

# EARTH SCIENCES

## GEOECOLOGICAL INVESTIGATION OF MERCURY ON THE SHELF OF THE NORTH-EASTERN SAKHALIN IN THE PERIOD OF SEISMO-TECTONIC ACTIVATION

**Luchsheva L.N.,**

*Candidate of Biological Sciences  
Geological Institute Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia*

**Konovalev Yu.I.,**

*Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,  
Geological Institute Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia*

**Obzhirov A.I.**

*Doctor of Geological and Mineralogical Sciences,  
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute  
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences  
Vladivostok, Russia*

## ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РТУТИ НА ШЕЛЬФЕ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО САХАЛИНА В ПЕРИОД СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКОЙ АКТИВИЗАЦИИ

**Лучшева Л.Н.**

*кандидат биологических наук,  
Геологический институт Российской Академии наук,  
Москва, Российская Федерация*

**Коновалов Ю.И.**

*кандидат геолого-минералогических наук,  
Геологический институт Российской Академии наук,  
Москва, Российская Федерация*

**Обжиров А.И.**

*доктор геолого-минералогических наук,  
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва,  
Дальневосточное отделение Российской Академии наук,  
Владивосток, Российская Федерация*

### Abstract

Monitoring observations of changes in the levels of methane and mercury concentrations were carried out in the water column of the oil and gas bearing northeastern Sakhalin shelf in the period 1998-2000. Significant differences in the levels of methane and mercury concentrations were revealed on the shallow shelf, on the edge of the shelf, and in the upper part of the continental slope. The maximum concentrations of methane in water (more than 6000 nl/l) were noted over deposits of gas hydrates in the area of methane source discharge at the edge of the shelf. The maximum concentrations of the dissolved form of mercury (up to 0.090 µg/l) were found in the coastal shallow zone of the shelf and above methane sources. The maximum concentrations of suspended mercury (up to 0.036 µg/l) were found within the frontal zone of the East Sakhalin Current. It has been established that the differences in the distribution of methane and mercury concentrations in water are due to the decomposition of gas hydrate deposits during periods of seismotectonic activation of oil and gas bearing structures. Their opening due to stretching contributes to intense emanations of highly toxic dissolved mercury into the shelf waters, leading to environmental disasters on the Sakhalin shelf.

### Аннотация

Мониторинговые наблюдения за изменением уровней содержания метана и ртути были выполнены в водной толще нефтегазоносного северо-восточного шельфа Сахалина в период 1998-2000 гг. Выявлены существенные различия в уровнях концентраций метана и ртути на мелководном шельфе, на краю шельфа и в верхней части континентального склона. Максимальные концентрации метана в воде (более 6000 нл/л) отмечены над залежами газогидратов в районе разгрузки метанового источника на краю шельфа. Максимальные концентрации растворенной формы ртути (до 0.090 мкг/л) выявлены в прибрежной мелководной зоне шельфа и над метановыми источниками. Максимальные концентрации взвешенной формы ртути (до 0.036 мкг/л) обнаружены в пределах фронтальной зоны Восточно-Сахалинского течения. Установлено, что различия в распределении концентраций метана и ртути обусловлены разложением залежей газогид-

ратов в периоды сеймотектонической активизации нефтегазоносных структур. Их раскрытие за счет растяжения способствует интенсивным эманациям в шельфовые воды высокотоксичной растворенной ртути, приводящим к экологическим катастрофам на шельфе Сахалина.

**Keywords:** forms of mercury; monitoring of methane; gas hydrates; seismicity; ecological disasters; north-eastern shelf of Sakhalin.

**Ключевые слова:** формы ртути; мониторинг метана; газогидраты; сейсмичность; экологические катастрофы; северо-восточный шельф Сахалина.

## ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению поведения ртути в водах уникального нефтегазоносного северо-восточного шельфа Сахалина обусловлен его расположением в активной сейсмоактивной зоне, где происходит интенсивная современная дегазация ртути из земных недр. Процессы дегазации Земли, связанные с глубинными разломами в земной коре, приводят, как известно, к образованию месторождений нефти, горючих газов, ртути, и некоторых других полезных ископаемых [1]. Первоисточником ртути предполагается вещество мантии, при дегазации которой ртуть вместе с перегретым водяным паром выносятся в верхнюю часть земной коры [2, 3]. Миграция ртути из недр Земли осуществляется вместе с гелием, водородом и другими газами по зонам разломов мантийного заложения. Повышенная глубинность таких разломов способствует активным эманациям ртути из недр в периоды сеймотектонической активизации [4]. Процессы дегазации ртути, поступающей из тектонических разломов суши, изучаются довольно давно, а особенности ее миграции в гидросфере и толще донных отложений еще практически не изучены [5].

Шельф северо-восточного Сахалина является единственным на Дальнем Востоке районом, где ведется промышленная добыча нефтяных углеводородов. Все нефтегазовые месторождения сахалинского шельфа связаны с западным бортом глубоководной впадины Дерюгина, ограниченной серией глубинных надвигов, уходящих под ложе впадины, где они пересекают породы «базальто-

вого» слоя и верхней мантии. К этой же зоне приурочены коровые землетрясения и аномально высокие значения теплового потока [6]. В периоды сжатия пород, когда Тихоокеанская океаническая плита погружается под континентальную плиту Охотского моря, из погребенных органических отложений происходит выделение метана. В этой зоне субдукции под воздействием высокого давления и низкой температуры образуются залежи гидратов метана и других газов. Как известно, на шельфе северо-восточного Сахалина выявлены обширные подводные поля свободной дегазации метановых источников, локализованных в кровле осадочного чехла [7].

