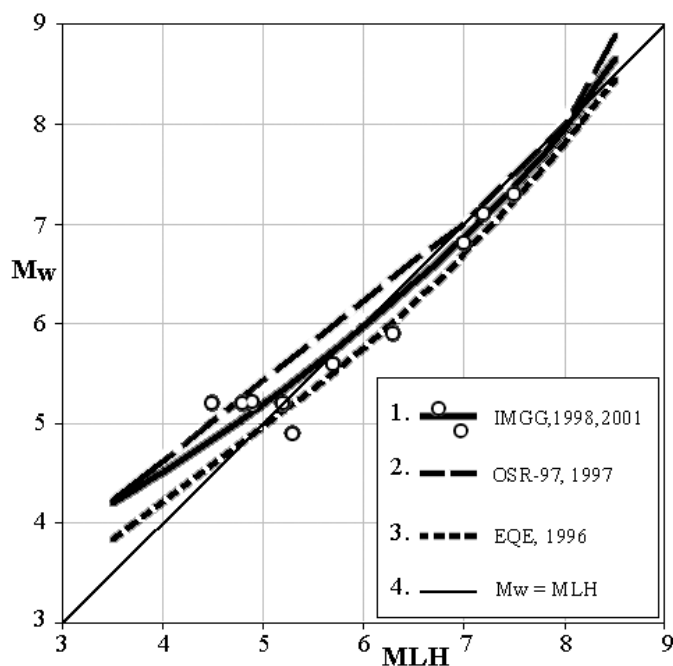
Таблица 2.

Тип и величина Магнитуда		Число станций	Агентство
m_b	6.4		NAO
m_b	5.8	24	EIDC
M_S	6.9	8	EIDC
m_b	6.7	99	NEIC
M_{SZ}	7.5	45	NEIC
M_w	7.1		HRV; NEIC
M_w	7.1		GS; NEIC
m_b	5.9		BJI
M_s	7.7		BJI
m_b	7.1	39	MOS
M_s	7.7	15	MOS
m_b	6.5	173	ISC
M_s	7.4	67	ISC

Вызывает также сомнение величина $M_s=6.9$ (EIDC), в которой, видимо, содержится ошибка. Следует также заметить, что российские сейсмологи традиционно используют в качестве базовой магнитуду M_s , определенную по поверхностным волнам и соответствующую величине MLH . В России (и в бывшем СССР), к сожалению, до последнего вре-

мени отсутствовали сколько-нибудь надежные инструментальные данные, необходимые для определения моментной магнитуды M_w . Поэтому при создании нормативных карт ОСР-97 осуществлялся пересчет MLH в M_w по принятому соотношению этих величин.

По данным сахалинских сейсмологов, получено несколько иное соотношение этих магнитуд (рис. 3). Несмотря на существенный разброс точечных величин магнитуд, особенно в области небольших значений, соотношение IMGG (1 на рис. 3) можно рекомендовать для использования при оценке сейсмической опасности территории Сахалина. Вместе с тем, эти значения величин магнитуд получены не непосредственно из сейсмограмм сахалинских сейсмических станций, а путем сопоставления величин MLH, заимствованных из Сейсмологического бюллетеня Дальнего Востока (за 1971г. и 1990-2001 гг.), и магнитуд M_w – из основного каталога NEIC для тех же землетрясений.



Таким образом, на основе величин магнитуд 7.5 (NEIC), 7.7 (ВЛ), 7.7 (MOS) и 7.4 (ISC) можно принять за среднее значение $M_s=7.6$. Для оценки сейсмической опасности особо ответственных объектов, каковым являются объекты «Сахалин-1», следует ориентироваться на более консервативную оценку – $M_s=7.7$, которую дают два агентства, включая Московское.

Рис. 3. Соотношение магнитуд MLH и M_w по данным разных авторов: 1 – усредненная кривая по данным экспериментальных наблюдений (кружки) на Сахалине Института морской геологии и геофизики (ИМГГ); 2 – соотношение, использовавшееся при создании карт ОСР-97; 3 – данные EQE; 4 – прямая, соответствующая равенству MLH и M_w .

3. СЕЙСМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ.

Как уже сообщалось, сразу же после Нефтегорского землетрясения, в Объединенном институте физики Земли (ОИФЗ) РАН при участии Института морской геологии и геофизики (ИМГГ) ДВО РАН была составлена Временная схема сейсмического районирования Сахалина – ВС-95 (Отв. ред. В.И.Уломов, А.И.Иващенко). Она была создана на основе модели зон ВОЗ, изображенной на рис. 5.

В соответствии с ВС-95, сейсмическая опасность объектов проекта «Сахалин-1», расположенных на северо-восточном побережье острова Сахалин, была оценена в 9 баллов с повторяемостью в среднем один раз в 1000 лет.

Поскольку утвержденная в 1998 г. технология создания комплекта карт ОСР-97 является официально приоритетной при оценках сейсмической опасности на территории России, следует остановиться на ее общем описании.

В 1991–1997 гг. впервые сейсмическим районированием была охвачена вся обширная территория Северной Евразии, включая платформенные регионы и шельфы окраинных и внутренних морей. Комплект ОСР-97 (Отв. ред. В.И.Уломов) состоит из трех карт – А, В и С, отражающих 10%- (карта ОСР-97-А), 5% - (ОСР-97-В) и 1%-ную (ОСР-97-С) вероятность возможного превышения (или 90%, 95% и 99% непревышения) расчетной сейсмической интенсивности в течение 50 лет, что соответствует повторяемости сейсмического эффекта на земной поверхности в среднем один раз в 500, 1000 и 5000 лет (точнее, 475, 975 и 4975 лет).

Для территории России комплект карт ОСР-97 в 1998 г. утвержден Российской академией наук и принят Государственным комитетом Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу (Госстрой России) в качестве нормативного документа и в 2000 г. вошел составной частью в Строительные нормы и правила СНиП-II-7-81* «Строительство в сейсмических районах». На рис. 2 приведен фрагмент этих карт для о. Сахалин и сопредельной территории.

Дифференцированные оценки сейсмической опасности позволяют использовать комплект ОСР-97 для проектирования и строительства сейсмостойких объектов разных категорий ответственности и сроков службы. Для особо ответственных сооружений, таких как атомные станции, радиоактивные захоронения и т.п., была также создана карта ОСР-97-D, соответствующая средней повторяемости сейсмических воздействий один раз в 10 000 лет. Карта ОСР-97-A, представленная в ускорениях колебаний грунта, вошла составной частью в первую мировую карту глобальной сейсмической опасности, опубликованную в 1999 г. в США под эгидой ООН (программа Global Seismic Hazard Assessment Program – GSHAP).

Достаточно подробное описание методологии и техники составления карт ОСР-97 можно найти на страницах Интернет: <http://seismo.ethz.ch/gshap/neurasia/report.html>

4. МОДЕЛИ ИСТОЧНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ.

Модель зон возникновения очагов землетрясений, использованная в ОСР-97.

В 1991–1997 гг. в ОИФЗ была разработана новая методология вероятностного сейсмического районирования и впервые была создана однородная сейсмогеологическая и геолого-геофизическая электронная база данных для территории Северной Евразии. В основу оценки сейсмической опасности положена линеаментно-доменно-фокальная (ЛДФ) модель зон возникновения очагов землетрясений (зоны ВОЗ) в их трехмерном представлении. В концепции ЛДФ-модели (рис. 4) рассматриваются четыре масштабных уровня источников землетрясений – крупный генетически единый *регион*, характеризующийся конкретным долговременным средним сейсмическим режимом, и три его основных структурных элемента: *линеаменты*, в генерализованном виде представляющие оси трехмерных сейсмоактивных разломных или сдвиговых структур и отражающие структурированную сейсмичность; *домены*, охватывающие квазиоднородные в тектоническом и геодинамическом отношении объемы геологической среды и характеризующиеся рассеянной (вернее, не поддающейся на данном масштабном уровне структурированию) сейсмичностью; *потенциальные очаги* землетрясений, указывающие на наиболее опасные участки линеаментных структур и выявленные на основе палеосейсмодислокаций, сегментирования разломов и т.п.

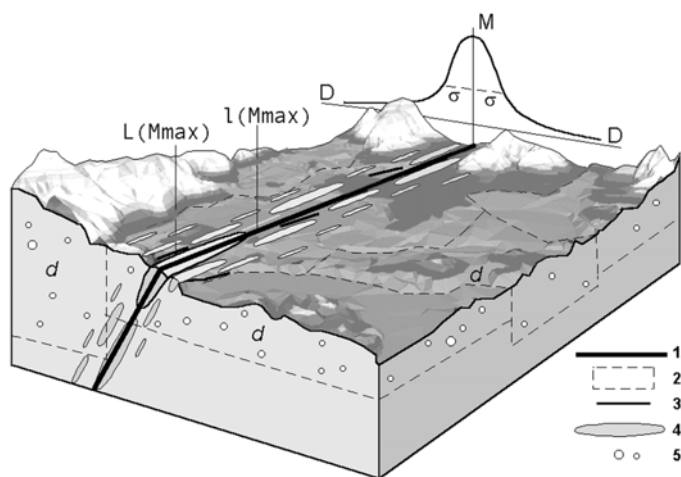


Рис. 4. Иллюстрация концепции ЛДФ-модели зон ВОЗ. 1. – осевые плоскости линеаментных структур $L(M_{\max})$; 2. – контуры объемных доменов d ; 3. – активные разломы; 4. – очаги землетрясений $L(M_{\max})$ с $M=6.0$ и более, отклоняющиеся от осей линеаментов на величину D , обратно пропорциональную магнитуде M землетрясений (см. график на заднем плане); 5. – очаги землетрясений с $M=5.5$ и менее, рассеиваемые случайным образом в доменах.

Линеаменты, домены и потенциальные очаги, как и землетрясения, классифицируются по величине максимальной магнитуды ($M_{\max}$). Верхний уровень магнитуд ($M_{\max}$) определяется реальной сейсмогеодинамической обстановкой, а нижний ($M_{\min}$) – минимальной сейсмической опасностью, учет которой необходим для строительных объектов. В ОСР-97 принято $M_{\min}=4.0$, а сейсмическая интенсивность $I_{\min}=5$ баллов.

В соответствии с моделью зон ВОЗ, землетрясения с магнитудой $M=6.0$ и более принадлежат линеаментным структурам, а с $M=5.5$ и менее – рассеиваются случайным образом в доменах. Все линеаменты с $M_{\max}$ содержат также линеаменты меньших рангов, вплоть до $M=6.0$, которые отклоняются случайным образом (по методу Монте-Карло) от оси основных линеаментов в соответствии с величиной стандартного отклонения $\sigma(\text{км})$, согласно функции распределения (см. рис. 4).

