

УДК 550.42+550.43(268.55)

НЕКОТОРЫЕ ГАЗОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОСАДКОВ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ

Р.Б. Шакиров, А.В. Сорочинская, А.И. Обжиров
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
ул. Балтийская 43, г. Владивосток, 690041,
e-mail: ren@poi.dvo.ru, sorochin2001@mail.ru, obzhirov@poi.dvo.ru

В статье представлены результаты комплексных газогеохимических исследований донных осадков Восточно-Сибирского моря по меридиональному профилю от мыса Биллингса к хребту Менделеева. Впервые детально показаны особенности распределения углеводородных газов в осадках, а также охарактеризован гранулометрический и химический состав осадков. Выделена зона разгрузки природного газа, которая контролируется неотектоническим разломом. Уровни обнаруженных аномальных концентраций метана (до 2,4 % об.) характерны для районов образования газогидратов, а изотопный состав углерода метана указывает на преобладание термогенной компоненты. Полученные геохимические характеристики газа и элементного состава донных осадков можно использовать как критерии прогноза залежей углеводородов.

Ключевые слова: газогеохимия, Восточно-Сибирское море, метан, углеводородные газы, гранулометрия, элементный состав, органический углерод, тектоника.

Введение

В связи с увеличением спроса в мире на энергоресурсы, моря российского сектора Арктики становятся предметом все более пристального внимания ученых. Здесь открыты крупные месторождения нефти и газа в Баренцевом и Карском морях, а также около 40 месторождений нефти и газа на Северной Аляске, в непосредственной близости от российской экономической зоны. Восточно-Сибирское море наименее изучено из-за суровых климатических условий и продолжительности ледового периода. Среди арктических морей это самое мелководное: 72 % акватории имеет глубину менее 50 м, глубины менее 30 м занимают половину площади моря. Другая особенность Восточно-Сибирского моря заключается в том, что на его обширном приконтинентальном шельфе сохраняется устойчивая седиментогенная обстановка, поэтому тонкозернистая структура донных осадков сохраняется вне зависимости удаленности от побережья [3, 11]. Основная цель данной работы – выявление особенностей распределения природных газов в осадках и характеристика химического состава осадков по региональному профилю, протянувшемуся с юга на север от мыса Биллингса к подводному хребту Менделеева. Подобные исследования в данном районе проводились впервые. В работе использованы материалы, полученные геолого-геофизической экспедицией в июле – сентябре 2008 г. в 45-м рейсе НИС «Академик Лаврентьев» в Восточно-Сибирском море.

Материалы и методы

Газогеохимический профиль в Восточно-Сибирском море протяженностью в 550 пог. км включил 56 донных станций с шагом 10 км на глубинах от 19 до 200 м (рис. 1).

Отбор проб донных осадков проводился ударной прямоточной трубкой (длина 3 м, внутренний диаметр 60 мм) с последующим литологическим описанием и изучением особенностей распределения концентраций

углеводородных газов. Концентрации метана и тяжелых углеводородных газов (ТУВГ) в осадках (до пентана включительно) определялись методом равновесных концентраций (headspace) [16] на газовом хроматографе «Кристалл-Люкс 4000М». Ошибка определения составляла не более 5 %.

Для характеристики осадков, в которых анализировалось содержание углеводородных газов, определены гранулометрический и элементный состав и содержание органического углерода. Гранулометрический анализ осадков выполнен лазерно-дисперсионным методом на установке «Microtrac-100». При определении содержания в донных осадках основных элементов использовался метод атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES), а при определении содержания примесных элементов – метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS). Содержание органического углерода определялось методом сжигания его на анализаторе фирмы «SHIMADZU».

Результаты и обсуждение

В тектоническом строении Восточно-Сибирского моря выделяется ряд главных неотектонических структур, границами которых, как правило, являются новейшие разломы различной специализации, в основном сбросы и сдвиговые дислокации. Газогеохимический профиль пересекает с юга на север следующие структуры: впадину пролива Лонга (станции 50–80), поднятие Врангеля (станции 100–120), Врангелевский грабен (станции 130–220), Северо-Шелагское поднятие, ограниченное сбросами окружающих структур (станции 230–460), Северо-Чукотский прогиб и бровка шельфа, которая контролируется с восточной стороны субширотным Менделеевско-Беринговским разломом (станции 470–560) [10].

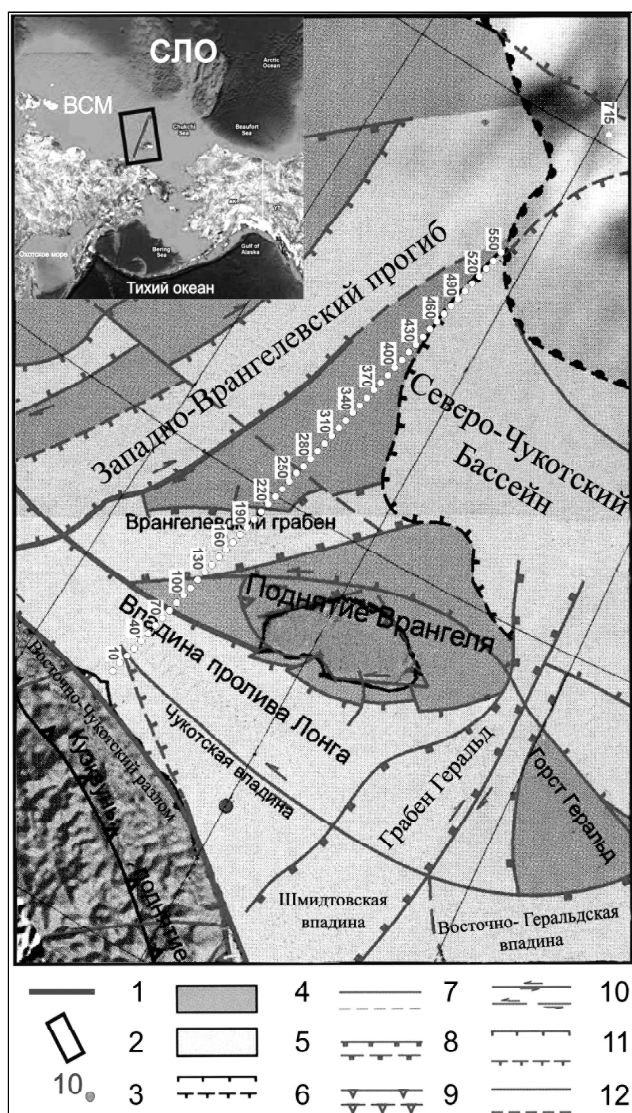


Рис. 1. Район исследований. Положение пикетов опробования донных осадков Восточно-Сибирского моря на карте неотектонических структур, выраженных в рельефе арктического шельфа [10]:

1 – профиль работ 2008 г.; 2 – полигон работ; 3 – пикеты опробования; 4 – поднятия и горсты; впадины; 5 – грабены, ramпы; 6 – границы достоверные/предполагаемые (штрихи направлены в сторону впадин). Новейшие разломы: (главные разломы показаны утолщенными линиями): 7 – достоверные/предполагаемые; 8 – сбросы; 9 – взбросы; 10 – сдвиги; 11 – неустановленного типа; 12 – без установленного смещения; СЛО – Северный Ледовитый океан

Газогеохимическая съемка. Определение содержания углеводородных газов в осадках позволило охарактеризовать особенности их распределения. Во всех газовых пробах из донных отложений установлен метан в концентрациях от 2,0 ppm до 2,4 %. Метанонасыщенность осадков возрастает вниз по разрезу керна, и высокое содержание метана отмечается на всем протяжении профиля. В центральной части профиля выделен участок разгрузки (2,4 объем. % метана) в концентрациях, достаточных для формирования газогидратов (рис. 2). ТУВГ в донных отложениях представлены этаном, этиленом, ацетиленом, пропиленом, пропаном, бутаном и пентаном.

Этилен (от 0,06 до 80 ppm) в составе природного газа донных отложений установлен практически во всех отобранных газовых пробах. Ацетилен обнаружен в 19 пробах в разных частях профиля (максимум 0,4 ppm, станция 220). Этан (максимальное значение 0,43 ppm) обнаружен в 98 % проб вместе с этиленом. Пропилен (макс. – 0,61 ppm) фиксируется практически на всех станциях. Пропан (максимальное содержание 0,33 ppm) установлен в 70 % проб. Бутан (максимальное содержание – 0,7 ppm) и пентан (макс. – 17 ppm) обнаружены в северной части профиля.

Методом высокоразрешающей масс – спектрометрии были проанализированы 14 проб газа (метан, углекислый газ), отобранные из осадков по всей длине профиля на станциях с разным геохимическими характеристиками. Изотопный состав углерода метана варьирует от -27,7 до -72,2 ‰ PDB; изотопный состав углерода углекислого газа – от -17,7 до -23,7 ‰ PDB. Средняя величина изотопного состава метана в районе исследований составила -56,6 ‰ PDB и указывает на смешанный генезис газа (термогенный и биогенный) с преобладанием термогенной доли. Наиболее «тяжелый» по углероду метана газ обнаружен в южной части профиля: -27,9 ‰ PDB. Наиболее «легкий» -72,2 ‰ PDB зафиксирован в центральной части профиля, рядом с зоной, где определено максимальное содержание метана (2,4 % метана, станция 270). Данный участок контролируется неотектоническим разломом, и наличие «легкого» метана, снижающего в верхней части осадочного разреза долю тяжелого изотопа углерода метана, может указывать на приток углеводородных флюидов из глубинных горизонтов осадочной толщи.

Для характеристики осадков, в которых изучались газы, в стационарных условиях были сделаны определения гранулометрического и химического составов.