В 1998-2000 гг. в рамках российско-германского проекта COMEX нами были проведены мониторинговые исследования распределения потоков метана в водах нефтегазоносного северо-восточного шельфа Сахалина (Рис. 1) с целью разведки нефтегазовых месторождений, которые подтвердили высокую перспективность этого района на поиски залежей газогидратов [8]. Проведение мониторинговых исследований метана в пределах морских шельфов позволяет накапливать знания о формировании залежей и месторождений нефти и газа, а также необходимо для оценки газогеохимической обстановки в нефтегазоносных областях как предпосылки для экологических исследований в их пределах. В период проведения мониторинга метана в этом районе в 1998-2000 гг. появилась уникальная возможность для изучения также уровней содержания ртути в воде и особенностей ее поведения в морской среде.

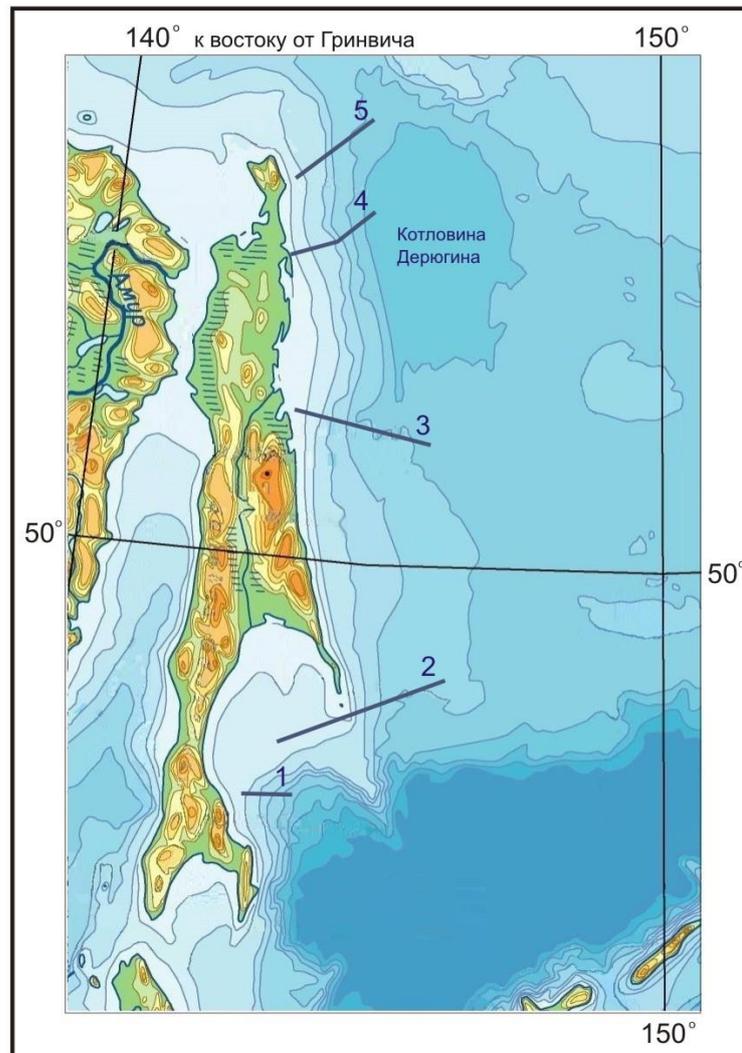


Рис.1. Карта района исследования. Расположение профилей станций (№ 1-5) мониторинга метана, проведенном на НИС «Профессор Гагаринский» в 2000 г. на восточном шельфе и материковом склоне Сахалина [8].

Подобные исследования в данном районе ранее не проводились и имеют большое значение в связи с тем, что эндогенные эманации метана значительно понижают содержание кислорода в морской воде, что может оказывать отрицательное влияние на жизнедеятельность гидробионтов. Ртуть, являясь опасным токсикантом, в больших количествах также способна оказывать негативное влияние на морскую биоту. В частности, на популяции наиболее чувствительных к среде обитания видов: серых китов и сельди тихоокеанской, для которых акватория северо-восточного шельфа Сахалина является наиболее важным районом питания и размножения. Северо-восточный шельф Сахалина характеризуется, как известно, большой продуктивностью бентосных сообществ, которыми питаются серые киты охотско-корейской популяции во время ежегодного летне-осеннего нагула. В настоящее время серые киты включены в категорию видов, находящихся под угрозой исчезновения [9].