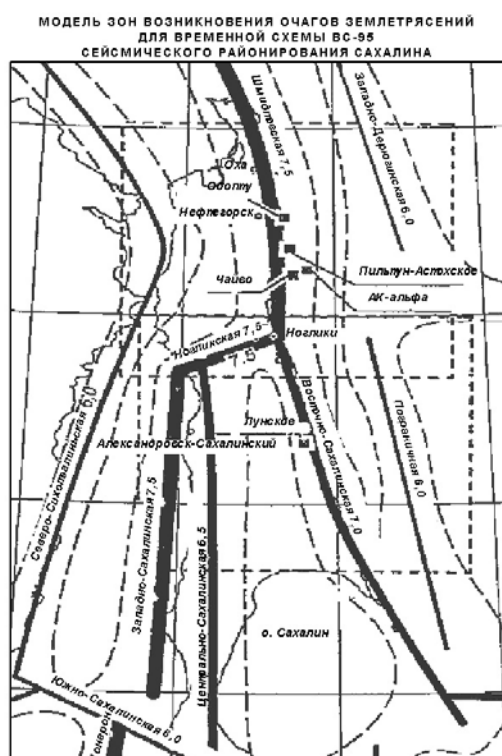


Рис. 5. Модель зон ВОЗ, использованная при создании Временной схемы – ВС-95 сейсмического районирования о. Сахалин.

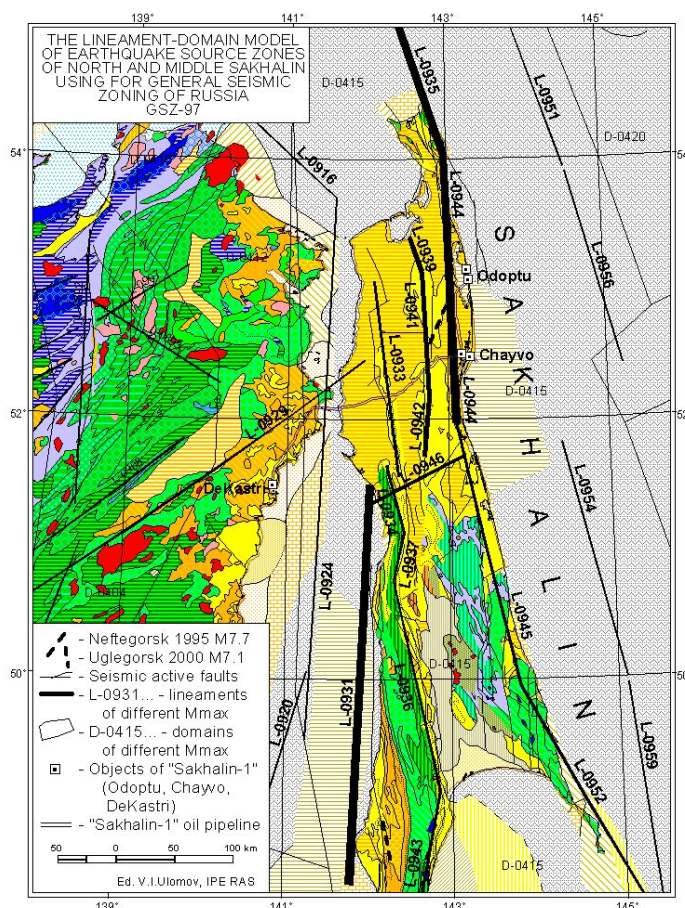


Рис. 6. Фрагмент ЛДФ-модели зон возникновения очагов землетрясений Сахалина и сопредельной территории, использованная для создания комплекта вероятностных карт ОСР-97. Количественные характеристики каждого из линеаментов и доменов приведены в соответствующих таблицах далее по тексту.

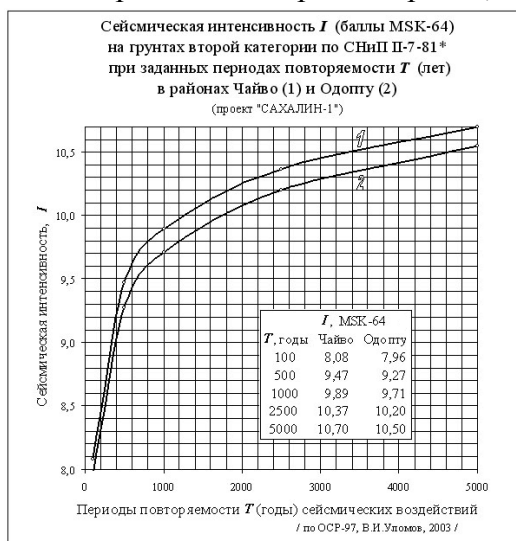
До разработки окончательной модели источников землетрясений Северной Евразии, охватывающей территорию России и сопредельные с ней сейсмоактивные регионы, сразу же после Нefтегорского землетрясения была оперативно создана модель зон ВОЗ о-ва Сахалин, изображенная на рис. 5 и использованная при создании Временной схемы сейсмического районирования Сахалина – ВС-95. Как показано в Сводке (табл. 8), согласно этой карте-схеме, район расположения всех объектов проекта «Сахалин-1» на северо-востоке острова был оценен в 9 баллов с повторяемостью один раз в 1000 лет.

На рис. 6 приведен фрагмент модели зон ВОЗ Северной Евразии, уточненный новыми для того времени данными о возрасте палеосейсмодислокаций, исследованных сотрудником ОИФЗ д-ром Е.А.Рогожиным на Верхнее-Пильтунском разломе. В результате им впервые был определен период 400–500 лет повторяемости на этом разломе событий, подобных Нефтегорскому. Эти, а также другие исходные данные (включение в каталог землетрясений Японского моря), явились причиной повышения оценки сейсмической опасности северо-востока Сахалина, по сравнению с Временной схемой ВС-95.

Как будет показано ниже, благодаря более детальным недавним (2002–2003 гг.) исследованиям российских геологов А.Кожурина, А.Строма и других, в том числе японских ученых и специалистов из фирмы ABS-Consulting, оценки периодов повторяемости крупных сейсмических событий были увеличены до 1000–2000 лет и более. Это обстоятельство, а также более полная информация о других неизвестных ранее разрывных нарушениях, привели к очередному уточнению сейсмической опасности территории Сахалина на основе исследований по детальному сейсмическому районированию (ДСР). Экспертизе этих исследований посвящена последующая часть настоящего Заключение.

На представленном на рис. 6 фрагменте ЛДФ-модели зон ВОЗ Сахалина, использованных при ОСР-97, отрезками линий разной толщины показаны линеаменты и их сегменты с шагом 0.5 ± 0.2 единицы магнитуды. Следует заметить, что в этой модели был выделен лишь один домен, охватывающий всю территорию острова и его шельфов. (Ниже будет показано, что в современной модели зон ВОЗ, одобренной настоящим Заключением, выделено девять доменов и значительно большее число линеаментов.)

В соответствии с принятой в ОСР-97 концепцией, для каждого сейсмогенетически единого региона Северной Евразии, в том числе и для Сахалино-Японского, были определены



долговременные средние характеристики сейсмического режима, и весь поток сейсмических событий соответствующих магнитуд распределен между всеми сейсмогенерирующими структурными элементами зон ВОЗ пропорционально их размерам и в соответствии с их рангом. Осуществленная таким образом сейсмологическая параметризация явилась основой для моделирования долговременной сейсмичности и виртуального сейсмического режима в каждом из структурных элементов зон ВОЗ. Виртуальная сейсмическая «активизация» модели зон ВОЗ, в свою очередь, послужила основой для расчетов повторяемости сейсмических воздействий и оценки сейсмической опасности на всей территории Северной Евразии.

Рис. 7. Кривые вероятностного анализа сейсмической опасности площадок в районах объектов Чайво и Одопту, по данным ОСР-97.

В таблицах 3 и 4 для модели зон ВОЗ, использованной для ОСР-97, приведены выборки из банка данных ОСР-97. Ниже объяснено содержание колонок этих таблиц. В таблице 3, с целью удобства последующих сопоставлений, жирным шрифтом выделены параметры Пильтун-Гаромайского линеамента (L-0944), соответствующего одноименному разлому, рассмотренному в случае ОСР-97 как единый, т.е. без разделения его на сегменты. Видно, что принятый в ОСР-97 период повторяемости вдоль него событий с $M=7.5$ составил около 180 лет. На основе модельного каталога землетрясений и адекватной сейсмологической параметризации модели зон ВОЗ с учетом затухания сейсмического эффекта с удалением от источников землетрясений, используя метод Монте-Карло, нами выполнен вероятностный анализ (ВАСО) для объектов Чайво и Одопту (рис. 7). Показано,

что по картам ОСР-97-В и ОСР-97-С сейсмический эффект достигает 10 баллов, что согласно СНиП-II-7-81* требует разработки Специальных технических условий (СТУ).

Таблица 3.

Параметры сейсмолинеаментов, использовавшихся в расчетах сейсмической опасности Сахалина для карты ОСР-97 (на карте фиг.6 их номера помечены жирным курсивом)

Name	M _{max}	H _{min}	H _{max}	T _{8.5}	T _{8.0}	T _{7.5}	T _{7.0}	T _{6.5}	T _{6.0}	Az	e1	de1	e2	De2	l, km
L-0916	6,0	2,40	12,4						2611	118	90	20	0	0	120
L-0917	6,0	3,00	13,0						2747	222	90	20	0	0	114
L-0920	6,0	2,00	12,0						1835	205	90	20	0	0	171
L-0924	6,0	4,50	14,5						679	185	90	20	0	0	463
L-0929	6,0	1,70	11,7						786	245	90	20	0	0	398
L-0931	7,5	5,00	30,0			121	75	140	149	184	90	20	0	0	342
L-0933	6,5	4,10	19,1					284	303	169	90	20	0	0	168
L-0934	6,5	5,00	20,0					814	869	158	90	20	0	0	57
L-0935	7,5	4,80	29,8			304	188	351	374	150	90	20	0	0	136
L-0936	6,5	5,00	20,0					259	276	162	90	20	0	0	184
L-0937	6,5	5,00	20,0					1133	1206	199	90	20	0	0	42
L-0939	7,0	5,00	25,0				804	1497	1597	149	90	20	0	0	32
L-0941	7,0	5,00	25,0				240	446	476	175	90	20	0	0	107
L-0942	7,0	5,00	25,0				498	929	990	189	90	20	0	0	51
L-0943	6,5	5,00	20,0					320	341	196	90	20	0	0	149
L-0944	7,5	5,00	30,0			181	112	209	223	177	90	20	0	0	228
L-0945	6,5	5,00	20,0					206	220	160	90	20	0	0	231
L-0946	6,5	5,00	20,0					514	548	252	90	20	0	0	92
L-0951	6,0	5,00	15,0						355	149	90	20	0	0	143
L-0952	6,5	3,90	18,9					220	235	140	90	20	0	0	216
L-0954	6,0	5,40	15,4						246	159	90	20	0	0	207
L-0956	6,0	5,40	15,4						299	156	90	20	0	0	170
L-0959	6,0	5,10	15,1						261	170	90	20	0	0	195

Таблица 4.