Гранулометрический анализ. При интерпретации результатов гранулометрического анализа использовалась трехкомпонентная классификация по соотношению содержания фракций псаммита (1–0,1 мм), алеврита (0,1–0,01 мм) и пелита (<0,01 мм) [9]. Основной тип осадка по профилю – алеврит пелитовый. На станциях, расположенных на северном борту **Врангелевского грабена** (станции 190, 200, 210), осадок представлен алевритом псаммитовым и пелитом алевритовым на станциях, более удаленных от берега (рис. 3). Значительное содержание пелитовой фракции (21–72 %) присутствует во всех пробах по профилю. Это объясняется подледно-морскими условиями седиментации, характерными для Восточно-Сибирского моря, которое почти круглый год покрыто сплошным ледовым покровом, и вследствие чего при осадконакоплении основным процессом является гравитационное осаждение глинистых частиц [7, 11]. Содержание алевритовой составляющей в осадках по профилю колеблется от 26 до 58 %, содержание псаммитовой – от 0 до 36 %.

Химический состав осадков. Содержание $C_{орг}$ определялось в поверхностном слое донных осадков, в средней (интервал 30–50 см) и в нижних частях колонок (интервал ниже 70 см). Концентрации $C_{орг}$ в пробах поверхностного слоя находятся в пределах 0,29–2,27 % от сухого

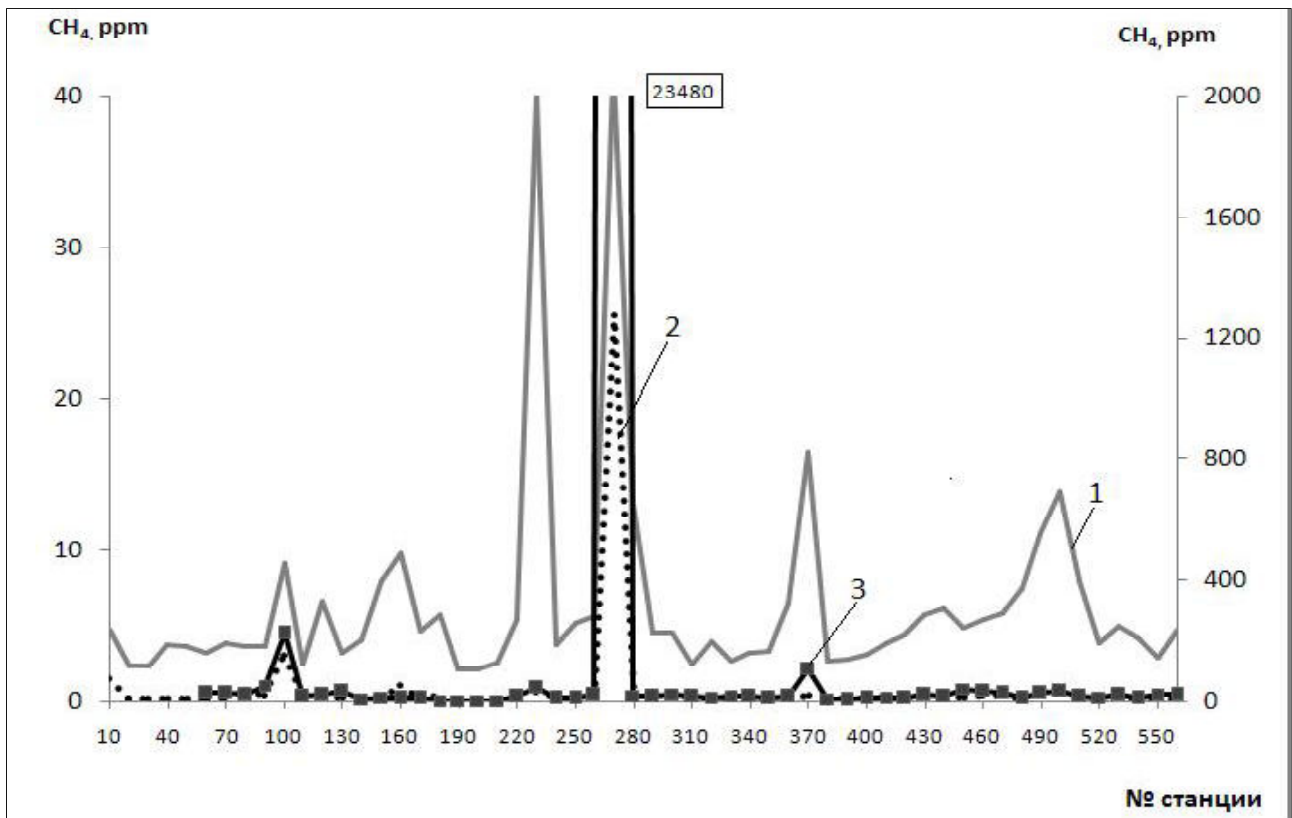


Рис. 2. Распределение метана в осадках по профилю на интервалах 0–5 см (1), 30–50 см (2), 80–120 см (3)

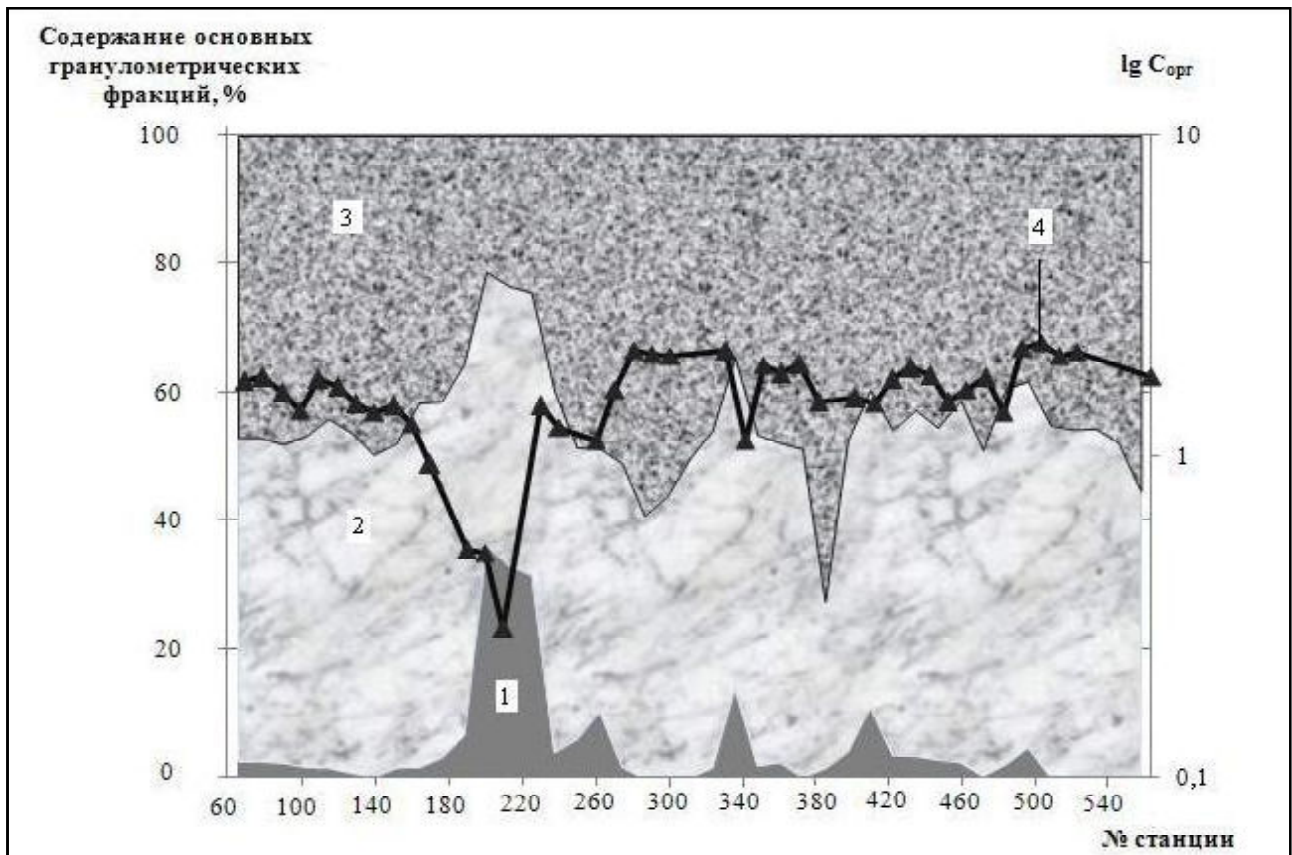


Рис. 3. Схема гранулометрического состава поверхностного слоя осадков по профилю и вариации $C_{орг}$ (логарифмическая шкала):

1 – псаммит; 2 – алеврит; 3 – пелит; 4 – $C_{орг}$

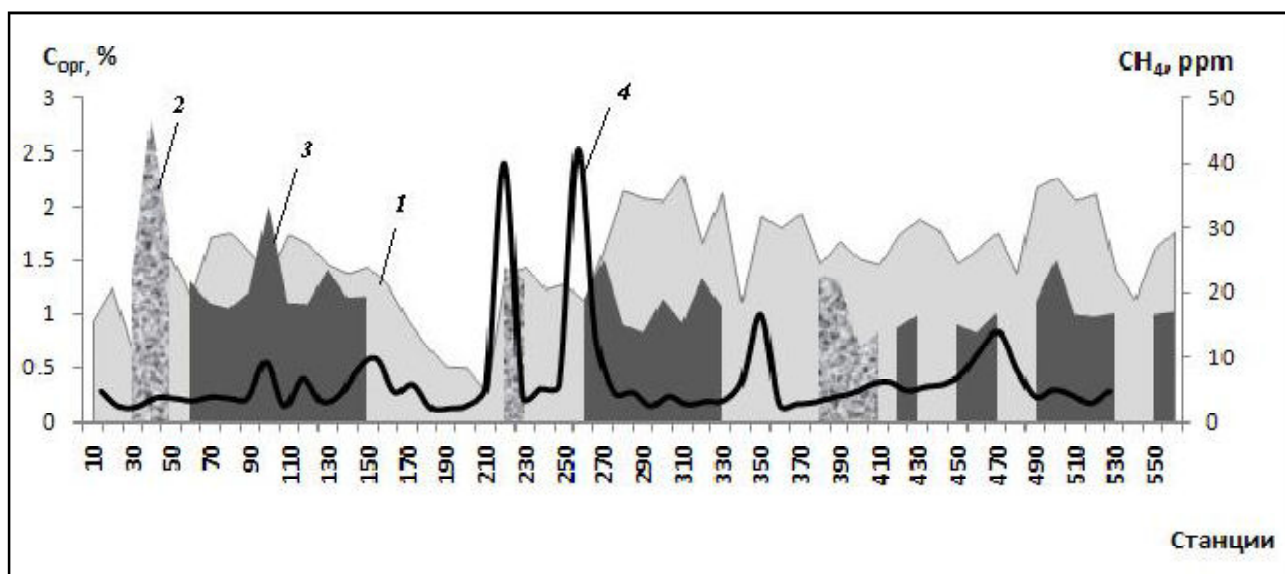


Рис. 4. Содержание $C_{орг}$ и CH_4 в осадках:

1 – $C_{орг}$ в поверхностном слое; 2 – $C_{орг}$ в интервале 30–50 см; 3 – $C_{орг}$ в интервале ниже 70 см; 4 – CH_4 в поверхностном слое

вещества осадка (среднее – 1,6 %) и коррелируют с количеством пелита в осадке (рис. 3). Для горизонта 30–70 см содержание $C_{орг}$ от 0,07 до 2,82 %, среднее значение $C_{орг}$ – 1,26 %. Для нижних горизонтов (70–230 см) $C_{орг}$ изменяется от 0,82 до 2,01 %, среднее значение – 0,89 % (рис. 4).

Осадки на меридиональном профиле представлены бескарбонатными разностями (значения $C_{карб}$ варьируют от 0 до 0,06 %). Малый вклад неорганического углерода в осадках – характерная черта донных отложений арктических морей, что связано с особенностями полярного биоценоза и его биотипа [15]. Отмечаются высокие положительные корреляционные связи многих элементов с $C_{орг}$: Fe (0,87), Mg (0,88), Na (0,64), V (0,75), Cr (0,86), Pb (0,68) (рис. 5). Для элементов группы железа характерно образование стойких металлоорганических комплексов [1, 8]. Na, Mg и Ba экстрагируются фитопланктоном в процессе жизнедеятельности и высвобождаются при его отмирании [4, 6, 13]. РЗЭ способны аккумулироваться органическим веществом [5]. Отмечается слабая корреляция между $C_{орг}$ и содержанием метана, что указывает

на незначительный расход органического вещества на формирование газовой фазы и позволяет предположить смешанный генезис метана в осадках.

Макрохимический состав поверхностного слоя осадков по профилю представлен в табл. 1. Основным компонентом осадков является кремнезем (51,18–79,67 % SiO_2). Далее в порядке убывания Al_2O_3 (8,60–16,00 %), Fe_2O_3 (2,32–7,37 %), Na_2O (2,56–6,91 %), MgO (0,9–3,12 %), K_2O (1,68–3,20 %), CaO (1,11–1,59 %), TiO_2 (0,38–0,63 %), P_2O_5 (0,13–0,73 %), MnO (0,02–0,1 %). По отношению к среднему содержанию в осадочных породах континентов [12] исследуемые осадки обогащены Na в 4–8 раз, Fe в 1,5 раза, P – в 1,5–4 раза. Содержание в осадках Mg (до 1,88 %) и K (до 2,66 %) сопоставимо со средним содержанием этих элементов в осадочных породах континентов и отмечается их увеличение с увеличением пелитовой составляющей. Обеднены осадки Ti, Ca и Mn, но в северной части профиля на отдельных станциях содержание Mn в 3–10 раз превышает кларковые.

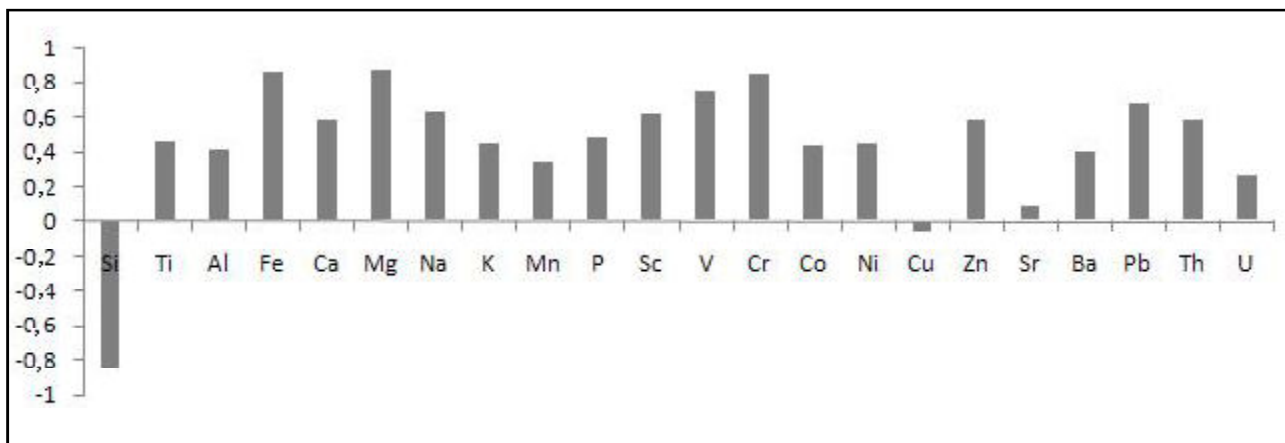


Рис. 5. Диаграмма корреляционных связей $C_{орг}$ с химическими элементами

Номера станций отбора, глубина и макрокомпонентный состав поверхностного слоя осадков (масс. %)

Станции	Глубина моря, м	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅
70	43	64,85	0,57	12,38	4,97	1,46	2,12	2,12	3,73	0,037	0,19
90	39	63,77	0,58	12,67	5,31	1,51	2,17	2,21	3,48	0,038	0,23
100	39	64,92	0,58	12,89	5,41	1,33	2,12	2,24	3,46	0,038	0,17
110	38	63,50	0,57	12,60	5,31	1,46	2,18	2,15	3,45	0,370	0,20
120	37	62,82	0,58	12,47	5,58	1,49	2,15	2,19	3,28	0,037	0,42
130	37	64,08	0,58	12,47	5,20	1,40	2,15	2,19	3,62	0,035	0,25
160	31	67,80	0,53	11,72	4,54	1,19	1,71	2,06	3,22	0,032	0,26
200	25	79,67	0,38	8,60	2,32	1,14	0,90	1,68	2,56	0,021	0,13
230	33	66,18	0,54	11,96	4,95	1,25	1,83	2,13	3,51	0,033	0,33
240	34	66,95	0,53	11,73	4,43	1,16	1,85	2,13	3,68	0,030	0,19
260	35	68,30	0,48	11,34	4,44	1,11	1,71	2,16	3,39	0,029	0,18
270	41	56,92	0,56	12,78	6,56	1,13	2,50	2,36	4,69	0,036	0,33
280	45	56,65	0,52	12,28	6,25	1,31	2,57	2,30	4,66	0,035	0,35
290	45	59,34	0,56	12,83	6,44	1,27	2,58	2,31	4,43	0,037	0,35
300	46	58,99	0,55	11,95	5,97	1,39	2,43	2,18	4,45	0,036	0,35
330	61	56,77	0,54	11,89	7,37	1,51	2,60	2,21	4,66	0,050	0,73
350	54	59,69	0,54	12,08	6,30	1,59	2,48	2,18	4,49	0,038	0,42
370	55	60,32	0,53	12,23	6,57	1,46	2,31	2,62	3,82	0,043	0,31
380	55	60,27	0,63	16,00	6,45	1,20	2,14	3,20	2,86	0,076	0,21
410	56	64,55	0,54	12,19	5,01	1,44	2,08	2,64	3,41	0,035	0,18
440	63	63,82	0,54	12,29	5,37	1,51	2,20	2,65	3,41	0,037	0,20
470	70	64,04	0,56	12,21	5,42	1,48	2,21	2,63	3,34	0,040	0,19
500	99	53,71	0,55	12,43	6,66	1,39	3,08	2,95	5,46	0,345	0,24
520	127	53,93	0,53	12,45	6,51	1,47	2,97	2,92	5,09	0,933	0,22
560	200	51,18	0,53	13,25	6,77	1,42	3,12	3,13	6,91	0,417	0,18

Подгруппа щелочноземельных элементов характеризуется пониженным содержанием Ca (1,11–1,59 %) и Sr (до 151–198 г/т), что характерно для осадков высоких широт, представленных в основном диатомовыми илами [4], а содержание Ba (максимум 706 г/т) сопоставимо со средним содержанием в осадочных породах континентов.

Среди элементов группы железа и тяжелых металлов преобладает в осадках Fe (1,62–5,15 %). Заметно ниже содержание Cr (31,23–82,74 г/т), Co (4,81–34,02 г/т), Ni (11,59–67,11 г/т), Sc (5,50–15,21 г/т), Zn (37,7–185,9 г/т), Cu (7,23–467,8 г/т) (табл. 2). По сравнению со средним содержанием в осадочных породах континентов современные осадки по профилю обогащены в 1,5–2 раза Fe, V, Sc, Zn и обеднены Cr, Co, а содержание Pb в осадках сопоставимо со средним содержанием этого элемента в осадочных породах континентов.

Содержание Mn и Cu в осадках южной и центральной частях профиля значительно ниже, чем среднее содержание этих элементов в осадочных породах континентов. Аномальное содержание Mn (10,77 %) и Cu (467,8 г/т) отмечается в северной части на станциях, вблизи которых зафиксированы газовые аномалии (рис. 6). Осадки на этих станциях характеризуются максимальными значениями пелитовой составляющей и $S_{орг}$. Такие факторы способствуют диагенетическому перераспределению

элементов: образованию растворимых форм Mn^{+2} в зонах газовых аномалий и нерастворимых оксигидроксидов (Mn^{+4}) за пределами таких зон [14]. Увеличение доли пелитовой компоненты способствует сорбции этих элементов глинистыми минералами.