В этом же районе происходит также нагул и нерест другого важного промыслового объекта - тихоокеанской сельди. В последние годы здесь резко

обострилась экологическая обстановка, вызывающая массовые заморы сельди и других промысловых видов гидробионтов. В июне 1999 г. в зал. Пильтун произошла экологическая катастрофа, связанная с массовой гибелью сельди, пришедшей на нерест [10]. В предлагаемой статье нами сделана попытка пролить свет на причины возникновения явного экологического неблагополучия в этом районе с использованием данных по ртути и ее термформам. Кроме того, были привлечены данные о распределения в водной толще концентраций метана и других гидрофизических и гидрохимических показателей водной толщи шельфовой экосистемы и рассмотрена их межгодовая изменчивость в период 1998-2000 гг.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили по материалам трех рейсов научно-исследовательских судов, проведенных в 1998-2000 гг. в пределах шельфа и континентального склона восточного Сахалина. В водах данной акватории изучение метана проводилось в течение трех лет (1998, 1999 и 2000 гг.), а ртути - двух лет (1998 и 2000 гг.). Гидрологические параметры

водной толщи (профили температуры, электропроводности и солености) были получены с помощью STD-зондов Sea Bird-91 и Mark-3. Профили вертикального распределения параметров водной толщи были построены непосредственно в процессе зондирования. Пробы морской воды были отобраны от морского дна до поверхности на заданных горизонтах системой «Rosett» батометрами Нискина.

**Определение метана и других газов.** Для анализа газовую фазу из проб морской воды извлекали на вакуумной установке и анализировали на газовых хроматографах ЛХМ-80. Было проведено определение содержания метана, тяжелых углеводородных газов, углекислого газа, кислорода и азота. Чувствительность анализа углеводородных газов составляла 0.00001%, остальных газов - 0.01%.

**Определение ртути.** Пробы морской воды, отобранные системой «Rosett», пропускали через мембранные фильтры с диаметром пор 0.45 мкм для отделения взвеси. Затем пробы подкисляли азотной кислотой и хранили в полиэтиленовых бутылках до проведения анализа [11]. Всего было проанализировано 230 проб морской воды, в которых определено содержание ртути в растворенной и взвешенной формах. Для определения растворенной ртути применяли метод предварительного концентрирования с помощью комплексообразователя тиюксина [12]. Определение взвешенной ртути проводили по методике, применяемой для анализа донных осадков [11]. Определение концентраций ртути в пробах проводили методом беспламенной атомно-абсорбционной спектрофотометрии [13] на ртутных анализаторах «Hiranuma HG-1» и «Юлия-2». Для калибровки прибора и контроля качества анализа использовали аттестованный японский стандартный образец.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Для исследований были выбраны 5 профилей станций в районах интенсивной дегазации метана из донных осадков в воду (см. Рис. 1). Изучение полученных годовых числовых рядов концентраций метана и ртути показало, что они представляют собой отдельные параметрические совокупности

концентраций, которые аппроксимируются кривыми, соответствующими логарифмической и экспоненциальной функциям. Впервые параметрическая чувствительность химических процессов была установлена Н.Р.Амундсоном и О. Билоузом. При этом в растворах концентрации примесных химических веществ являются переменными величинами единичных параметрических совокупностей, если формирование их концентраций происходило под воздействием единичных источников веществ [14]. Для фоновых концентраций метана и ртути в воде характерно распределение согласно нормальному закону распределения, описываемое логнормальной зависимостью. Это обусловлено тем, что фоновые показатели отражают осредненные условия, характерные для данной акватории. Фоновые показатели формируются под воздействием единого комплекса многочисленных естественных природных процессов глобального масштаба. Это свойство характерно для распределения широко распространенных в геологических объектах химических элементов, концентрации которых составляют первые проценты [15].

Экспоненциальное распределение изучаемых параметров среды отражает промежутки времени между последовательными эпизодами свершения одного и того же, возможно катастрофического природного события, формирующего эти показатели. Поэтому образование рядов параметрических совокупностей концентраций метана и ртути в воде на шельфе Сахалина с экспоненциальным типом распределения могло быть возможным только при периодически повторяющихся эманациях углеводородов из нефтегазовых месторождений в придонные слои морской воды. При этом формирование данных совокупностей концентраций эманированных веществ происходило, очевидно, в результате их промежуточных разбавлений [16]. Проведенные нами исследования полных выборок концентраций метана и ртути в шельфовых водах Сахалина выявили значительные межгодовые их изменения.

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТАНА

Таблица 1

**Совокупности полной выборки концентраций метана в воде северо-восточного шельфа Сахалина в 1998 г.**

Совокупности	Доля выборки, %	Концентрация, нл/л	Функция аппроксимации
I (фон)	43	60 +/- 26	логарифмическая
II	24	90 (75-120)	экспоненциальная
III	21	240 (125-400)	экспоненциальная
IV	12	940 (420-1630)	экспоненциальная

В 1998 г. в числовом ряде полной выборки (n=153 пробы) концентраций метана в воде были выделены 4 параметрические совокупности (Табл. 1). Зафиксирована одна «ураганная» проба с аномально высоким содержанием метана (11076 нл/л), превышающим фоновый уровень (60 нл/л) в 185 раз. При этом выборка проб с фоновым содержанием метана была достаточно представительной (43%). Это может свидетельствовать о начальной стадии сейсмоструктурной активизации нефтегазоносных структур шельфа Сахалина.