Параметры домена, использовавшегося в расчетах сейсмической опасности Сахалина для карты ОСР-97

Name	M _{max}	H _{min}	H _{max}	T _{5.5}	T _{5.0}	T _{4.5}	T _{4.0}	Az	e1	de1	e2	de2	S, th. km ²
D-0415	5,5	5	10	4,1	1,5	0,6	0,2	0-360	0-180	0	0	0	350,46

Здесь: Name – тип сейсмического источника: L-nnnn – линеаменты, D-nnnn – домены, nnnn – номер; M_{max} – максимальная возможная магнитуда, соответствующая MLH, которая затем при расчете сейсмической опасности пересчитывается в M_w; H_{min} – минимальная глубина верхней кромки сейсмического очага, соответствующая глубине залегания верхней границы консолидированной коры, км; H_{max} – максимальная глубина гипоцентра землетрясения, км; T_M – период повторяемости землетрясений различных магнитуд (включая M_{max}), возникающих в каждой из зон сейсмических источников (т.е. без приведения потока событий к единицам длины или площади источника, поскольку все источники заранее параметризованы с учетом их размеров); Az – азимут ориентации горизонтальной оси линеамента (задается с учетом возможных отклонений); e1 – угол наклона к

горизонту плоскости линеаментных структур и модельных очагов землетрясений; de_1 – возможные отклонения угла наклона плоскости линеамента и модельных очагов землетрясений; e_2 – другие возможные варианты углов наклона к горизонту; de_2 – возможные отклонения этих углов наклона; l – горизонтальная протяженность линеамента, км; s – площадь домена, тыс. км².

К основным достоинствам новой методики ОСР-97 и ее программно-математического обеспечения, по сравнению с прежними отечественными подходами и методами, относятся следующие:

- региональный подход к созданию модели источников землетрясений, обеспечивающий адекватную сейсмологическую параметризацию зон возникновения сейсмических очагов (оценка магнитуды максимальных возможных землетрясений, реалистичные параметры сейсмического режима и др.);
- представление графиков повторяемости землетрясений различных магнитуд не в виде простейших экспонент, как прежде, а с учетом разнообразной информации о сейсмичности, сейсмическом режиме и сейсмогеодинамике (в том числе сведения о палеосейсмодислокациях, исторической хронике и т.п.);
- представление очагов землетрясений не в виде точек, а в соответствии с их естественными размерами, магнитудой, ориентацией в пространстве и распределением по глубине и др.;
- использование в качестве энергетической характеристики очагов землетрясений величин сброшенных напряжений, сейсмических моментов, моментных магнитуд M_w (вместо традиционных M_s и M_{LH}) и других количественных параметров;
- описание поля некогерентного излучения в окрестности протяженного очага, позволившее решить проблему завышения расчетной сейсмической интенсивности на малых эпицентральных расстояниях и смоделировать эллиптичность изосейст в ближней зоне от протяженных очагов землетрясений больших магнитуд;
- учет на всех этапах исследований вероятностных оценок достоверности тех или иных результатов и входных данных (разброс величины сейсмической интенсивности при заданных магнитуде и расстоянии, флуктуации углов наклона плоскостей линеаментных структур, распределение по глубине очагов и т.п.);
- создание комплекта карт (а не одной карты, как прежде) вероятностного сейсмического районирования (ОСР-97), получивших применение в практике сейсмостойкого строительства объектов разных категорий ответственности и сроков службы.

Вместе с тем, поскольку карты ОСР-97 выполнены в относительно мелком масштабе (1:2 500 000) и не учитывают детальных особенностей местной геотектоники, эти оценки могут (и должны) уточняться на основе дополнительных данных, полученных при детальном сейсмическом районировании (ДСР) и микрорайонировании (СМР).

В этом и состояла основная задача настоящего Заключение. Новые расчеты базировались на уточненной модели источников землетрясений (зон ВОЗ). При этом предпочтение отдавалось отечественной технологии оценки сейсмической опасности, разработанной для ОСР-97.

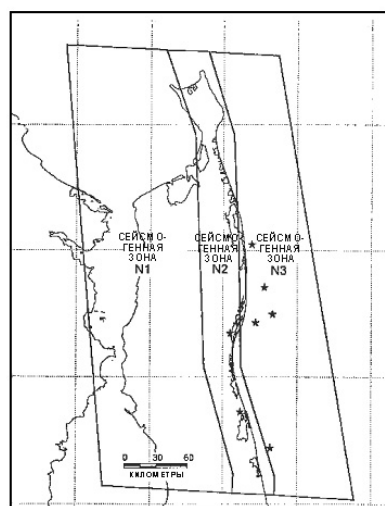
Модели источников землетрясений, предложенные и использованные другими авторами.

Следует отметить, что все Отчеты фирмы ABS-Consulting, с которыми знакомился Эксперт, оставляют очень хорошее впечатление своей фундаментальностью и тщательной проработкой малейших деталей. В этом отношении Отчеты российских коллег значительно проигрывают. Причиной этому является незнание большинством российских исполнителей научных основ и программно-математического обеспечения отечественных разработок в этой области и, прежде всего, незнание технологии ОСР-97. В лучшем случае,

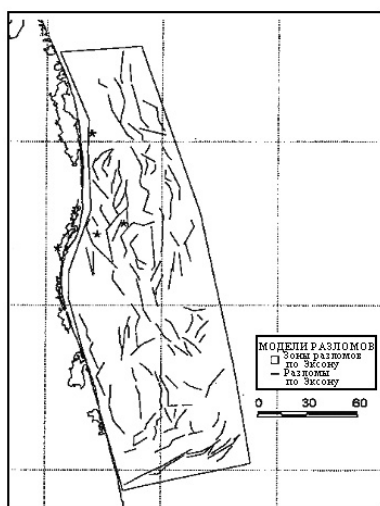
практически автоматически, российские специалисты пользуются доступной версией американской программы Seisrisk-III. В преобладающем же большинстве случаев, стремясь лично побольше заработать на заказах иностранных и российских фирм, они не привлекают в качестве соисполнителей специалистов, владеющих технологией ОСР-97.

Ниже рассмотрены модели источников землетрясений, разработанные фирмой ABS-Consulting и Институтом морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН.

Поскольку технология ОСР-97 в качестве основы модели зон ВОЗ рассматривает структурированную сейсмичность, следует сразу же признать неприемлемыми упрощенные модели «рассеянной сейсмичности», ранее предложенные EQE и ЭксонМобил и изображенные на рис. 8. Такие модели, «размазывая» сейсмические события больших магнитуд по обширной площади, существенно занижают оценки сейсмической опасности.



Зоны распределенных разломов по EQE (зоны площадных источников землетрясений для участков акватории севера Сахалина и береговых участков сооружений, указанных звездочками).



Модели морских разломов по данным компании ЭксонМобил для площадок под сооружения на шельфе северной части о. Сахалин (показаны звездочками).

Приемлемыми для обсуждения и расчетов по технологии ОСР-97 оказались две модели – модель фирмы ABS-Consulting (автор д-р Р.С. Thenhaus, рис. 9) и модель ИМГГ, представленная А.И.Ивашенко и модернизированная с его согласия Экспертом. Заключительная версия модели ИМГГ по своей конструкции и принципам геометрической и сейсмологической параметризации полностью отвечает требованиям технологии ОСР-97.

Рис. 8. Примеры неприемлемых моделей с распределенными очагами землетрясений.

Модель фирмы ABS-Consulting.

Модель фирмы ABS-Consulting, представленная д-ром Р.С. Thenhaus (рис. 9), была исследована двояким образом. Первый вариант расчетов был выполнен нами без каких-либо изменений геометрии и сейсмологических параметров этой модели, а во втором варианте параметризация модели по магнитуде была адаптирована к технологии ОСР-97.

При всей стройности и строгости методологии, изложенной в отчетах ABS и доктором Р. Thenhaus (во время нашей встречи), возник целый ряд принципиальных вопросов.

В первом варианте наши расчеты по модели Р. Thenhaus привели к чрезвычайно высоким (даже по сравнению с картами ОСР-97) оценкам сейсмической опасности исследуемых объектов проекта «Сахалин-1». Результаты этих расчетов можно увидеть в Сводной таблице в конце Заключения (табл. 8, колонки 11–12). Конечно, на них ориентироваться совершенно не следует. Причиной столь высоких оценок может быть использование в расчетах чрезмерной дифференциации сейсмических событий по магнитуде (через 0.05 единицы магнитуды, по Р. Thenhaus), неприемлемой для технологии ОСР-97. В этом варианте, как уже сказано, нами были выполнены расчеты строго в соответствии с данными Р. Thenhaus, т.е. без преобразования кумулятивного графика повторяемости землетрясений в интервальный график, как это требует технология ОСР-97. На рис. 10 и 11 приведены оба типа этих графиков.

Во втором варианте все данные ABS, без их искажения, были нами адаптированы к методологии ОСР-97, т.е. преобразованы из кумулятивного представления в интервальные графики повторяемости землетрясений и сгруппированы с шагом 0.5 ± 0.2 магнитуды. При этом потоки сейсмических событий, естественно, суммировались в каждой из групп. Результаты расчетов приведены в таблице 5.

Рис. 9. ABS-модель источников землетрясений северной части Сахалина (after P. Thenhaus).