Во всех пробах зафиксированы радиоактивные U и Th, их содержание ниже среднего в осадочных породах континентов. Концентрации U и Th коррелируют с количеством $S_{орг}$ и пелита в осадке.

Редкоземельные элементы (РЗЭ) были определены во всех пробах осадков методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) и нормализованы на состав РЗЭ в североамериканском сланце [5]. Содержание РЗЭ в современных осадках меньше, чем в сланце. С увеличением доли пелитовых фракций в осадке их содержание увеличивается, так как растет сорбционная поверхность частиц. Среднее содержание легких РЗЭ в осадках по профилю – 78 %, тяжелых – 22 %. Накопление в донных отложениях легких лантаноидов связано с существенно более высокими скоростями миграции для растворимых комплексных соединений тяжелых РЗЭ по сравнению с таковыми для соединений легких РЗЭ [2].

Заключение

Впервые в результате газогеохимических исследований в Восточно-Сибирском море по региональному про-

Содержание примесных элементов (г/т) в поверхностном слое осадков по профилю

Стан-ция	V	Se	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Ba	Pb	Th	U	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Er	Tm	Yb	Lu
70	125,9	6,24	67,56	8,42	25,94	13,50	90,60	166,2	663,3	12,72	7,81	2,03	13,45	22,76	47,37	5,45	17,65	4,45	0,89	4,00	0,55	3,35	1,72	0,25	1,59	0,23
90	146,6	12,60	73,10	9,95	28,05	16,71	88,44	185,5	694,1	18,73	8,75	2,78	17,17	24,97	53,66	6,31	24,65	4,99	0,98	4,52	0,62	3,40	1,98	0,29	1,75	0,25
100	136,3	11,96	68,09	9,18	28,50	16,54	100,7	165,1	663,8	15,25	8,18	2,44	16,69	22,80	48,59	5,80	22,78	4,74	0,95	4,15	0,60	3,41	1,89	0,26	1,78	0,24
110	142,7	11,68	67,66	8,71	27,82	15,94	99,20	168,1	664,7	14,51	8,06	2,64	15,57	23,04	48,16	5,74	22,05	4,61	0,89	4,08	0,55	3,22	1,83	0,26	1,64	0,24
120	145,0	12,09	71,62	8,95	27,96	16,89	102,5	194,3	690,7	14,74	8,42	3,33	16,21	24,84	52,59	6,11	24,12	5,03	0,94	4,21	0,60	3,29	1,97	0,26	1,76	0,25
130	140,5	11,73	68,71	8,82	27,87	15,43	97,30	176,5	691,2	14,54	8,34	2,06	15,99	23,27	48,78	5,79	22,65	4,70	0,94	4,09	0,58	3,31	1,77	0,25	1,70	0,24
160	121,2	10,15	59,23	8,09	30,96	13,34	79,9	169,0	688,0	12,86	8,06	1,81	15,33	24,05	50,32	5,99	23,69	4,75	0,94	4,09	0,58	3,15	1,80	0,26	1,61	0,23
200	99,8	3,50	31,23	4,81	11,59	7,23	37,70	167,8	574,3	9,64	5,37	1,18	11,84	19,60	41,44	4,83	18,51	3,68	0,71	3,17	0,43	2,50	1,34	0,19	1,22	0,18
230	130,1	10,63	58,80	8,17	27,45	14,64	96,00	177,7	668,9	13,37	7,64	1,68	16,20	23,10	48,37	5,81	22,58	4,67	0,91	4,07	0,58	3,16	1,82	0,26	1,73	0,25
240	136,1	10,62	61,85	7,74	26,52	14,79	84,80	161,5	654,2	13,79	7,58	2,39	15,32	22,56	47,53	5,70	22,50	4,66	0,92	3,94	0,56	3,08	1,68	0,26	1,58	0,23
260	122,6	9,55	54,64	7,37	22,29	13,19	84,30	150,9	621,9	13,25	6,94	1,78	14,29	20,59	42,97	5,16	20,57	4,32	0,85	3,65	0,52	2,89	1,55	0,23	1,56	0,20
270	188,9	13,48	81,59	9,37	30,91	18,87	108,9	159,5	691,9	17,48	8,77	1,81	16,59	22,10	46,77	5,54	22,36	4,72	0,93	4,23	0,59	3,40	1,93	0,27	1,74	0,24
280	179,8	12,66	77,78	9,14	29,08	20,07	106,3	156,0	670,8	16,47	7,99	2,00	15,60	20,57	42,82	5,11	20,07	4,34	0,86	3,74	0,54	3,13	1,75	0,24	1,67	0,24
290	183,9	13,20	82,74	9,58	29,98	18,48	111,9	160,6	106,2	16,23	8,38	1,95	16,27	21,65	46,01	5,49	21,44	4,49	0,94	4,10	0,60	3,32	1,91	0,27	1,61	0,25
300	173,5	12,54	76,16	9,26	28,93	18,42	107,8	171,4	683,4	16,70	8,22	1,94	16,13	22,67	46,95	5,61	21,93	4,63	0,92	3,97	0,57	3,28	1,95	0,26	1,75	0,26
330	189,0	12,42	75,29	10,70	29,23	18,52	113,6	197,7	674,7	17,57	7,78	2,02	16,05	20,84	44,01	5,24	20,44	4,44	0,85	3,96	0,56	3,17	1,83	0,26	1,69	0,24
350	175,3	11,94	73,08	9,91	29,39	17,89	106,3	187,8	671,4	16,80	7,73	2,09	15,64	21,59	45,63	5,41	21,42	4,64	0,91	4,09	0,55	3,19	1,84	0,25	1,65	0,24
370	177,2	12,92	76,38	10,60	39,88	20,51	127,4	171,0	691,0	19,12	8,09	2,21	16,21	22,49	47,67	5,77	22,26	4,60	1,08	4,42	0,65	3,47	1,90	0,31	1,86	0,30
380	157,8	14,97	73,26	13,26	45,96	46,78	173,4	171,0	651,4	19,91	8,86	2,83	18,36	26,11	55,61	6,73	26,10	5,40	1,21	4,93	0,73	3,81	2,11	0,31	2,03	0,28
410	159,8	11,18	66,30	9,81	38,48	18,71	103,0	177,9	660,0	15,42	7,47	2,53	15,24	23,36	48,88	5,86	22,76	4,38	1,03	4,22	0,59	3,18	1,66	0,24	1,62	0,23
440	173,3	12,30	72,94	10,62	35,41	17,50	112,7	174,8	671,4	16,57	7,99	2,56	15,44	23,88	50,52	6,06	24,01	4,68	1,07	4,46	0,62	3,40	1,82	0,27	1,81	0,25
470	165,2	12,18	70,96	11,81	46,60	16,77	112,5	171,5	661,8	15,34	8,06	2,51	16,16	24,21	51,03	6,09	24,23	4,83	1,09	4,46	0,61	3,52	1,86	0,27	1,81	0,26
500	215,8	14,04	79,19	25,55	45,02	21,68	146,8	161,7	631,9	18,81	8,37	2,32	15,91	22,93	49,29	5,81	23,19	4,75	1,09	4,39	0,63	3,27	1,90	0,32	1,79	0,26
520	214,2	13,48	74,82	29,36	49,17	22,57	160,0	158,8	608,7	18,45	8,19	2,11	15,28	22,32	49,04	5,74	22,69	4,48	1,03	4,32	0,61	3,38	1,82	0,26	1,68	0,24
560	276,8	15,51	82,17	34,02	67,11	32,45	185,9	177,0	661,6	19,78	8,96	3,43	16,46	23,46	49,59	5,98	24,31	4,90	1,13	4,64	0,64	3,71	1,97	0,32	2,02	0,27

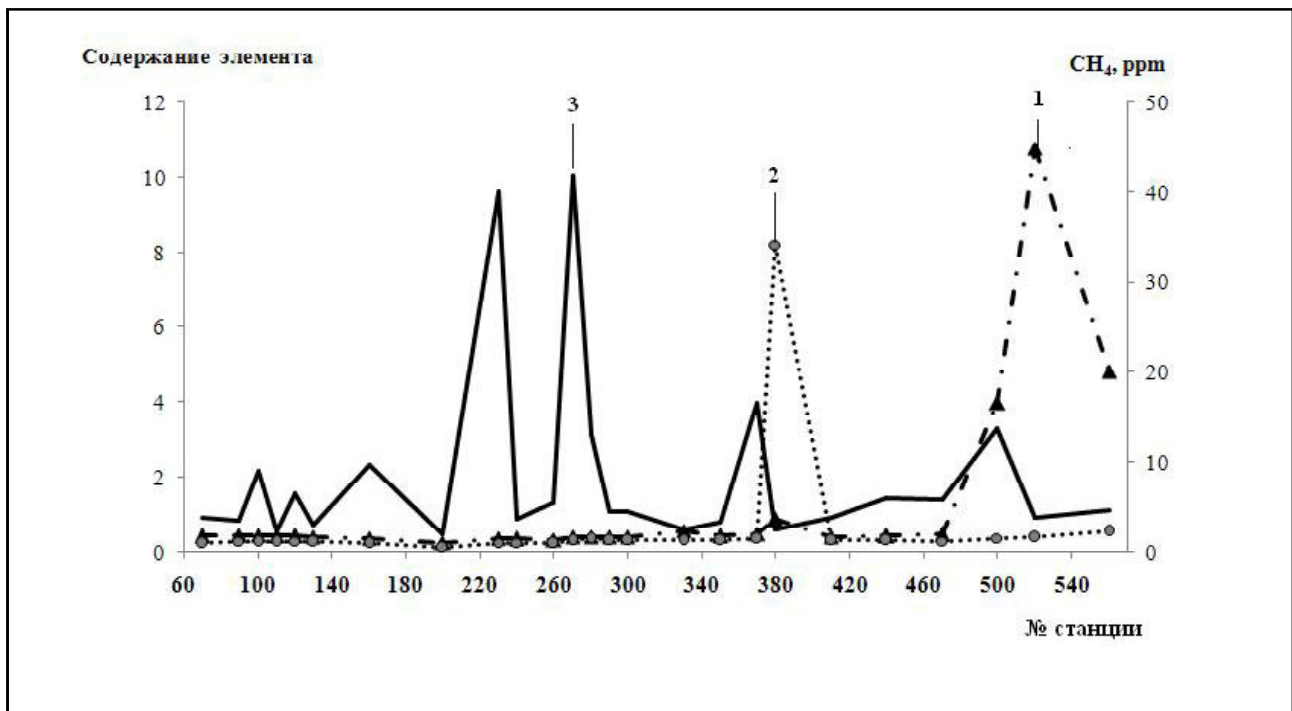


Рис. 6. Распределение в поверхностном слое осадков:

1 – Mn; 2 – Cu; 3 – CH₄

филю от мыса Биллинга к хребту Менделеева охарактеризовано распределение углеводородных газов в донных отложениях. Выделенная в центральной части профиля зона разгрузки природного газа (содержание метана 2,4 % объем.) контролируется неотектоническим разломом. Слабая корреляция между $C_{орг}$ и содержанием метана и наличие «легкого» метана указывает на смешанный генезис метана в осадках и приток углеводородных флюидов из глубинных горизонтов осадочной толщи. Непрерывный характер спектра распределения углеводородных газов (до пентана) в осадках на всем протяжении профиля позволяет считать перспективным в отношении углеводородного потенциала континентальный шельф Восточно-Сибирского моря.

Поверхностный слой осадков по профилю обеднен большинством изученных химических элементов. Распределение их содержания в донных осадках по профилю контролируется следующими факторами: гранулометрическим составом – вариациями псаммитовой и пелитовой фракций; образованием органоминеральных комплексов, которые играют важную роль в концентрировании многих элементов; наличием аномалий метана, создающих специфические физико-химические условия и способствующих концентрированию ряда элементов (Mn, Cu).

Финансирование экспедиции осуществлено «Северморгео». Работа поддержана грантами ДВО РАН 09-1-П17-10, 10-III-B-07-191, 09-III-B-07-372, 09-III-A-07-324; фондом «Глобальная Энергия» МГ2010/04/6 и ФЦП № 02.740.11.0022.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Варшал Г.М., Велюханова Т.К., Кощеева И.Я. Геохи-

мическая роль гумусовых кислот в миграции элементов // Гуминовые вещества в биосфере. М.: Наука, 1993. С. 97–117.

2. Варшал Г.М., Кощеева И.Я., Сироткина И.О. и др. Изучение органических веществ поверхностных вод и их взаимодействие с ионами металлов // Геохимия. 1979. № 4. С. 598–607.

3. Ветров А.А., Семилетов И.П., Дударев О.В. и др. Исследование состава и генезиса органического вещества донных осадков Восточно-Сибирского моря // Геохимия. 2008. № 2. С. 183–195.

4. Виноградов А.П. Введение в геохимию океана. М.: Наука, 1967. 212 с.

5. Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. М.: Наука, 2006. 360 с.

6. Дударев О.В., Боцул А.И., Аникиев В.В., Колесов Г.М. Современное осадкообразование в криолитозоне северо-западной части Анадырского залива (Берингово море) // Тихоокеан. геология. 2001. Т. 20, № 3. С. 12–25.

7. Дударев О.В., Семилетов И.П., Чаркин А.Н., Боцул А.И. Седиментационные обстановки на приконтинентальном шельфе Восточно-Сибирского моря // Докл. АН. 2006. Т. 409, № 6. С. 822–827.

8. Лисицин А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34, № 5. С. 735–747.

9. Лихт Ф.Р., Астахов А.С., Боцул А.И. и др. Структура осадков и фации Японского моря. Владивосток, 1983. 283 с.

10. Неотектонические структуры и активные разломы шельфа // Геология и полезные ископаемые шельфов России. Атлас. М.: Науч. мир, 2004. 108 с.

11. Павлидис Ю.А., Щербаков Ф.А. Современные донные осадки арктических морей Евразии // Океанология. 2000. Т. 40, № 1. С. 137–147.
12. Перельман А.И. Геохимия. М.: Высшая школа, 1979. 423 с.
13. Перельман А.И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М.: Недра, 1972. 288 с.
14. Розанов А.Г., Волков И.И. Донные осадки Кандалакшского залива Белого моря: марганцевый феномен // Геохимия. 2009. № 10. С. 1067–1085.
15. Романкевич Е.А., Ветров А.А. Цикл углерода в арктических морях России. М.: Наука, 2001. 300 с.
16. Хахенберг Х., Шмидт А. Газохроматографический анализ равновесной паровой фазы. М.: Мир, 1979. 160 с.

In the article it is given a comprehensive gas-geochemical analysis of sediments from the East-Siberian Sea, along the NS profile (Billings Cape-Mendeleev Ridge). It is for the first time that the features of hydrocarbon gases distribution in sediments are described in relation with a grain size and chemical compositions. Gas seepage in neo-tectonic faulting has been found. The methane content in sediments (up to 2.4 %vol. in headspace) indicates favorable sites for gashydrates in a central part of the sea. Isotopic composition of C^{13} - CH_4 indicates the thermogenic origin. The obtained data could be applied for the hydrocarbon deposits forecasting in the investigated area.

Key words: *gasgeochemistry, East-Siberian Sea, methane, hydrocarbon gases, granulometry, element composition, organic carbon, tectonics.*

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ МАГНИТУД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ГУМБЕЛЯ

Р.З. Тараканов, А.О. Бобков

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН,
ул. Науки 1Б, г. Южно-Сахалинск, 693022,
e-mail: seismol@imgg.ru

Для исследования применимости метода использованы уникальные эмпирические материалы о землетрясениях для региона Японии за полный сейсмический цикл (116 лет) и несколько сейсмических циклов (~1400 лет). Показано, что метод третьего предельного распределения Гумбеля может эффективно применяться для оценки M_{\max} при соблюдении следующих условий: 1. Каталог землетрясений должен быть унифицирован по магнитуде и содержать практически без пропусков все события с заданного минимального уровня магнитуды за весь период наблюдений; 2. Используемый временной интервал должен быть соизмерим с продолжительностью сейсмического цикла. Более стабильные оценки получаются не для предельных магнитуд, а для магнитуд при заданных значениях функции распределения вероятности. Метод Гумбеля, с учетом отмеченных условий, применен нами для оценки M_{\max} в трех зонах Курило-Охотского региона. Получено хорошее соответствие наблюдаемых и расчетных максимальных магнитуд наблюдаемых в регионах за 100 лет, и величин M_{\max} при значении функции распределения вероятности – $P_i = 0,995$.

Ключевые слова: землетрясение, каталог, магнитуда, предельное распределение Гумбеля.

Введение

M_{\max} – один из важнейших и трудноопределяемых параметров при оценке степени сейсмической опасности территории. Обычно применяют несколько способов для оценки M_{\max} : по корреляции предельной магнитуды с сейсмической активностью A_{10} (или A_{15}), по графику повторяемости землетрясений, по графикам Беньоффа, по протяженности и мощности блоков земной коры и литосферы и др. [5, 6]. Каждый из этих способов имеет свои достоинства и недостатки. Обычно в качестве окончательных применяют комплексные оценки M_{\max} .

Для описания вида графика повторяемости землетрясений предельных магнитуд нередко используется теория экстремальных значений случайных величин [2]. Распределение предельных магнитуд (согласно этой теории) может соответствовать третьему предельному распределению Гумбеля. Этот тип распределения имеет место, если максимальное значение случайной величины ограничено сверху. В практике оценок предельных значений используется также одно предельное распределение Гумбеля. Этот тип распределения используется в случае, когда значения оцениваемых параметров ничем не ограничено. В данной работе используется только третье предельное распределение.

Первым применил теорию экстремальных значений для изучения сейсмичности Дж.М. Нордквист [9]. Он построил кривые распределения наиболее сильных землетрясений, наблюдавшихся на земном шаре, и отметил согласие экспериментальных данных с теорией экстремальных значений Гумбеля. С помощью этой теории Х. Куримото [8] нашел наиболее вероятную величину максимального афтершока. В.Н. Гайский [1], применив первое распределение Гумбеля к анализу энергии глубоких памиро-гиндукушских землетрясений, получил по-

ложительное согласие экспериментального графика повторяемости с теоретическим для землетрясений с $K < 15$. Для землетрясений с $K \geq 15$ получено заметное расхождение распределений, что может свидетельствовать об отклонении распределения землетрясений по энергии от степенного закона. Отмеченные работы были выполнены с использованием первого предельного распределения Гумбеля.

Метод третьего предельного распределения Гумбеля

Т.М. Егулалп и Т. Куо [13] рассмотрели пути реализации третьего предельного распределения Гумбеля и его применение для анализа максимальных значений магнитуд в различных сейсмоактивных регионах. В целом в их работе получено удовлетворительное согласие наблюдаемых значений M_{\max} с величинами M , найденными с помощью третьего предельного распределения. Однако более чем в 20 % случаев отмечены значительно завышенные значения M_{\max} , причина которых авторами не рассматривается.