Таблица 2

**Совокупности полной выборки концентраций метана  
в воде северо-восточного шельфа Сахалина в 1999 г.**

Совокупности	Доля выборки, %	Концентрация, нл/л	Функция аппроксимации
I (фон)	27	60 +/- 32	логарифмическая
II	29	150 (80-260)	экспоненциальная
III-V	28	675 (270-1500)	экспоненциальная
VI-VII	16	4760 (1600-9100)	экспоненциальная

В 1999 г. в числовом ряду концентраций метана в воде (n=195 проб) было выделено 7 параметрических совокупностей (Табл. 2), что значительно превышало их количество в 1998 г. Выборка проб с фоновым содержанием метана (27%) была значительно меньше таковой в 1998 г. Были зафиксированы 3 «ураганные» пробы с концентрациями метана (15370, 23760 и 117120 нл/л), уровни которых превышали фон в 256–1952 раз. Формирование ура-

ганных содержаний метана могло быть обусловлено его интенсивным подтоком из нефтегазовых залежей в результате раскрытия разломных зон, обусловленного сдвиговыми геодформациями. При этом поверхности блоков земной коры испытывают цилиндрический изгиб, вследствие чего происходит раскрытие трещин и высвобождение летучих компонентов (газа и нефти), содержащихся в залежах [17].

Таблица 3

**Совокупности полной выборки концентраций метана  
в воде северо-восточного шельфа Сахалина в 2000 г.**

Совокупности	Доля выборки, %	Концентрация, нл/л	Функция аппроксимации
I (фон)	28	60 +/- 42	логарифмическая
II	28	170 (85-290)	экспоненциальная
III-IV	27	530 (320-690)	экспоненциальная
V-VII	17	2 665 (760-5600)	экспоненциальная

В 2000 г. в числовом ряду концентраций метана в воде (n=155 проб) было выделено 7 параметрических совокупностей (Табл. 3). Однако ураганных концентраций метана обнаружено не было.

*РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РТУТИ*

Таблица 4

**Совокупности полной выборки концентраций ртути  
в воде северо-восточного шельфа Сахалина в 1998 г.**

Совокупности	Доля выборки, %	Средние содержания ртути			Функция аппроксимации
		Общая, нг/л	Раств., %	Взвеш., %	
I (фон)	42	36 (22-41)	85	15	логарифмическая
II	31	46 (42-51)	83	17	экспоненциальная
III	22	61 (52-82)	81	19	экспоненциальная
IV	3	104 (90-129)	23	77	экспоненциальная

В 1998 г. в числовом ряду полной выборки концентраций ртути в воде (n=88 проб), взятых с 22 станций, было выделено 4 параметрические совокупности (Табл. 4), в которых уровни средних содержаний ртути всего в 4-10 раз превышали ПДК ртути для вод рыбохозяйственных водоемов (10

нг/л). Была также зафиксирована 1 «ураганная» проба, представленная на 94% взвешенной формой с содержанием общей ртути (263 нг/л), которое в 7 раз превысило фоновый уровень (36 нг/л) и в 26 раз - ПДК.

Таблица 5

**Совокупности полной выборки концентраций ртути  
в воде северо-восточного шельфа Сахалина в 2000 г.**

Совокупности	Доля выборки, %	Среднее содержание ртути			Функция аппроксимации
		Общая, нг/л	Раств., %	Взвеш., %	
I	35	24 (12-38)	67	33	экспоненциальная
II	21	47 (39-57)	72	28	экспоненциальная
III – IV	30	114 (60-177)	83	17	экспоненциальная
V – VII	14	590 (186-1068)	90	10	экспоненциальная

В 2000 г. в числовом ряду концентраций общей ртути в воде ( $n=125$  проб), взятых на 21 станции, было выделено 7 параметрических совокупностей (Табл. 5), в которых уровни средних содержаний ртути превышали ПДК ртути в 2-60 раз. Эти параметрические совокупности были аппроксимированы исключительно экспоненциальной функцией. При этом совокупности проб с фоновыми концентрациями выделить не удалось. Полученные данные показали, что в 2000 г. уровень максимальных концентраций ртути в воде (которые были представлены преимущественно растворенной формой) превышал более чем в 100 раз уровень ПДК и в 30 раз - фоновый уровень 1998 г. Появление в воде аномально высоких концентраций ртути в растворенной и взвешенной форме было обусловлено, очевидно, резким усилением уровня сейсмичности на Сахалине в этот период.

*ВАРИАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РТУТИ И  
МЕТАНА В СВЯЗИ С ИЗМЕНЕНИЕМ  
ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОДНОЙ  
ТОЛЩИ*

Наиболее подробное исследование особенностей распределения концентраций метана, ртути и других гидрологических и гидрохимических параметров в водной толще на северо-восточном шельфе Сахалина было проведено на траверзе зал. Пильтун, где проходил 4-й профиль станций мониторинга, выполненного на НИС «Профессор Гагаринский» в 2000г. (см. Рис. 1). Профиль 4 охватывал четыре зоны шельфа: мелководная зона (станция G00-2, глубина 25 м), край шельфа (станция G00-3, глубина 100 м), верхняя часть материкового склона (станции G00-4 и G00-5, глубины 450 и 600 м) и глубоководная зона (станция G00-6, глубина 1200 м) [8]. На данном профиле максимальные концентрации метана (до 5500 нл/л) были зафиксированы в придонном слое на краю шельфа. В этой зоне происходила активная разгрузка мощного холодного метанового источника (сипа) с высотой газового факела более 40 м. В водной толще над этим источником максимальные концентрации метана более чем в 100-180 раз превышали фоновый уровень метана (30-50 нл/л) в придонном слое вод северо-восточного шельфа Сахалина [18]. Максимальные концентрации ртути зафиксированы в основном в мелководной части шельфа, где среднее

содержание ртути (322 нг/л) было в 3 раза выше такового на краю шельфа (103 нг/л). При этом уровни максимальных концентраций ртути (1032 и 993 нг/л) в этих районах были почти одинаковыми.