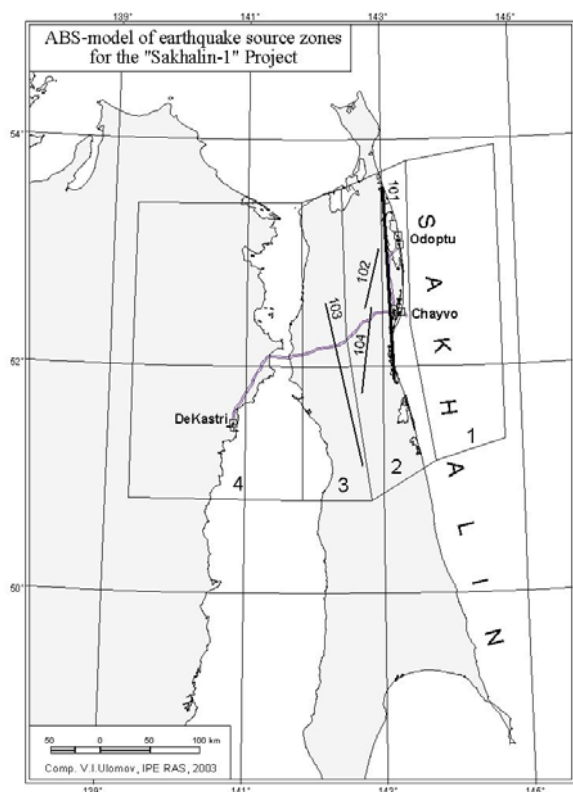
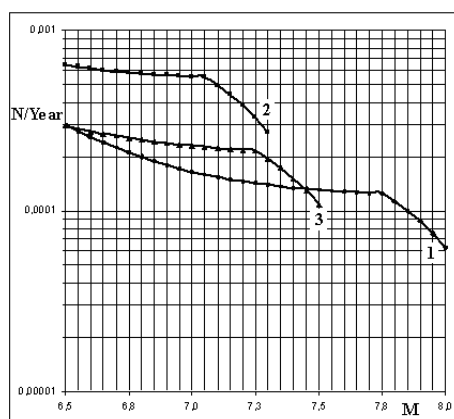
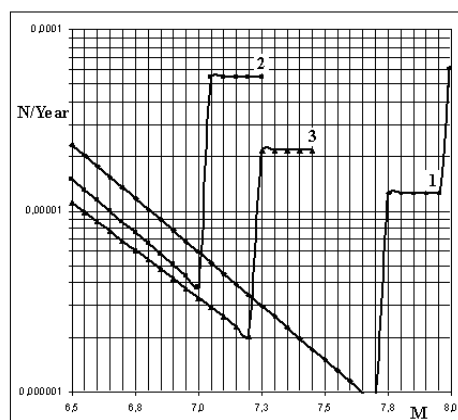


Рис. 10 и 11. Кумулятивный (вверху) и интервальный графики повторяемости землетрясений на линейных источниках землетрясений (Пильтун, Верхний Пильтун и Центрально-Сахалинский разломы), по модели P. Thenhaus.



Cumulative Recurrence Frequencies for Fault Sources:
1-Piltun, 2-Upper Piltun, 3-Central Sakhalin



Interval Recurrence Frequencies for Fault Sources:
1-Piltun, 2-Upper Piltun, 3-Central Sakhalin

(compilation by V. Ulomov, after ABS-data, 2003)

Таблица 5

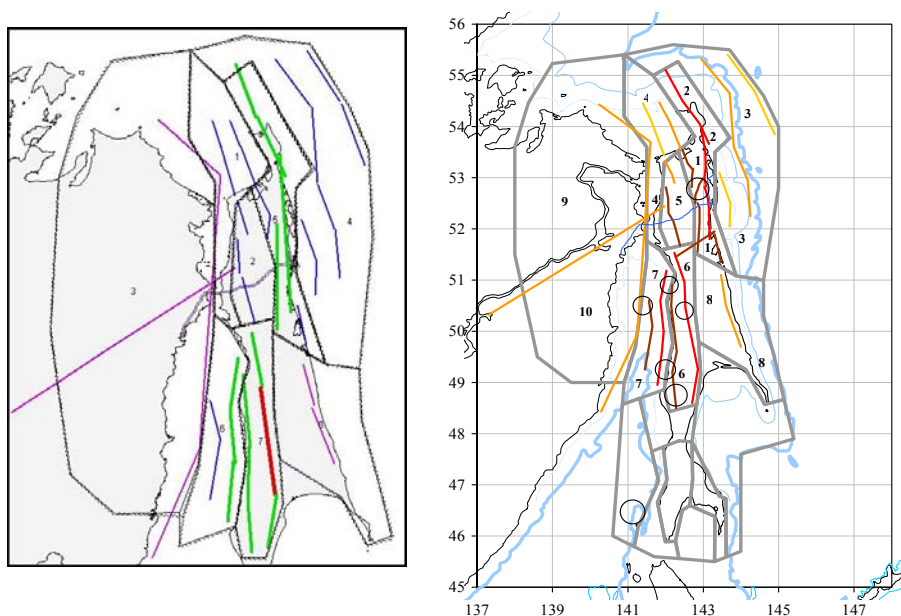
Lin.	Piltun		Upper Piltun		Central Sakhalin		SUM	
Mw	V	T	V	T	V	T	V	T
6.5	0.00008977	11139	0.00005804	17229	0.00000443	22583	0.0001921	5205
7	0.00006816	14671	0.0002527	3957	0.00003736	26766	0.0003582	2791
7.5	0.00001736	57603	0.0001098	9109	0.0002164	4622	0.0005631	1776
8	0.00012509	7994					0.0001251	7994

Не говоря уже о необычной форме самих графиков (особенно, интервального), они совершенно не согласуются с реально наблюдаемым сейсмическим режимом исследуемой территории Сахалина. Так, землетрясения с магнитудой $M=6.5$ возникают не один раз в 5205 лет, как следует из графиков и таблицы 5, а фактически в сто и более раз чаще. Если же рассматривать возникновение таких сейсмических событий отдельно по разломам, то вообще получаются фантастические периоды повторяемости – от 11000 до 22000 лет. То же самое относится и к оценкам повторяемости землетрясений других магнитуд.

По-видимому, более реалистично выглядит величина периода повторяемости землетрясений с $M=8.0$ на Пильтунском разломе (период около 8000 лет), полученная д-ром Р. Thenhaus на основе изучения протяженности этого разлома и характера сейсмических подвижек вдоль него. Благодаря этому, результирующие оценки сейсмической опасности, полученные ABS по методике д-ра Р. Thenhaus (таблица 8, столбцы 9, 10), оказались достаточно близкими к полученным нами по последней версии модели ИМГГ (столбцы 17, 18). Наши расчеты, выполненные по методике ОСР-97, привели к существенно более низким оценкам (таблица 8, столбцы 13, 14). Скорее всего, причина кроется в различии методов обработки. Поэтому за окончательную оценку результатов ABS следует принимать значения, полученные ABS и приведенные в колонках 9, 10 (таблица 8).

Модель ИМГГ.

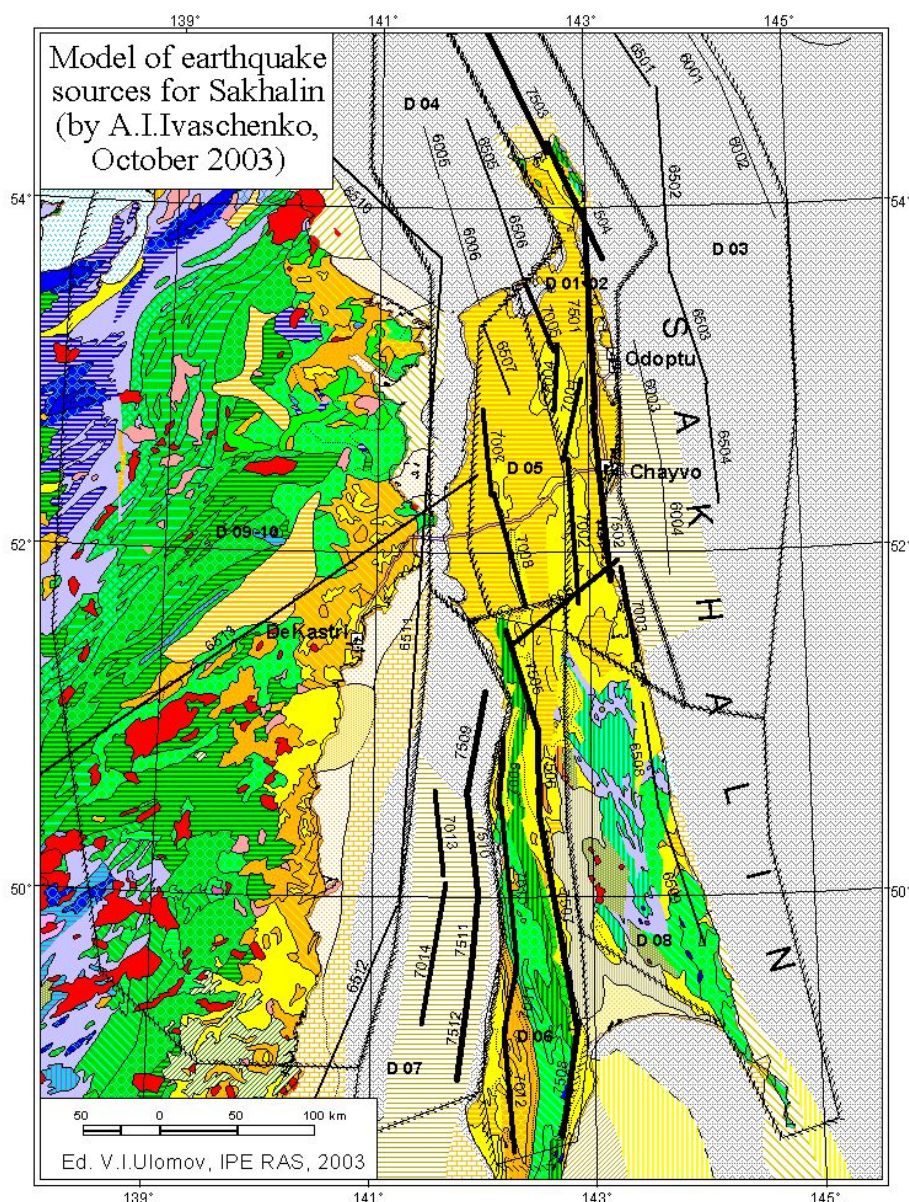
Модель источников землетрясений, разработанная в ИМГГ, была оцифрована и адаптирована к методологии ОСР-97 и к технике ГИС. Д-ром А.И.Иващенко было последовательно представлено несколько вариантов такой модели (рис. 12–13), в связи с чем нами были выполнены итерационные расчеты, как для периода 1000 лет, так и для других периодов повторяемости сейсмических событий. При этом рассматривались два варианта отклонений очагов землетрясений разных магнитуд относительно осей линеаментов: раз-



брос до ± 5 км, не зависящий от магнитуды, по А.И.Иващенко, и дифференцированный по 0.5 единицы магнитуд стандартный разброс, принятый в ОСР-97. При этом использовано уравнение затухания сейсмической интенсивности с расстоянием, принятое в ОСР-97.

Рис. 12. Примеры вариантов моделей ИМГГ.