Для землетрясений, распределенных во времени по закону Пуассона, справедливо выражение:

$$P_{III}(M, t) = e^{-\lambda_{III}(M)t},$$

$$\lambda_{III}(M) = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{M^* - M}{M^* - U} \right)^{1/\gamma},$$

где $P_{III}(M, t)$ – вероятность того, что максимальная магнитуда, наблюдаемая за t лет, будет меньше M ; $\lambda_{III}(M)$ – среднее число событий в год с магнитудой большей или равной M ; Δt – интервал времени, внутри которого определяются максимальные наблюдаемые события (временное окно); M^* – предельное характеристическое зна-

чение максимальной магнитуды; g и U – параметры, которые вместе с M^* находятся из наблюдений методом наименьших квадратов или моментов. Эти параметры нами вычислялись методом наименьших квадратов по программе, составленной А.О. Бобковым. Результаты расчетов использованы в ряде работ [3, 4].

В этих работах в большинстве случаев получено хорошее согласие наблюдаемых значений M_{\max} для зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ) Курильского региона. Однако в отдельных случаях, как уже отмечалось, были получены аномально большие значения M^* , причину которых объяснить с первого раза не удалось.

Каталоги землетрясений, использованные для оценки предельных магнитуд M^*

Предварительный анализ совокупности определений M^* при различных исходных данных показал, что вычисленные по формуле значения M^* существенно зависят от нескольких факторов: от полноты данных используемых выборок (каталогов), нижнего предела представительных магнитуд, временного интервала, охваченного выборкой, временного окна, в пределах которого определяется максимальное значение M , точности определения магнитуд отдельных событий, различия магнитудных шкал за разные периоды времени.

Мы попытались исследовать влияние отдельных факторов на оценки величины M^* . С этой целью нами использованы разные (по полноте, качеству и периодам наблюдений) каталоги для региона Японии, где имеется богатейшая статистика землетрясений за последние ~1400 лет (с 599 г.). Эти данные можно считать уникальными для северо-западной части Тихоокеанского сейсмического пояса.

Для определения оценок во всех каталогах использован единый интервал глубин 0–70 км, наиболее богатый сейсмическими событиями. Территориально наши выборки ограничены широтами 34–41°N. На территории о. Хонсю, соответствующей этим широтам, проживала и проживает основная масса населения Японии, что особенно важно для получения данных до начала инструментальных наблюдений (1880 г.). Здесь за историческое время отмечена значительная часть сильнейших землетрясений с $M \geq 8$. Примером тому является катастрофическое землетрясение в Японии 11 марта 2011 г. с магнитудой около 9. К этим широтам приурочен знаменитый сейсмоактивный разлом Фосса-Магна и очень активная часть на северо-востоке о. Хонсю.

Для выяснения влияния временного фактора на результаты оценки предельных магнитуд M^* рассмотрено три периода наблюдений (и соответственно три основных каталога): 1) ~1400 лет (599–2000 гг.); 2) 116 лет (1885–2000 гг.) и 3) 40 лет (1961–2000 гг.).

Первый каталог скомпонован из трех: а) каталог Т. Усами [11], содержащий данные об ощутимых землетрясениях за 599–1975 гг.; б) каталог Т. Утсу [12] за 1885–1980 гг.; в) выборка из каталога землетрясений Японии с 1981 по 2000 гг. Первый каталог скомпонован по следующей схеме (с заменой части каталога для некоторых временных интервалов): (599–1884гг.) Т. Усами [11] + (1885–1980гг.) Т. Утсу [12] + (1981–2000 гг.) – выборка из Гене-

рального каталога Японии, составленная Р.З. Таракановым. Отмеченная процедура преследовала цель – наиболее полно представить сейсмические события Японии за большой период времени. Второй каталог (116 лет) скомпонован из двух: (1885–1980 гг.) – Т. Утсу [12] + (1981–2000 гг.) – выборка из Генерального каталога Японии, т.е. второй каталог является частью первого. Третий каталог за 40 лет (1961–2000 гг.) с $M \geq 3$ является очень подробной сводкой землетрясений, опубликованной в отдельных номерах Японского метеорологического агентства [10].

До начала инструментальных наблюдений (1880 г.) основным источником сведений о землетрясениях Японии были макросейсмические данные. За этот период в каталог вошли в основном землетрясения под о. Хонсю или вблизи него. Даже сравнительно сильные землетрясения с эпицентрами в районе глубоководного желоба, не ощутимые на о. Хонсю, могли быть пропущены в каталоге Т. Усами [11]. Но самые сильные сейсмические события ($M \geq 8$), как правило, отмечались в каталоге, т.к. они ощущались на о. Хонсю. Эти особенности каталога Т. Усами необходимо учитывать при определении M^* по методу Гумбеля. Ценность первого каталога заключается в том, что он охватывает временной интервал в несколько сейсмических циклов, и с этой точки зрения представляет особый интерес, несмотря на неполноту данных (особенно до 1885 г.) и различную унификацию магнитуд за разные промежутки времени.

Второй каталог (за 1885–2000 гг.) составлен по данным инструментальных наблюдений и содержит сведения о землетрясениях с $M \geq 6$ в основном без пропусков. Он охватывает период наблюдений практически за полный сейсмический цикл.

Третий каталог (за 1961–2000 гг.) содержит очень подробную информацию о землетрясениях ($M \geq 3$) за сравнительно небольшой промежуток времени и в настоящей работе используется в основном в методическом плане.

Для получения более полной информации об особенностях кривых третьего предельного распределения Гумбеля, а также о характере и границах изменения параметров (M^* , U и g) предельного распределения и их корреляции между собой, нами построена система кривых $P_{III}(M)$ со следующими временными окнами для каждого каталога:

1 каталог – 1, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150 и 200 лет;

2 каталог – 1, 2, 3, 5, 7, 10, 15 и 20 лет;

3 каталог – 1/12, 1/4, 1/2, 1, 2, 3, 4 и 6 лет.

Для удобства дальнейшего изложения первому периоду наблюдений (каталогу) присвоен значок «А», второму «Б» и третьему «В».

Обсуждение результатов исследований

Результаты исследований применимости третьего предельного распределения Гумбеля суммированы на двух сводных иллюстрациях (рис. 1, 2). В качестве первого шага строились кривые $P_{III}(M^*, g(\text{Gamma}), U)$ по данным разных каталогов при отмеченных выше временных окнах. Всего построено 25 кривых по данным японских каталогов и 21 кривая по каталогам Курило-Охотского региона. В качестве примера на рис. 1, а–д приведены

вероятностные кривые $P_{III}(M)$, построенные по данным разных каталогов для временного окна ($T=10$ лет). Для варианта «г» (рис. 1, г) приведен пример для временного окна ($T=3$ года). Как видно из приведенного рисунка, отдельные эмпирические точки распределений $P_{III,i}(M)$ хорошо осредняются кривыми с отмеченными параметрами (см. в верхнем левом углу). Как уже говорилось, кривые $P_{III,i}(M)$ на рис. 1, а–г построены для одного и того

же участка Японии ($j^0=34-41$) и интервала глубин 0–70 км. Однако для разных вариантов получены разные значения предельных магнитуд M^* , изменяющиеся в широких пределах от 8,23 до 9,24. Это означает, что нельзя дать уверенные оценки M^* , используя только одно временное окно с интервалом 10 лет. Рис. 1, д приведен для сопоставления и соответствует Южно-Курильскому региону, соседствующему с Японией.

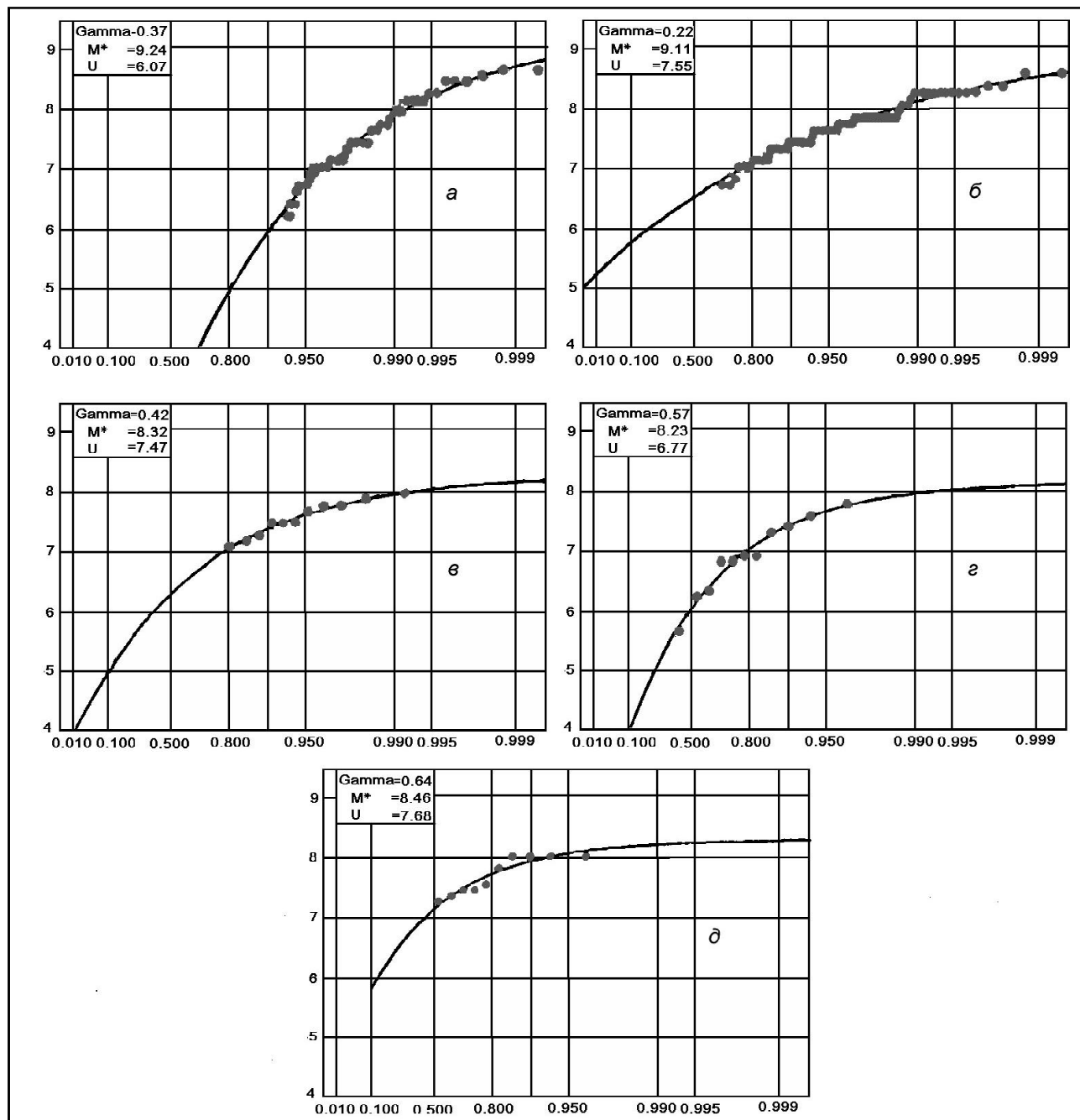


Рис. 1. Сопоставление кривых $P_{III}(M^*, U, \gamma)$ – третьего предельного распределения Гумбеля, построенных с использованием разных каталогов землетрясений региона Японии и Южно-Курильской зоны