В водной толще верхней части континентального склона была зафиксирована хорошо выраженная фронтальная зона Восточно-Сахалинского течения, которая прослеживалась до глубины 500 м. Фронтальная зона была образована двумя сходящимися потоками вод: опускающимися с шельфа холодными метаносодержащими водами и поднимающимися по склону теплыми морскими водами (Рис. 2). В зоне наибольшего обострения фронтальной зоны (на глубине 200-240 м) был сформирован ярко выраженный локальный максимум взвешенной формы ртути (Рис. 2А). Процентное содержание этой формы ртути почти в 3 раза превышало ее нормальное содержание в данном районе. Другой локальный максимум взвешенной ртути примерно такого же уровня наблюдался непосредственно над фронтальной зоной течения у поверхности моря. С максимумами взвешенной ртути были пространственно сопряжены локальные максимумы растворенной формы ртути, имеющие тенденцию подъема к поверхности моря (Рис. 2В).

Над фронтальной зоной течения был сформирован приповерхностный минимум концентрации растворенной формы ртути, уровень которого был значительно (в 3 раза) ниже среднего значения. В зоне обострения фронтальной зоны также произошло наиболее резкое снижение (в 15 раз) концентраций метана, почти до фонового уровня (Рис. 2С). По нашему мнению, резкое снижение концентраций метана и растворенной ртути в воде произошло в результате вовлечения и трансформации этих веществ в ходе интенсивных микробиологических процессов во фронтальной зоне течения. Эта зона является, по-видимому, природным биофильтром, где происходит очищение шельфовых вод от метана и ртути. Это возможно за счет формирования многочисленных локальных завихрений в пределах фронтальной зоны за счет интенсивного перемешивания разнородных слоев водных потоков. Эти завихрения являются, по-видимому, микронизмами для обитания специфического сообщества микроорганизмов, основанного в основном на метане.