Результаты этих расчетов приведены в Сводной таблице (колонки 5, 6 и 7, 8). Как видно, оценки по первой версии модели зон ВОЗ (в столбцах ИМГГ и ОСР-97) практически совпадают, несмотря на различный разброс очагов от оси Пильтун-Гаромайского линеамента. Те и другие ниже значений, указанных на карте ОСР-97-В (колонки 3, 4) и наших результирующих оценок, приведенных в Сводной таблице 8 (колонки 17, 18).



На рис. 13 показана окончательная версия ИМГГ-модели зон возникновения очагов землетрясений на исследуемой территории. Как и прежде, линейные элементы изображены в виде отрезков прямых линий с указанными вдоль них номерами. Первые две цифры в номерах линейных элементов обозначают максимальную магнитуду ($M_{\max}$) землетрясений, возможных вдоль соответствующих линейных элементов или их сегментов.

Домены оконтурены косой штриховкой и обозначены буквой D с соответствующим номером.

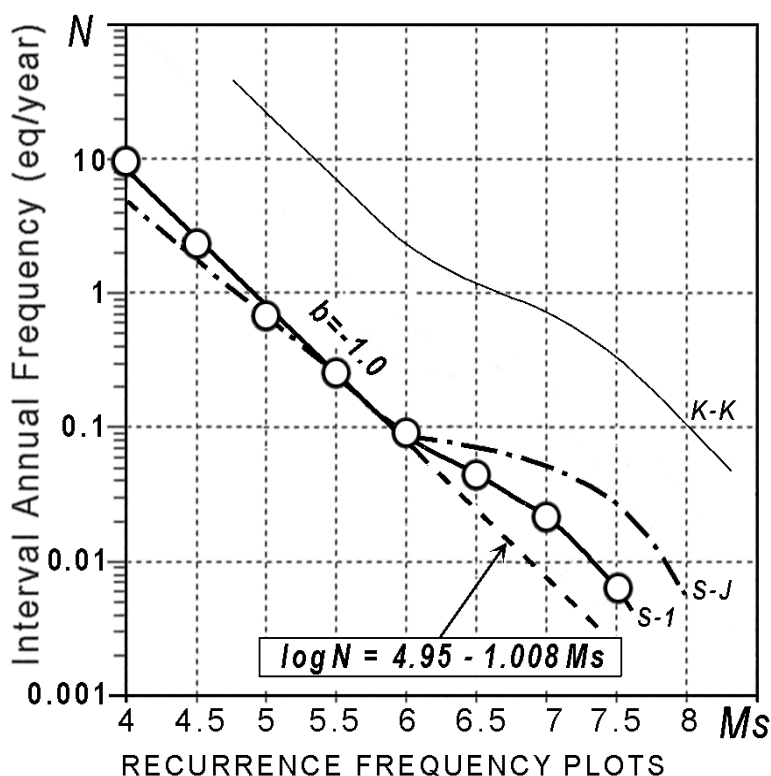
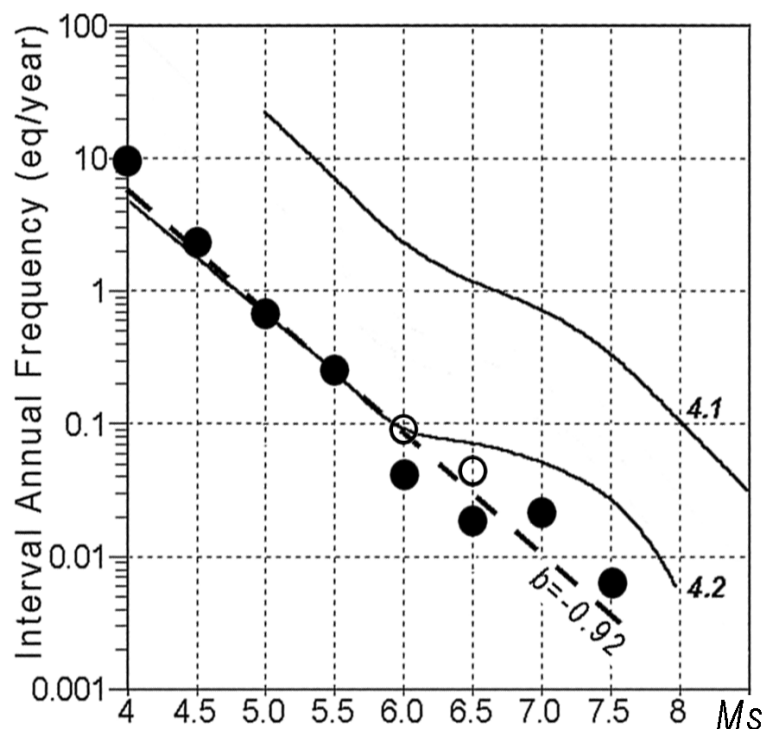
Модель зон ВОЗ с целью большей информативности показана на геологической основе.

Рис. 13. Заключительная версия ИМГГ-модели источников землетрясений северной и центральной части Сахалина и сопредельной территории.

На рис. 14 изображены графики повторяемости землетрясений на исследуемой территории, соответствующие новой модели зон ВОЗ. Верхний рисунок иллюстрирует исходные данные о повторяемости землетрясений разных магнитуд, полученные из реального сейсмологического каталога. Здесь черными кружками показаны наблюдаемые значения среднегодовой частоты повторяемости землетрясений в интервалах ± 0.2 магнитуд с шагом 0.5 единицы магнитуды. Эти данные аппроксимированы пунктирной линией. Сплошные линии – это графики повторяемости землетрясений в Курило-Камчатском (4.1) и Сахалино-Японском регионах (4.2), использованные при создании карт ОСР-97 (номера 4.1 и 4.2 соответствуют нумерации регионов, принятой в ОСР-97).

В результате анализа каталогов и их представительности было принято согласованное решение повысить частоту повторяемости землетрясений с магнитудами $M=6.0 \pm 0.2$ и $M=6.5 \pm 0.2$, как это показано полными кружками на этом рисунке.

На нижнем рисунке изображен усовершенствованный график. Его прямолинейный



RECURRENT FREQUENCY PLOTS
for the northern Sakhalin Island (S-1); circles - observed data
(IMGG-model of source zones, modified after V.I. Ulomov, 2003);
S-J - Sakhalin-Japan Sea and K-K - Kuril-Kamchatka Regions
from GSZ-97

его прямолинейный (экспоненциальный) участок с углом наклона $b=-1.0$ построен методом максимального правдоподобия для интервала магнитуд $M=4.0\div6.0$. Для этого участка графика, продолженного пунктиром в сторону больших магнитуд, составлено уравнение, показанное ниже.

Данные о наиболее крупных, «характеристических», землетрясениях с $M=6.5\div7.5$ расположены выше этой пунктирной линии и характеризуются большей частотой повторяемости.

Штрих-пунктиром показан график, использованный в ОСП-97 для Сахалино-Японского региона (S-J).

Как видно, новый график (S-1) на участке магнитуд $6.5\div7.5$ расположен ниже графика S-J. По конфигурации он подобен графику для Курило-Камчатского региона (K-K), использованному при ОСП-97. Это является еще одним аргументом в пользу реалистичности полученного графика S-1 и, следовательно, реалистичности оценки сейсмического режима региона.

В таблице 6 жирным шрифтом выделены Пильтунский и Гаромайский линейные элементы (для сравнения с таблицей 3). В нижней строке этой таблицы приведены рассчитанные нами периоды повторяемости землетрясений с магнитудой от 7.5 до 6.0, отраженные в виде частоты на графике рис. 14.

В таблице 7 приведены аналогичные параметры для доменов.

Рис. 14. Графики повторяемости землетрясений на исследуемой территории. Пояснения в тексте.

Таблица 6.

Параметры сейсмических линеаментов в заключительной версии ИМГГ- модели источников землетрясений Северного и Центрального Сахалина
(составлено по данным А.И.Иващенко и модификации В.И.Уломова)

Name	M _{max}	H _{min}	H _{max}	T _{7.5}	T _{7.0}	T _{6.5}	T _{6.0}	Az	e1	de1	e2	de2	l, km
7501	7,5	1--6	7--11	953	644	499	305	178	90	20	0	0	127
7502	7,5	1--6	7--11	2110	1427	1105	675	175	90	20	0	0	115
7503	7,5	1--6	7--11	1667	1129	874	534	154	90	20	0	0	95
7504	7,5	1--6	7--11	1934	1307	1014	618	155	90	20	0	0	82
7505	7,5	1--6	7--11	2525	1408	752	364	164	90	20	0	0	66
7506	7,5	1--6	7--11	2941	1642	876	424	178	90	20	0	0	57
7507	7,5	1--6	7--11	1242	693	370	179	170	90	20	0	0	134
7508	7,5	1--6	7--11	2252	1255	670	324	189	90	20	0	0	74
7509	7,5	1--6	7--11	1923	885	472	228	191	90	20	0	0	66
7510	7,5	1--6	7--11	1880	864	461	223	175	90	20	0	0	67
7511	7,5	1--6	7--11	2825	1299	693	335	185	90	20	0	0	45
7512	7,5	1--6	7--11	1730	796	425	205	188	90	20	0	0	73
7001	7	1--6	7--11		1916	1482	906	194	90	20	0	0	56
7002	7	1--6	7--11		1160	899	549	179	90	20	0	0	92
7003	7	1--6	7--11		1727	1335	817	169	90	20	0	0	62
7004	7	1--6	7--11		2667	2069	1261	184	90	20	0	0	40
7005	7	1--6	7--11		2268	1756	1073	156	90	20	0	0	47
7006	7	1--6	7--11		1100	686	360	232	90	20	0	0	91
7007	7	1--6	7--11		1751	1658	1154	176	90	20	0	0	57
7008	7	1--6	7--11		1346	1274	887	165	90	20	0	0	74
7009	7	1--6	7--11		2092	1117	540	183	90	20	0	0	45
7010	7	1--6	7--11		926	494	239	174	90	20	0	0	101
7011	7	1--6	7--11		2058	1097	530	192	90	20	0	0	45
7012	7	1--6	7--11		1192	636	308	175	90	20	0	0	78
7013	7	1--6	7--11		1035	552	267	174	90	20	0	0	56
7014	7	1--6	7--11		606	323	156	190	90	20	0	0	96
6501	6,5	1	7			1331	1425	145	90	20	0	0	84
6502	6,5	1	7			910	975	175	90	20	0	0	123
6503	6,5	1	7			1471	1571	161	90	20	0	0	76
6504	6,5	1	7			1431	1531	175	90	20	0	0	78
6505	6,5	1	7			1817	1841	158	90	20	0	0	45
6506	6,5	1	7			1306	1325	162	90	20	0	0	62
6507	6,5	1	7			1899	1325	161	90	20	0	0	50
6508	6,5	1	7			1734	524	172	90	20	0	0	67
6509	6,5	1	7			1247	378	161	90	20	0	0	94
6510	6,5	1	7			4221	1571	134	90	20	0	0	120
6511	6,5	1	7			1215	452	181	90	20	0	0	419
6512	6,5	1	7			2804	1040	204	90	20	0	0	182
6513	6,5	1	7			1274	474	237	90	20	0	0	401
6001	6	1	7				1332	149	90	20	0	0	90
6002	6	1	7				1183	158	90	20	0	0	101
6003	6	1	7				1502	167	90	20	0	0	80
6004	6	1	7				1648	176	90	20	0	0	72
6005	6	1	7				2296	160	90	20	0	0	36
6006	6	1	7				985	164	90	20	0	0	84
Return periods in the region				151,3	44,9	22,1	11,0						

Как видно, в целом периоды повторяемости сейсмических событий с $M=7.5\pm0.2$ – 6.0 ± 0.2 вдоль всех линеаментов в пределах всей рассматриваемой территории вполне реалистичны. То же самое относится и к событиям в доменах (табл. 7).