Затемненными кружками показаны величины $P_{III}(M_{MAX})$ функции распределения вероятности для разных значений максимальных наблюдаемых магнитуд в данном временном окне; а – использованы данные каталога «А» (559–2000 гг.) без заполнения пропусков землетрясений; б – каталог «А» (559–2000 гг.) с заполнением возможных пропусков землетрясений с помощью графика повторяемости; в – каталог «Б» (1885–2000 гг.); г – каталог «В» (1961–2000 гг.); д – генеральный каталог для Южно-Курильской зоны (1900–2000 гг.); а, б, в, д, – временное окно $Dt = 10$ лет, г – временное окно $Dt = 3$ г.

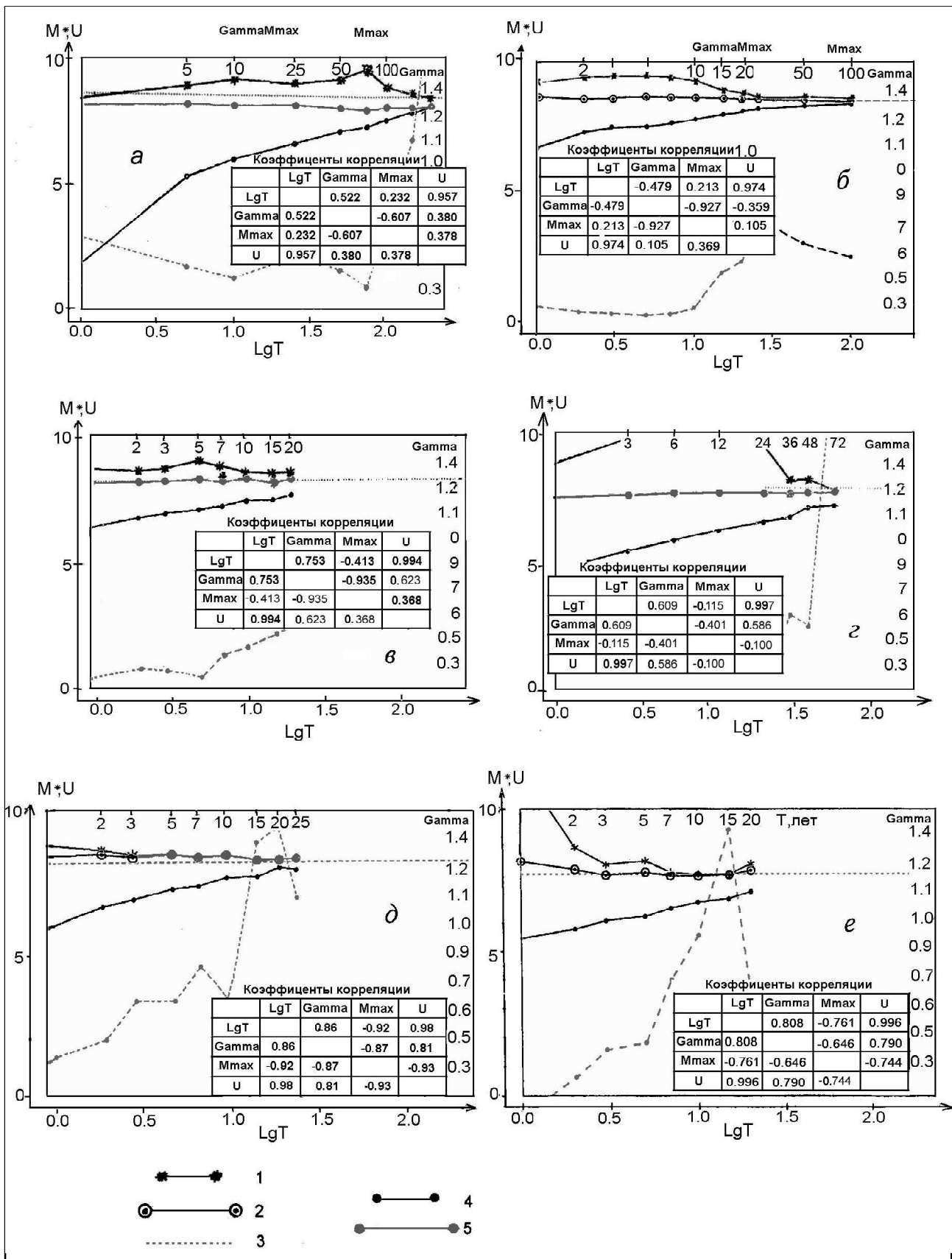


Рис. 2. Изменение параметров (M^* , U , g) третьего предельного распределения Гумбеля с увеличением временного окна (T , $lg T$) для разных каталогов землетрясений Японии и Курильского региона

1 – M^* – предельное характеристическое значение максимальной магнитуды; 2 – значение магнитуды при $P_{III}=0,995$; 3 – максимальное наблюдаемое значение магнитуды за рассматриваемый временной интервал; 4–5 соответственно параметры $u(4)$ и $\gamma(5)$, определяемые из наблюдений методом наименьших квадратов

Более полная картина изменения параметров M^* , U и g в зависимости от временного окна T или $\lg T$ (с указанием коэффициентов корреляции разных параметров между собой) отражена на сводном рис. 2. Здесь показаны также значения максимальных наблюдаемых магнитуд (тонкий пунктир) и величины M_{\max} при заданном значении функции распределения вероятности – $P_{III}=0,995$.

При большом разнообразии приведенных кривых можно отметить и некоторые общие закономерности: 1) во всех рассмотренных случаях величины U возрастают практически линейно с ростом $\lg T$; 2) магнитуды при заданном значении функции распределения вероятности ($P_{III}=0,995$) незначительно изменяются для разных временных окон и практически совпадают с их максимальными наблюдаемыми значениями;

Для построения вариантов а–д рис. 2 использованы те же каталоги, что и для вариантов а–д рис. 1. Вариант е рис. 2 построен с использованием генерального каталога для Северо-Курильской зоны.

3) результирующие кривые $M^*(\lg T)$, отражающие изменение предельных магнитуд землетрясений с ростом временных окон, имеют тенденцию к образованию куполообразных кривых с максимумом вблизи их центральной части (рис. 2, а–г); 4) значения g (на рис. 2) очень чувствительны к изменению предельных магнитуд при разных временных окнах, а кривые $M^*(\lg T)$ и $g(\lg T)$ имеют устойчивую обратную корреляционную связь. Характер изменения кривой $g(\lg T)$ свидетельствует о качестве исходных данных (каталога), а также о наличии некоторых методических нюансов.

Рассмотрим возможные причины наблюдаемых особенностей кривых рис. 2, а–е. Каталог «А», на основе которого определялись параметры третьего предельного распределения Гумбеля (рис. 1, а–д) и построены кривые их изменения (рис. 2, а–е) в зависимости от временных окон, характеризуется значительными пропусками землетрясений (особенно относительно слабых с $M=5-6$) и завышением их магнитуд. Причем абсолютные величины завышения увеличиваются с ростом магнитуд. Это объясняется тем, что в доинструментальный период магнитуды землетрясений в Японии определялись по макросейсмическим данным. Завышение магнитуд объясняется в основном за счет слабого поглощения на преобладающих путях сейсмических волн вдоль структур. Эффект возможных пропусков относительно слабых землетрясений может проявиться в искажении значений M^* для малых временных окон ($T = 1-5$ лет). Для временных окон с периодом от 5 до 50 лет отмечен некоторый рост предельных магнитуд с аномальным выбросом значений M^* при $T=75$ лет. Отмеченное относительное завышение предельных магнитуд объясняется, по-видимому, использованием макросейсмических данных, а также присутствием заметного числа событий, обусловленных закономерными связями (например, форшоки, афтершоки и группы землетрясений). Участок кривой $M^*(\lg T)$ при значениях $T>75$ лет (рис. 1, а) характеризуется уменьшением предельных магнитуд и приближением их к максимальным наблюдаемым значениям M_{\max} . При больших значениях временных окон,

приближающихся к продолжительности сейсмического цикла, сильные сейсмические события можно считать независимыми и подчиняющимися закону Пуассона. Не случайно в конечных точках всех кривых $M^*(\lg T)$ на рис. 2 значения предельных магнитуд M^* практически не отличаются от величин максимальных наблюдаемых магнитуд.

Основой для построения кривых изменения параметров предельного распределения на рис. 2, б явился каталог «А» с заполнением пропусков землетрясений в соответствии с графиком их повторяемости в каталоге [11]. В результате заполнения пропусков заметно поднялись точки кривой $M^*(\lg T)$, соответствующие временным окнам $T<5$ лет, и выровнялся общий ход всех кривых. Значения M^* близки к максимальным наблюдаемым магнитудам для временных окон $T>20$ лет.