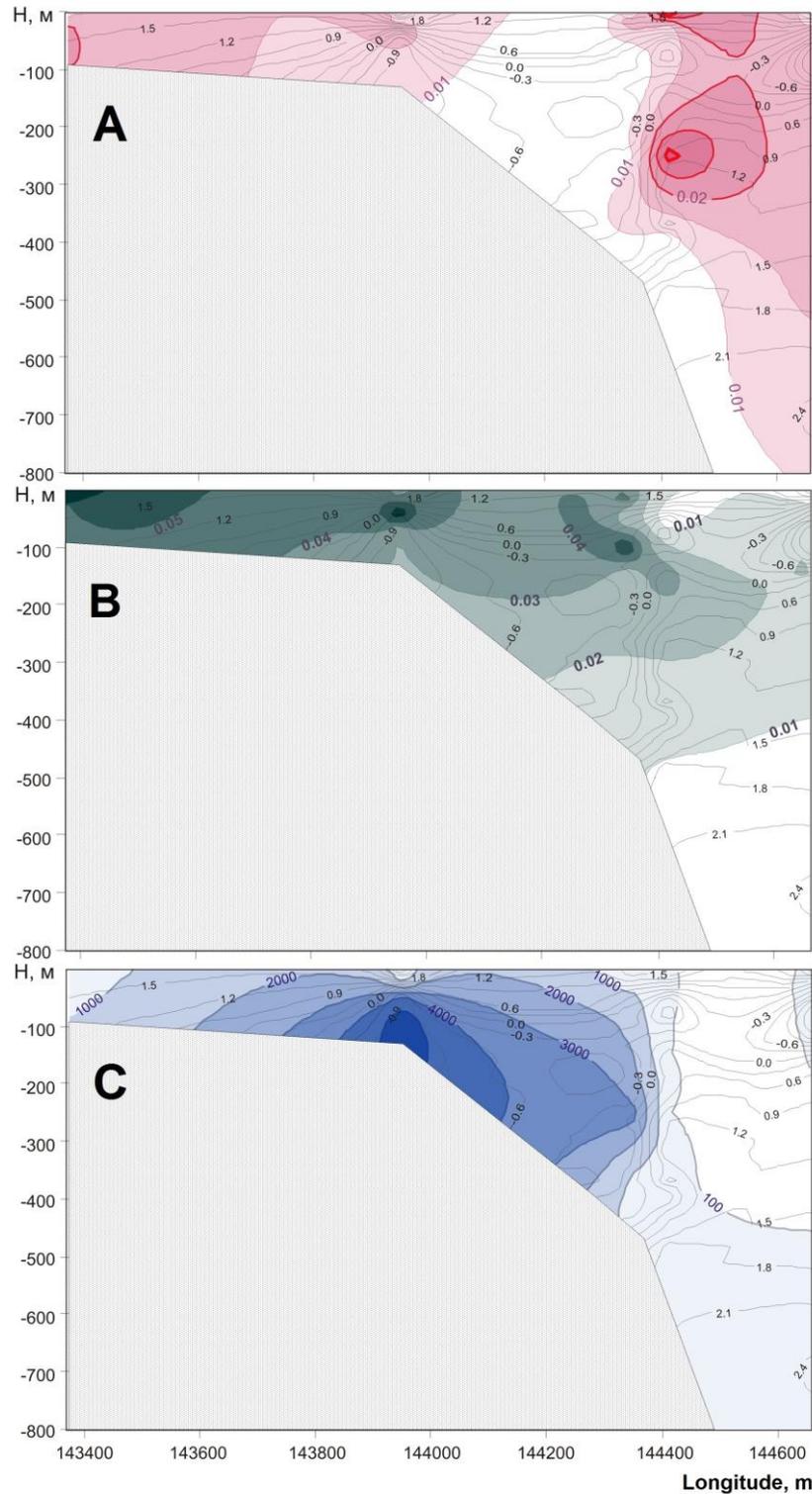


Рис. 2. Распределение изолиний температуры воды, концентраций взвешенной формы ртути (А; мкг/л), растворенной формы ртути (В; мкг/л) и метана (С; нл/л) на вертикальном разрезе водной толщи восточного шельфа Сахалина 4-го профиля станций.

Функционирование данной фронтальной зоны течения происходит, очевидно, аналогично биофильтрам с псевдосжиженным слоем, которые используются для очистки сточных вод. В этих биофильтрах в результате интенсивного перемешивания воды создаются сильные восходящие турбулентные потоки, в которых микроорганизмы активного ила поддерживаются во взвешенном состоянии [19]. В природных биофильтрах при мик-

робном окислении метана основные экзометаболиты (углекислый газ и вода) интенсивно образуются через промежуточные продукты (метанол, формальдегид и формиат). При этом в процессе метаболизма микроорганизмы метанотрофного сообщества продуцируют также метилртуть - наиболее токсичное вещество из всех соединений ртути [20]. Под действием бактерий и грибов происходит окисление ртути и ее соединений, а также разного рода

трансформации, результатом которых является детоксикация ртути. К обезвреживанию ртути приводит процесс восстановления ее ионной формы до элементарного состояния с последующим удалением ртути из водной толщи [21].

В пределах фронтальной зоны Восточно-Сахалинского течения основное количество растворенной ртути потребляется и накапливается, очевидно, в тканях метанотрофных бактерий, скопления которых формируют локальные максимумы взвешенной ртути в воде. В зоне обострения фронтальной зоны локальный максимум взвешенной ртути был сформирован, по-видимому, ртутью, содержащейся в тканях живых бактерий. В приповерхностном слое максимум ртути был сформирован, очевидно, ртутью, содержащейся в отмершем микропланктоне в результате его всплывания и накопления. Как известно, существует такое явление, как «антидождь трупов», которое обусловлено всплыванием к водной поверхности отмерших организмов нейстонного сообщества. Со временем одна часть этих организмов оседает в нижнюю часть водной толщи в зоне опускания, а другая часть рассеивается под влиянием ветра и течений [22]. Очевидно, именно таким образом происходит природное самоочищение шельфовых вод Сахалина от метана, ртути и других загрязняющих веществ.

### РОЛЬ ПОДВОДНЫХ МЕТАНОВЫХ ИСТОЧНИКОВ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ МЕТАНА И РТУТИ В ВОДНОЙ ТОЛЩЕ

На северо-восточном шельфе Сахалина в период проведения мониторинговых исследований метана в 1998-2000 гг. и в другие годы было зафиксировано большое количество контрастных акустических аномалий в водной толще, формируемых разгрузкой подводных газовых источников [23]. Распределение концентраций метана и ртути в воде на гидрологическом разрезе водной толщи 4-го профиля района мониторинга показало, что источником повышенных концентраций этих веществ являются прибрежные нефтегазовые залежи, а также метановые источники, расположенные на краю шельфа и в верхней части континентального склона. Большинство источников имеет постоянное место расположения, при этом режим и интенсивность их извержений изменяются во времени. В периоды активизации газовые источники выделяют большое количество метана, формируя звукорассеивающие акустические аномалии в толще воды (Рис. 3). В нижней части зон разгрузки наиболее активных газовых сипов, к которым относится источник «Факел Обжирова», уровни аномальных концентраций метана в воде достигают 11000–24000 нл/л. Этот источник, расположенный на глубине 700 м на континентальном склоне северо-восточного Сахалина, хорошо изучен в морских экспедициях российско-германского проекта КОМЕХ [8, 18].