Таблица 7

Параметры сейсмического режима доменов в заключительной версии ИМГГ- модели источников землетрясений Северного и Центрального Сахалина
(составлено по данным А.И.Иващенко)

Name	M _{max}	H _{min}	H _{max}	T _{5.5}	T _{5.0}	T _{4.5}	T _{4.0}	Az	e1	de1	e2	de2
D 01-02	5,5	1	7	23,46	5,71	1,17	0,22	0-360	90	20		
D 03	5,5	1	7	36,20	13,69	5,42	1,29	0-360	90	20		
D 04	5,5	1	7	57,14	17,39	5,41	1,23	0-360	90	20		
D 05	5,5	1	7	117,65	22,21	3,64	0,67	0-360	90	20		
D 06	5,5	1	7	13,60	5,02	1,97	0,92	0-360	90	20		
D 07	5,5	1	7	16,96	12,57	7,90	2,35	0-360	90	20		
D 08	5,5	1	7	124,15	33,20	8,88	2,38	0-360	90	20		
D 09-10	5,5	1	7	86,58	28,47	9,36	3,08	0-360	90	20		
Return periods in the region, years				4,026	1,440	0,425	0,101					

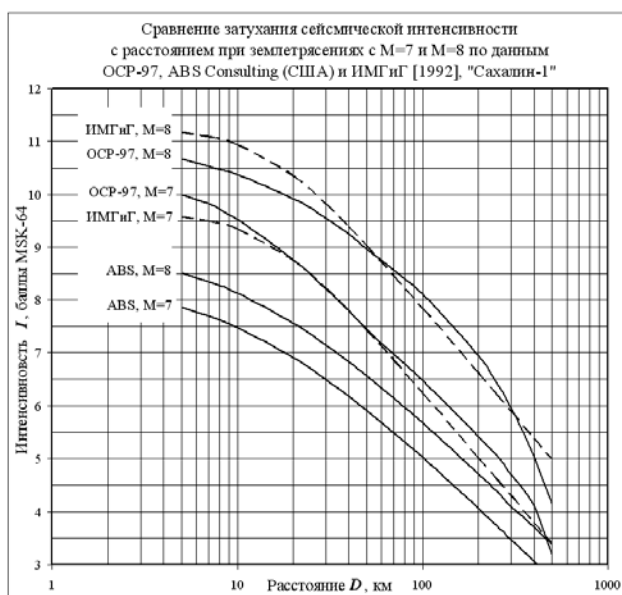
Здесь: 7501 – номера линеаментов, D-01 – номера доменов; H_{min} – минимальная глубина верхней кромки сейсмического очага, км; H_{max} – максимальная глубина гипоцентра землетрясения, км; T_M – период повторяемости землетрясений различных магнитуд; Az – азимут оси линеамента; e1 – угол наклона к горизонту плоскости линеаментов и его возможные отклонения de1; e2 – другие возможные варианты углов наклона и их отклонения de2; l – горизонтальная протяженность линеамента, км.

5. ЗАТУХАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА С РАССТОЯНИЕМ.

На рис. 15 сопоставлены графики затухания сейсмической интенсивности с удалением от очагов землетрясений с магнитудой M=7.0 и M=8.0, составленные по данным ОСП-97, ABS-Consulting и ИМГГ. Эти кривые описываются следующими уравнениями, составленными ABS Consulting (1) и ИМГГ (2) [Чернов, Иващенко, 1992]:

(1). $I_{MSK} = 1.23 + 2.35M_W - 0.113M_W^2 - 1.51 \ln(R + 12.0)$; $\sigma = 0.77$, где M_W - моментная магнитуда, R – эпицентральное расстояние, σ – стандартное отклонение.

(2). $I_{MSK} = 3.31 + 1.6M_{LH} - 4.12 \log[(R^2 + H^2)^{1/2}]$, где M_{LH} – магнитуда, определенная по поверхностным волнам, практически совпадающая с величиной M_W , R – эпицентральное расстояние, H – глубина гипоцентра (в расчетах графиков принято H=15 км).



ных авторов.

Как видно, графики ABS-Consulting существенно занижают оценки сейсмической интенсивности по сравнению с данными ОСП-97. Данные ABS-Consulting и ИМГГ так же отличаются друг от друга. Наиболее реалистичными нам представляются характеристики затухания, использованные при ОСП-97. Именно они были положены в основу заключительной оценки сейсмической опасности объектов проекта «Сахалин-1», по последней версии модели ИМГГ источников землетрясений.

Рис. 15. Сопоставление характера затухания сейсмического эффекта с расстоянием для землетрясений с магнитудой Ms=7.0 и Ms=8.0, по данным раз-

5. ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

На основе полученных данных нами выполнен вероятностный анализ сейсмической опасности (ВАСО) для каждого из объектов проекта «Сахалин-1». Результаты ВАСО представлены в виде графиков на рис. 16 и 17 и таблиц, расположенных под каждым из них. Они характеризуют величину сейсмических воздействий при разных периодах их повторяемости. ВАСО учитывает разного рода неопределенности, имеющиеся в моделях источников землетрясений и в моделях затухания сейсмического эффекта с расстоянием, а также погрешности в других исходных данных. Графики и расположенные ниже их таблицы представлены как в параметрах сейсмической интенсивности, так и в ускорениях колебаний грунта 2-й категории в соответствии со СНиП-II-7-81*.

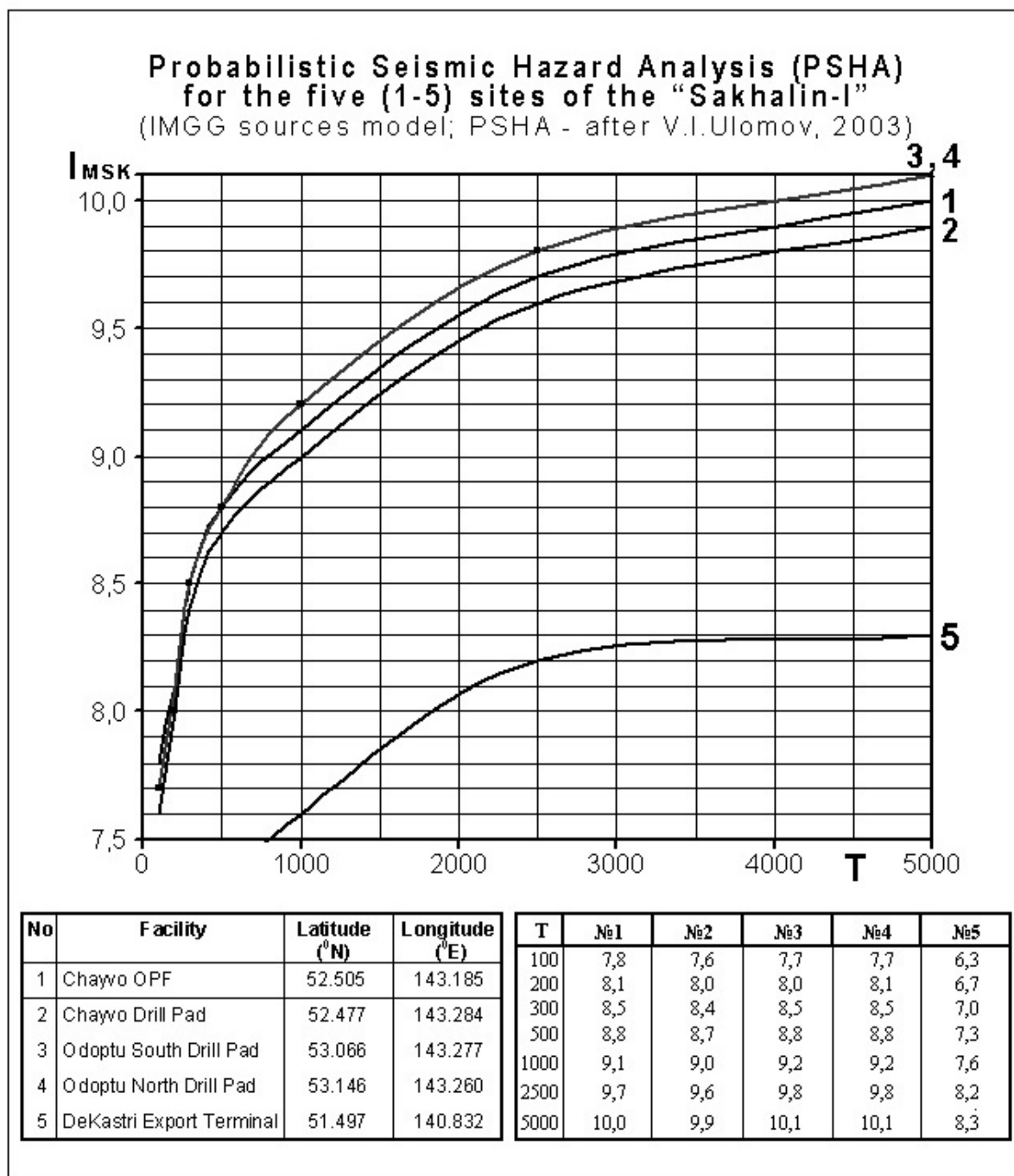
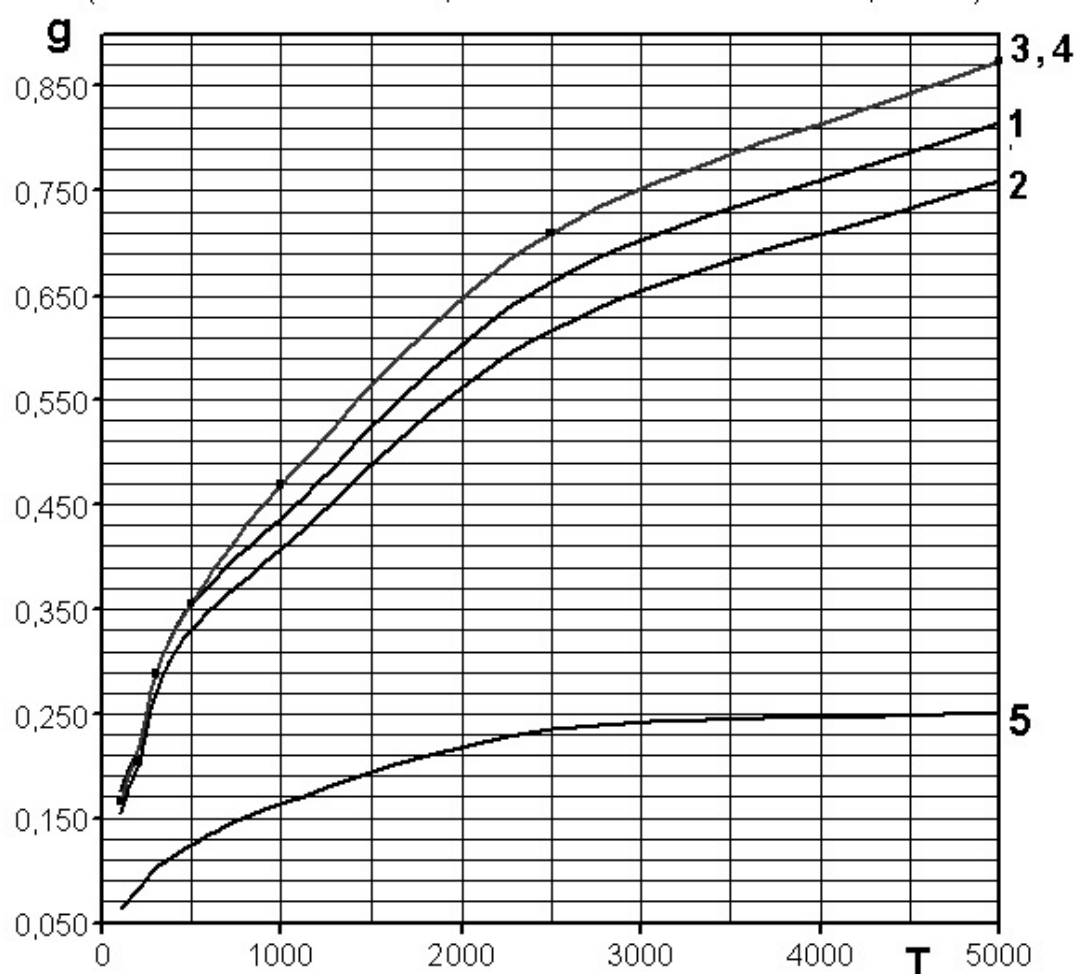