Особый интерес (с точки зрения применимости метода Гумбеля) для определения M^* могут представить особенности аналогичных кривых, построенных по данными за период инструментальных наблюдений [12]. Как уже отмечалось, каталог «Б» содержит информацию о землетрясениях с унифицированными магнитудами почти за полный сейсмический цикл [7]. Все кривые рис. 2, в имеют плавный и закономерный характер изменения параметров с ростом $\lg T$ и характеризуются более высокими коэффициентами взаимной корреляции. О хорошем качестве каталога «Б» свидетельствует и относительно спокойный характер кривой $g(\lg T)$ очень чувствительной к разным нюансам.

Кривая $U(\lg T)$ практически представляет прямую линию, а величины магнитуд при заданном значении функции распределения вероятности ($P_{III}=995$) совпадают с максимальным наблюдаемым значением магнитуды за этот период ($M_{\max}=8,2$). Отмечается устойчивая корреляционная связь предельных магнитуд M^* с другими параметрами предельного распределения.

Рис. 2, г приведен в качестве примера неуверенных оценок предельных магнитуд за относительно короткий промежуток времени. Эти кривые рис. 2, г построены по данным детальных наблюдений (с $M\geq 3$) за период 1961–2000 гг. [10]. Несмотря на отличное качество каталога «В», он практически не пригоден для оценок M^* . В этом каталоге хорошо представлены слабые сейсмические события, а период наблюдений для таких оценок явно недостаточен. Об этом наглядно свидетельствует слабая корреляционная связь M^* с другими параметрами предельного распределения.

Рассмотренный метод третьего предельного распределения Гумбеля применен нами для оценки предельных магнитуд трех зон ВОЗ Курильской сейсмоактивной зоны. На рис. 2, д, е приведены кривые для сопоставления изменений параметров предельного распределения с ростом временного окна для Южно-Курильской и Северо-Курильской зон. Для построения этих кривых были использованы унифицированные каталоги землетрясений за период 1900–2000 гг. Все кривые (рис. 2, д, е) имеют плавный характер изменения с ростом временных окон, а параметры распределения отличаются высокими значениями коэффициентов взаимной корреляции.

Устойчивые оценки M^* практически для разных временных окон (рис. 2, д) объясняются, по-видимому, хорошей системой наблюдений (здесь практически не было пропусков землетрясений с $M \geq 5,5$ за весь период инструментальных наблюдений), а за 106 лет в регионе отмечено 6 сейсмических событий, близких по магнитуде ($M=8,0-8,2$) к максимально возможным.

Для Северо-Курильского региона (рис. 2, е) в случае малых временных окон ($T=1-2$ г.) получаются завышенные значения магнитуд M^* , обусловленные, по-видимому, особенностями сейсмического процесса в Северо-Курильском и Южно-Камчатском регионах, длительное время находящихся в районе очага катастрофического Камчатского землетрясения 5 ноября 1952 г. Однако в целом высокие значения коэффициентов взаимной корреляции параметров предельного распределения свидетельствуют о хорошем качестве использованного каталога. Начиная с временного окна $T=3$ г. получены достоверные оценки предельных магнитуд M^* . Устойчивые оценки максимальных магнитуд M_{\max} получаются и при заданных значениях функции распределения вероятности ($P_{III} = 0,995$).

Важным результатом данной работы можно считать выявление малой варьированности значений M_{\max} при $P_{III}(M)=0,995$ для разных временных окон. Вычисленные магнитуды при этом значении функции распределения вероятности практически совпадают (с точностью до 0,1–0,2 единицы магнитуды) с наблюдаемыми значениями M_{\max} . Это означает, что, несмотря на значительные вариации M^* при разных временных окнах, для интервала времени $T=200$ лет, соизмеримом с продолжительностью сейсмического цикла, с помощью третьего предельного распределения Гумбеля можно получить достаточно уверенные оценки M_{\max} . Этот результат может иметь важное значение при оценке сейсмической опасности региона. Стабильность кривой $M(\lg T)$ при $P_{III} = 0,995$ отмечается на всех графиках рис. 2. Сравнивая магнитуды сильнейших сейсмических событий, отмеченные в разных каталогах, мы видим, что более близкими к наблюдаемым M_{\max} для Курило-Камчатского региона и Японии в настоящее время являются значения 8,1–8,3.

Оценки, выполненные ранее [5], показывают, что энергия землетрясения, соответствующая этим магнитудам, может накапливаться в блоке, вертикальные размеры которого 60–70 км (а протяженность около 200 км) [6]. Интервал глубин соответствует положению кровли пластичной астеносферы, глубже которой сейсмический процесс резко затухает.

Основные выводы

В результате выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Метод третьего предельного распределения Гумбеля может эффективно применяться для оценки предельных магнитуд M^* землетрясений при соблюдении следующих условий: а) каталог землетрясений, используемый для определения M^* , должен содержать унифицированные магнитуды за весь период наблюдений; б) каталог должен содержать сведения о землетрясениях

минимального уровня, позволяющего без пропусков располагать информацией о M_{\max} для каждого временного окна; в) временной интервал, используемый для определения предельной магнитуды, должен быть соизмерим с продолжительностью сейсмического цикла для данного региона.

2. Более точные оценки предельных магнитуд M^* для разных временных окон получаются в случае, если используются унифицированные по магнитудам каталоги землетрясений, а за сейсмический цикл наблюдалось несколько сейсмических событий, близких к максимальным (пример – Южно-Курильская зона, рис. 2, д).

3. Более стабильные оценки получаются не для предельных магнитуд, а для магнитуд при заданных значениях функции распределения вероятности $P_{III}(M)$.

4. Изменение коэффициента U с ростом временного окна практически является линейной функцией $U(\lg T)$. Примечательно, что продолжение этой линии до пересечения с вертикальной $\lg T=2$ (примерная продолжительность сейсмического цикла для Курило-Японского региона) дает неплохую оценку максимальной магнитуды для региона. Например, для наиболее представительных вариантов (рис. 2, б, в и д) такие оценки дают для M_{\max} значения 8,2 и 8,3 для региона Японии и 8,5 для Южно-Курильской зоны.

5. С помощью третьего предельного распределения Гумбеля хорошие результаты оценки M^* , как правило, получаются для больших временных окон.

6. При малых временных окнах (значительно меньших сейсмического цикла) величины предельных магнитуд M^* , как правило, завышаются и определяются неустойчиво. В этом случае большой удельный вес в распределении $P_{III}(M)$ имеют землетрясения, отражающие сейсмический фон региона, зачастую осложненный процессами форшоков и афтершоков.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гайский В.Н. Статистическое исследование сейсмического режима. М.: Наука, 1970. 123 с.
2. Гумбель Е.Дж. Статистика экстремальных величин. М.: Наука, 1965. 535 с.
3. Сейсмический потенциал и зоны возможных очагов землетрясений Курило-Охотского региона: отчет о НИР (заключит.) / ИМГиГ ДВО РАН; рук. Ю.К. Чернов, отв. исп.: Р.З. Тараканов, Л.С. Оскорбин. Южно-Сахалинск, 1995. 85 с. № ГР 01910023175; Инв. № 02960003183.
4. Сейсмическое районирование территории СССР / отв. ред. В.И. Бунэ, Г.П. Горшков. М.: Наука, 1980. 307 с.
5. Тараканов Р.З. Оценка максимальных возможных магнитуд землетрясений для Курило-Камчатского региона // Природные катастрофы и стихийные бедствия в Дальневосточном регионе. Владивосток, 1990. Т. 1. С. 28–47.
6. Тараканов Р.З. Размеры очаговых зон сильных землетрясений Курило-Камчатского региона и Японии и проблема максимальных возможных магнитуд // Вулканология и сейсмология. 1995. № 1. С. 76–89.
7. Федотов С.А. Закономерности распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и Северо-Восточной Японии // Труды Ин-та физики

- Земли АН СССР. 1965. № 203/36/. С. 66–93.
8. Kurimoto H. A statistical study of some aftershock problem // Zisin. 1959. Vol. 12, N 1. P. 1–10.
 9. Nordquist J.M. Theory of largest values applied to earthquake magnitudes // Trans. Amer. Geophys. Union. 1945. Vol 26, N 1. P. 29–31.
 10. The seismological bulletin of the Japan meteorological agency for 1961–2000. Published by the Japan meteorological agency 1962–2000, Tokyo, Japan.
 11. Usami T. Study of historical earthquakes in Japan // Bull. Earthq. Res. Inst. 1979. Vol. 54, Part 3–4. P. 399–439.
 12. Utsu T. Catalog of large earthquakes in the region of Japan from 1885 though 1980 // Bull. Earthq. Res. Inst. 1982. Vol. 57, Part 3. P. 401–463.
 13. Yegulalp T.M., Kuo J.T. Statistical prediction of the occurrence of maximum magnitude earthquakes // Bull. Seismol. Soc Am. 1974. Vol. 64. N 2. P. 393–414.

The unique empirical materials on earthquakes in the Japanese region for the complete seismic cycle (116 years) and several seismic cycles (~1400 years) were used for testing the method applicability. It was shown that the third limiting Gumbel distribution method could be effectively used for the evaluation of M_{max} at the following conditions: 1. the earthquakes catalogue must be unified by magnitude and contain, practically without omissions, all events from the given minimal level of magnitude, during the whole period of observations; 2. The used time interval must be commensurable with the seismic cycle duration. More stable estimations are obtained not for the limiting amplitudes but for the magnitudes at given distribution of probability function values. The Gumbel method, taking into account the above mentioned conditions, was used for the evaluation of M_{max} in three zones of the Kurile-Okhotsk region. It has been obtained a good conformity of maximal magnitudes observed in the regions for 100 years, and the M_{max} values, at the value of distribution of probability function $P_1 = 0,995$.

Key words: earthquake, catalogue, magnitude, the Gumbel limiting distribution.