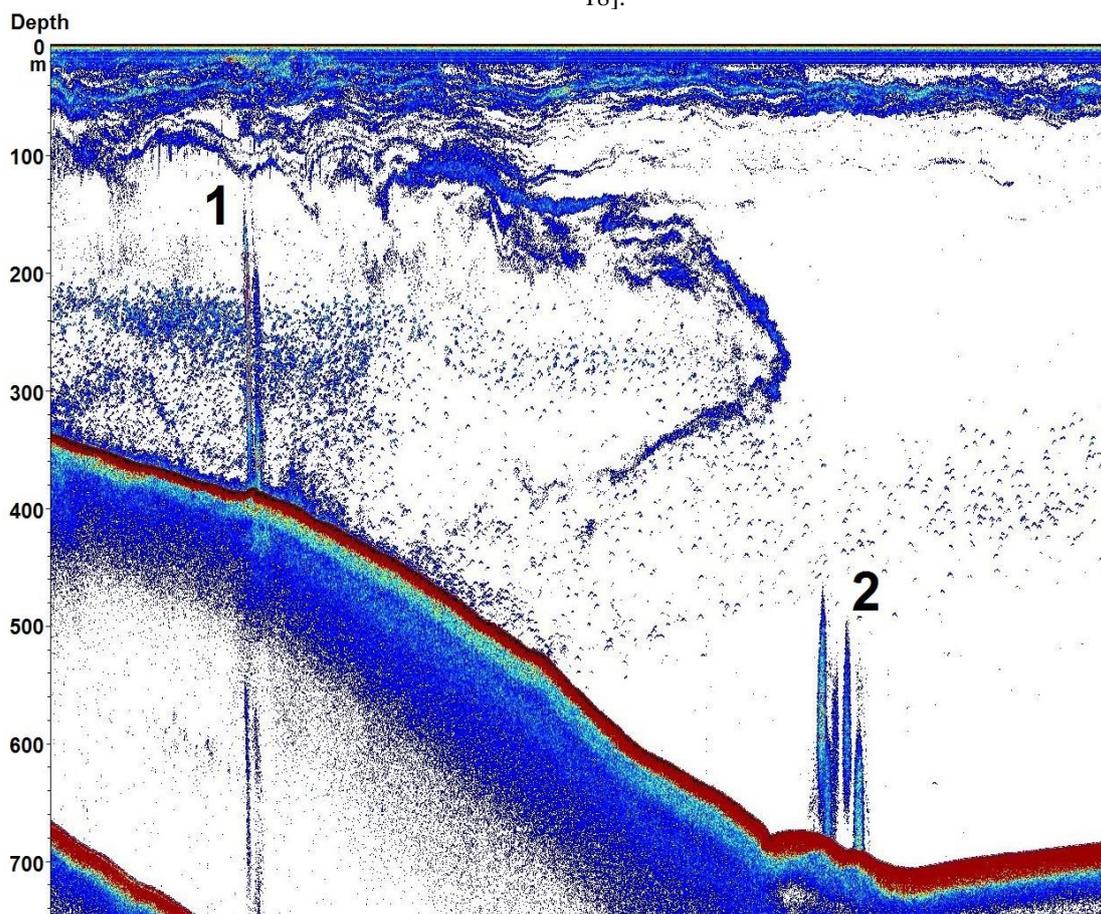


Рис. 3. Акустические эхограммы потоков метана в водной толще над газовыми источниками «Гизелла» (1) и «Факел Обжирова» (2) на северо-восточном склоне о. Сахалин в октябре 2007 г. [7].

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РТУТИ  
В ОСАДОЧНОЙ ТОЛЩЕ НАД ЗАЛЕЖЬЮ  
ГАЗОГИДРАТОВ**

В литологической колонке донных отложений, взятой из зоны расположения газового источника «Факел Обжирова» были изучены уровни и распределение концентраций ртути, а также выявлен аномально

высокий уровень ее содержания во всех гранулометрических фракциях осадочной толщи (Рис. 4). Резкое изменение концентраций ртути в колонке было обусловлено, очевидно, наличием литологических экранов в толще осадков, препятствующих ее свободной вертикальной миграции к поверхности дна.

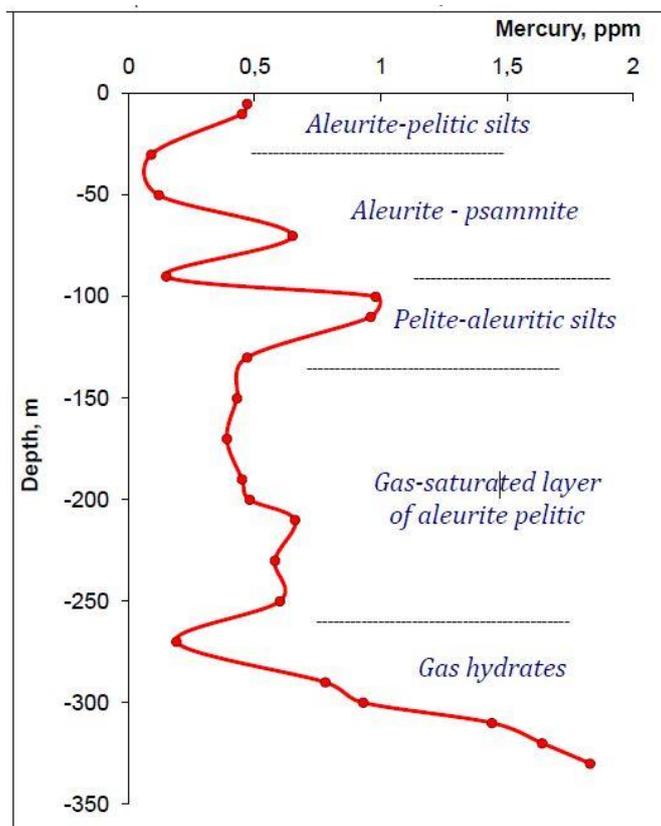


Рис. 4. Распределение концентраций ртути (нг/г) в донных осадках литологической колонки (Ge 99-29) из района газового источника «Факел Обжирова». Гранулометрические типы осадков приведены в: [24].