Рис. 16. Вероятностный анализ сейсмической опасности для объектов 1–5 Проекта «Сахалин-1», выраженный в параметрах сейсмической интенсивности.

Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)
for the five (1-5) sites of the "Sakhalin-1"
(IMGG sources model; PSHA - after V.I.Ulomov, 2003)



No	Facility	Latitude (°N)	Longitude (°E)	T	№1	№2	№3	№4	№5
1	Chayvo OPF	52.505	143.185	100	0,178	0,155	0,166	0,166	0,063
				200	0,219	0,204	0,204	0,219	0,083
				300	0,288	0,269	0,288	0,288	0,102
2	Chayvo Drill Pad	52.477	143.284	500	0,355	0,331	0,355	0,355	0,126
				1000	0,437	0,408	0,468	0,468	0,164
				2500	0,662	0,618	0,710	0,710	0,234
3	Odoptu South Drill Pad	53.066	143.277	5000	0,816	0,761	0,874	0,874	0,251
4	Odoptu North Drill Pad	53.146	143.260						
5	DeKastri Export Terminal	51.497	140.832						

Рис. 17. Вероятностный анализ сейсмической опасности для объектов 1–5 Проекта «Сахалин-1», выраженный в долях g – ускорения силы тяжести ($g = 980.665 \text{ см/с}^2$).

Таблица 8

СВОДНАЯ ТАБЛИЦА ОЦЕНОК СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ПРОЕКТА «САХАЛИН-1»
по данным разных моделей источников землетрясений и методов обработки
(Составил В.И.Уломов, ИФЗ, 2 ноября 2003 г.)

№	Объекты Проекта «Сахалин-1» и их географические координаты	Оценка Сейсмической опасности по норматив- ным данным:		Оценка сейсмиче- ской опасности по дейст- вующей норматив- ной карте ОСР-97-В (повторяе- мость 1000 лет), 1997 г.		Оценки по предвари- тельной версии ИМГГ модели источников землетрясений с зату- ханием по ОСР-97, но с «рассеянием» очагов относительно оси сейсмолинеаментов по данным:				Оценка сейсмиче- ской опас- ности по ABS (данные из отчетов ABS 2002 г. без умно- жения на 2/3)		Расчет по ABS-модели источников землетрясений, но по технологии ОСР-97		Оценка сейс- мической опас- ности по технологии ОСР-97 и по модели ИМГГ с рас- пределенными Очагами в полосе 5 км, Октябрь 2003		Окончатель- ная оценка сейсмической опасности площадок Объектов «Сахалин-1» по техноло- гии ОСР-97, Октябрь 2003			
		Преж- няя карта ОСР, 1978 г.	Вре- мен- ная схема, 1995 г.							Кумулятив- ный график с шагом 0.05 единицы магнитуды (опытный расчет строго по данным ABS)		Интерваль- ный график с шагом 0.5 единицы магнитуды (данные ABS адаптирова- ны к методу ОСР-97)							
		Сейсмическая интенсивность MSK-64 по данным различных моделей для 1000-летнего периода повторяемости (в долях и в целочисленных значениях интенсивности)																	
1.	Береговой комплекс БКП Чайво 52.505°N; 143.185°E	7	9	9.89	10	8.89	9	8.79	9	8.8	9	11.8	12	8.11	8	9.09	9	9.09	9
2.	Буровая площадка Чайво 52.477°N; 143.284°E	7	9	9.66	10	8.67	9	8.75	9	8.6	9	11.6	12	7.97	8	8.96	9	8.98	9
3.	Южная буровая площадка Одопту 53.066°N; 143.277°E	7	9	9.68	10	8.71	9	8.65	9	8.4	8	10.1	10	7.95	8	9.11	9	9.01	9
4.	Северная буровая площадка Одопту 53.146°N; 143.260°E	7	9	9.81	10	8.48	8	8.62	9	8.5	8	9.9	10	7.79	8	9.22	9	9.16	9
5.	Экспортный терминал Де-Кастри 51.497°N; 140.832°E	-	-	8.19	8	7.34	7	7.45	7	6.1	6	8.8	9	5.79	6	7.42	7	7.59	8
№№ столбцов:		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18

6. ВЫВОДЫ.

В результате экспертных исследований изучены, проанализированы и обобщены результаты Исследований и Отчетов по оценке сейсмической опасности, выполненных российскими и иностранными компаниями для района строительства объектов Береговой базы Проекта «Сахалин-1». Перечень этих Исследований и Отчетов, представленный Заказчиком, существенно расширен для лучшего понимания проблем и приведен в Приложении.

На основе отобранных и проверенных Экспертом материалов, содержащихся в рассмотренных Исследованиях и Отчетах, выполнены расчеты по оценке сейсмической опасности для пяти (1–5) площадок объектов проекта «Сахалин-1».

Основное внимание было уделено анализу аргументации вероятностных моделей источников землетрясений, от надежности которых зависели все последующие результаты. Среди всех прочих моделей и подходов были выделены две наиболее аргументированные модели зон возникновения очагов землетрясений (зоны ВОЗ) – модель, разработанная фирмой ABS-Consulting (д-р Paul C. Thenhaus), и модель, представленная Институтом морской геологии и геофизики (ИМГГ, д-р А.И.Иващенко). При этом делался акцент на использование принятой в России методологии оценки сейсмической опасности, разработанной при создании комплекта нормативных вероятностных карт Общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСП-97 (см. СНиП-II-7-81*, 2000 г.). Кратко описаны методология и модель источников землетрясений, использованные в ОСП-97.

Значительное время было уделено модели ИМГГ, представленной д-ром А.И.Иващенко в различных версиях, которые в процессе совместной работы последовательно испытывались, модифицировались и совершенствовались.

В процессе исследований выполнен значительный объем расчетов и графических построений, обосновывающих те или иные результаты. Для сопоставления многих из них составлена Сводная таблица 8.

В конечном итоге, для периода 1000 лет повторяемости сейсмических воздействий (вероятность превышения 5% в течение 50 лет) на пяти объектах проекта «Сахалин-1», к рассмотрению приняты результаты, приведенные в таблице 9. Они выражены в долях и в целочисленных единицах сейсмической интенсивности (баллы), официально принятых в России. Здесь же, для сравнения, приведены прежние оценки по карте ОСП-97-В, соответствующей этому же периоду повторяемости, оценки ABS, а также оценки, полученные по итоговой модели ИМГГ, как по программе Seisrisk-III, так и по методологии ОСП-97.

Таблица 9.

No	Объекты	ОСП-97	ABS		ИМГГ+ +Seisrisk-3		ИМГГ+ +ОСП-97	
1	Chayvo OPF	10	8.8	9	9.03	9	9.09	9
2	Chayvo Drill Pad	10	8.6	9	8.71	9	8.98	9
3	Odoptu South Drill Pad	10	8.4	8	8.75	9	9.01	9
4	Odoptu North Drill Pad	10	8.5	8	8.82	9	9.16	9
5	De-Kastri Export Terminal	8	6.1	6	7.22	7	7.59	8

Как видно, все вновь полученные оценки не достигают величины 10 баллов и не плохо согласуются между собой.

Таким образом, за окончательную оценку сейсмической опасности указанных пяти пунктов проекта «Сахалин-1» принимается оценка ИМГГ, выполненная по технологии ОСП-97 (правая крайняя колонка таблицы 9).

Проф. В.И.Уломов
ОИФЗ РАН, 4 ноября 2003 г.

**ПЕРЕЧЕНЬ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОТЧЕТОВ,
представленных АБВ и рассмотренных в процессе экспертизы**

№	Название Отчета	Исполни- тель	Год	Стадия	Местонахож- дение ориги- нала
1	Протокол Межведомственной комиссии по сейсморайонированию и сейсмостойкому строительству по СТУ на инженерные изыскания			Предв.	
2	Технический отчет. Сбор и обобщение исходных материалов по сейсмичности и связанным явлениям для разделов по охране окружающей среды Проекта «Сахалин-1», территория приоритетного развития Аркутун-Даги, Россия. Документ № I/sc-1662-09, ИМГиГ, 1997 г.	ИМГиГ	1997	Предв.	ENL Mosc. hard AEL, hard/electr
3	EQE International Inc., Стадия I, «Оценка сейсмической опасности выбранных морских и береговых нефте- и газоперебывающих сооружений на о. Сахалин, Россия, Стадия 1, Определение сейсмотектонических характеристик» Заключительный Отчет, составленный для компаний Sakhalin Energy Investment Company Ltd. и Exxon Neftegas Ltd., Август 1996 г.	EQE	1996	Предв.	Houston, hard, en
4	Изучение потенциала возникновения техногенных землетрясений на участках нефтегазоносных месторождений о. Сахалин, EQE, Май 1998 г.	EQE	1998	preliminary	Houston, hard, en
5	Научно-технический отчет. Палеосейсмотектоника береговых комплексов подготовки и буровых площадок Одопту и Чайво. Документ № YL 000057, ИМГиГ, 2001-2002.	ИМГиГ	2001-2002	ОИ-ТЭО	ENL Mosc. hard AEL, hard/electr
6	Научно-технический отчет. О возможной взаимосвязи промышленной разработки шельфовых нефтегазовых месторождений Одопту, Чайво и Аркутун-Даги с наведенной сейсмичностью. Документ № YL 000057, ИМГиГ, 2001.	ИМГиГ	2001	ОИ	ENL Mosc. hard, ru AEL, hard; engl. Only
7	Технический отчет. Оценка сейсмической опасности для объектов Проекта «Сахалин-1», ABS Consulting (EQE), 2002.	ABS Consulting	2002	ТЭО	AEL, hard
8	Технический отчет. Инженерно-геологические изыскания и сейсмическое микрорайонирование по трассе нефтепровода «Сахалин-1» на стадии обоснования инвестиций. Документ № 3375/РОС-1,	РСИ	2002	ОИ	AEL, hard/electr

	ФГУП «Росстройизыскания» (РСИ), Госстрой РФ, 2002.				
9	Геологическое строение и инженерно-сейсмические условия трассы магистрального трубопровода между БКП Одопту и морским терминалом Де-Кастри. Документ № CG-25147-01, ФГУП «Росстройизыскания» (РСИ), Госстрой РФ, 2003.	РСИ	2003	ТЭО	ENL AEL, hard/electr
10	Отчёт СМР. Сейсмическое микрорайонирование площадок БКП Одопту, буровые Одопту-1 и Одопту-2 (Стадия РД) Объект Сахалин–1. ФГУП «Росстройизыскания» (РСИ), Госстрой РФ, 2003.	РСИ	2003	ТЭО	ENL AEL, hard/electr
11	Отчёт СМР. Сейсмическое микрорайонирование площадок БКП Чайво, буровая Чайво (Стадия РД) Объект Сахалин–1. ФГУП «Росстройизыскания» (РСИ), Госстрой РФ, 2002.	РСИ	2003	ТЭО	ENL AEL, hard/electr
12	Отчёт СМР. Сейсмическое микрорайонирование площадки нефтеотгрузочного терминала в Де-Кастри. (Стадия РД), Объект Сахалин–1. ФГУП «Росстройизыскания» (РСИ), Госстрой РФ, 2002.	РСИ	2003	ТЭО	ENL AEL, hard/electr
13	Научно-технический отчет «Прогноз навешенной сейсмичности в процессе закачки попутных и технических вод на БКП «Чайво» (Моделирование процесса закачки)» (по заказу Эксон Нефтегаз Лимитед), ИМГиГ, 2003.	ИМГиГ	2003	ТЭО	

**ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОТЧЕТОВ
по оценке сейсмической опасности территории о. Сахалин, рассмотренных
в процессе экспертизы**

1. Отчет о научно-исследовательской работе «Систематизация исходных геолого-геофизических и сейсмологических данных по Охотоморскому региону и составление Временной схемы общего сейсмического районирования Сахалинской области, (Договор №16-08-217/95-С-3 от 02 октября 1995 г. с ГО «Росстройизыскания» Минстроя РФ, 1-й этап), Рук. В.И. Уломов (ОИФЗ РАН), Исполнители: А.И. Иващенко (ИМГиГ ДВО РАН), А.И.Захарова (ОИФЗ), Кожурин А.И. (ГИН), Кофф Г.Л. (ИЛС), Кузин И.П. (ИО), Лутиков А.И. (ПНИИИС), Медведева Н.С. (ОИФЗ), Несмеянов С.А. (ПНИИИС), Оскорбин Л.С. (ИМГиГ), Потапова О.В. (ОИФЗ), Ребецкий Ю.Л. (ОИФЗ), Рогожин Е.А. (ОИФЗ), Севостьянов В.В. (ПНИИИС), Стрельцов М.И. (ИМГиГ), Трифонов В.Г. (ГИН), Фурсова Е.В. (ОИФЗ), Чернышева Г.В. (ОИФЗ), Шебалин Н.В. (ОИФЗ), Шпак И.П. (ВНИИГеофизика), Шумилина Л.С. (ОИФЗ), Щукин Ю.К. (ВНИИГеофизика). Москва, 1995.
2. Отчет о научно-исследовательской работе: «Систематизация исходных геолого-геофизических и сейсмологических данных по Охотоморскому региону и составление Временной схемы общего сейсмического районирования Сахалинской области» (Договор №13-09-10/96-С-3 от 18.07.96 г. с ГО «Росстройизыскания» Гос-

- строю России, Заключительный этап), Исполнители: В.И. Уломов (ОИФЗ РАН), А.И. Иващенко (ИМГиГ ДВО РАН), И.П. Кузин (ИО РАН), Л.С. Шумилина (ОИФЗ РАН), Н.С. Медведева (ОИФЗ РАН), Ш.С. Андержанов (ОИФЗ РАН), Москва, 1998.
3. Нефтегорское землетрясение 27 (28) мая 1995 г. // Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений. Информационно-аналитический бюллетень. Экстренный выпуск, октябрь 1995 г., Москва: МЧС России, Российская академия наук. 236 стр.
 4. Оценка сейсмической опасности и Временная схема сейсмического районирования Сахалина. Авт. Уломов В.И. // Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений. Информационно-аналитический бюллетень. Экстренный выпуск, октябрь 1995 г., Москва: МЧС России, РАН, С. 18–26.
 5. Отчет «Предварительное обобщение и анализ имеющейся геолого-геофизической информации по территории проекта «Мыс Лазарева – мыс Погиби». Исполнитель – Институт тектоники и геофизики им. Ю.А.Косыгина ДВО РАН, г. Хабаровск, 2000 г., 57 стр.
 6. Отчет «Оценка геодинамического состояния территории строительства тоннельного или мостового перехода пролива Невельского железнодорожной линией Комсомольск-на-Амуре – Сахалин-Ноглики (Ныш)». Исп. И.М. Петухов, И.М. Батугина, Московский Гос. Горный Университет, Центр геодинамики недр (ЦГН). Москва, 2001.
 7. Отчет «Комплексные геофизические изыскания с целью выбора створа железнодорожного перехода через пролив Невельского» (Том I «Сеймотектонические условия, глубинное строение, уточнение исходной сейсмичности», Том II «Комплексные геофизические изыскания на Северном, Южном и Новом створах. Сейсмическое микрорайонирование территории (акватории) проекта», Том III «Результаты обработки материалов высокоразрешающей сейсморазведки в рамках научно-методического сопровождения работ»). Центр региональных геофизических и геоэкологических исследований – ГЕОН им. В.В.Федынского (ГП ЦРГГИ ГЕОН). Отв. исп. Ю.В.Коновалов. Москва, 2001.
 8. Отчет СЗФ ЦРГГИ ГЕОН о сейсмических работах на объекте «Железнодорожный переход через пролив Невельского». Том 13. Книги 1 и 2. Санкт-Петербург, 2001.
 9. Технический отчет. Инженерно-геологические изыскания и сейсмическое микрорайонирование по трассе нефтепровода «Сахалин-1» на стадии обоснования инвестиций. Документ № 3375/РОС-1, ФГУП «Росстройизыскания» (РСИ), Госстрой РФ, 2002.
 10. Отчет об инженерных изысканиях по объекту: «Сейсмическое микрорайонирование площадок БКП Чайво, буровая Чайво, БКП Одопту, буровая Одопту-1, буровая Одопту-2 (проект Сахалин-1)». «Сейсмическое микрорайонирование площадок БКП Чайво, буровая Чайво». 2 этап //Контракт № 13004-2721// Госстрой России, ФГУП «Росстройизыскания», Исп. Проф. С.П. Никифоров, Ю.И. Баулин, Москва, 2002 г.
 11. Научно-технический отчет «Палеосеймотектоника районов расположения береговых перерабатывающих комплексов и буровых площадок Одопту и Чайво (Северо-восточный Сахалин). Окончательный отчет. // Контракт УЛ-000057-2001 от 15 июля 2001 г. (Дополнительное соглашение) // Исп. А.И.Иващенко, М.И.Стрельцов, Ким Чун Ун (ИМГиГ ДВО РАН, А.И.Кожурин (ГИН РАН). Южно-Сахалинск, 2003.
 12. Инженерно-геологические изыскания на строительной площадке терминала Де-Кастри. Россия. Первая редакция. // АМЕК Оверсиз (Кипр) Лимитед совместно с АМЕК Ёрс энд Энвайронментал Лимитед, Калгари, Альберта, Канада). Май, 2002.

13. Инженерно-геологические изыскания на площадке берегового комплекса подготовки нефти Одопту и буровой площадки Одопту, остров Сахалин, Россия. Вторая редакция. // АМЕК Оверсиз (Кипр) Лимитед совместно с АМЕК Ёрс энд Энвайронментал Лимитед, Калгари, Альберта, Канада). Июнь, 2002.
 14. Инженерно-геологические изыскания на буровой площадке Одопту-2, остров Сахалин, Россия. Вторая редакция. // АМЕК Оверсиз (Кипр) Лимитед совместно с АМЕК Ёрс энд Энвайронментал Лимитед, Калгари, Альберта, Канада). Июль, 2002.
 15. Инженерно-геологический отчет «Внутрипромысловые, коллекторные и магистральные/экспортные трубопроводы. Проект «Сахалин-1». Остров Сахалин, Россия. Вторая редакция. // АМЕК Оверсиз (Кипр) Лимитед совместно с АМЕК Ёрс энд Энвайронментал Лимитед, Калгари, Альберта, Канада). Май, 2002.
-