В верхнем слое осадков литологической колонки содержание ртути (470 нг/г) превысило региональный фоновый уровень (25 нг/г) почти в 30 раз. В колонке на глубине 2.5 м был зафиксирован слой осадков с газогидратами, непосредственно в котором и под ним содержание ртути было аномально высоким (до 1830 нг/г), которое превысило фоновый уровень более чем в 70 раз. Эти данные служат подтверждением того, что залежи газогидратов экранируют потоки эндогенной ртути, накапливают ее в себе и подстилающих донных осадках и являются потенциальным источником эманиций ртути в водах нефтегазоносных районов [25]. Наши исследования показали, что на начальном этапе активизации метановых газовых источников происходят выбросы в придонный слой воды повышенного количества ртути во взвешенной элементной форме [26]. Металлическая ртуть, как известно, очень летуча и в результате дегазации земных недр поступает в атмосферу в виде паров. При этом в периоды сейсмотектонической активизации недр из нефтегазовых месторождений и залежей газогидратов происходят наиболее значительные эманиции

ртути. Тектонические подвижки в верхних частях литосферы приводят к раскрытию зон глубинных разломов мантийного заложения и разрушению залежей газогидратов. Поэтому в эти периоды происходит разгрузка метановых сипов и интенсивное поступление ртути в шельфовые воды Сахалина.

#### ОБСУЖДЕНИЕ

На шельфе Сахалина периоды активизации газовых источников зависят от интенсивности сейсмотектонических движений земной коры в пределах Хоккайдо-Сахалинской складчатой области. Эта область входит в состав подвижного Тихоокеанского складчатого окраинно-континентального пояса и представляет собой систему нижнекоровых и глубинных литосферных разломов Охотской морской плиты с континентальной и субконтинентальной корой [27, 28]. Охотская морская литосферная плита граничит с Тихоокеанской океанической плитой в зоне субдукции, где Тихоокеанская плита погружается под Охотскую плиту. Векторы подвижек и диапазон скоростей Охотской плиты в наибольшей мере связаны с воздействием Тихооке-

анской плиты и оказывают непосредственное влияние на структуры Сахалина. В периоды глобальной сейсмотектонической активизации в пределах Хоккайдо-Сахалинской складчатой системы происходят землетрясения, большинство которых возникает на окраинах литосферных плит [29]. Так, в ноябре 2015 г. в пределах Тихоокеанского складчатого пояса произошла целая серия сейсмических событий, которые сопровождалось вулканическими извержениями в Индонезии и Перу, а также умеренными подземными толчками вокруг всей Тихоокеанской плиты: в Калифорнии, Чили, Перу, Колумбии, Венесуэле, Бразилии, Индонезии, Папуа-Новой Гвинее. Все указанные землетрясения могли свидетельствовать о росте сейсмического напряжения в тот период и совпали с эпизодом одного из самых мощных проявлений течения Эль-Ниньо, связанного со сложным комплексом причинно-следственных связей в системе «атмосфера-гидросфера-Земля» [30].

#### *ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ КАТАСТРОФЫ И ИХ СВЯЗЬ С ПРИРОДНЫМИ И ТЕХНОГЕННЫМИ АНОМАЛИЯМИ*

**Эль-Ниньо.** Природное явление Эль-Ниньо ученые относят к разряду глобальных катастроф планеты, кардинально изменяющих климат Земли. Феномен Эль-Ниньо 2015-2016 гг. вошел в число самых мощных его эпизодов, которые наблюдались также в 1982-1983 и 1997-1998 гг. [31]. Весьма примечательно, что произошедшее в 1997-1998 гг. мощное Эль-Ниньо предшествовало периоду проведения наших мониторинговых исследований на восточном шельфе Сахалина, описываемых в данной статье. Явление Эль-Ниньо представляет собой сложное сочетание атмосферных процессов, вызванных комплексом геофизических факторов. Эти факторы приводят к развитию лунно-солнечных нутационных колебаний в атмосфере и Мировом океане, а также моделируют процессы, происходящие в глубинах Земли, которые формируют периодические импульсы дегазации и сейсмотектонической активности. В годы проявления наиболее сильных Эль-Ниньо в Тихом океане резко возрасла сейсмическая активность Восточно-Тихоокеанского поднятия, где существенно повышалась температура поверхностного слоя воды в результате выхода большого количества перегретых эндогенных газов (особенно водорода и метана) как следствие землетрясений [32, 33].

Наиболее сильные эпизоды Эль-Ниньо влияют не только на интенсивность термических и механических колебаний в атмосфере, океане и недрах Земли, но также и на периодичность и интенсивность экологических катастроф в пределах Тихоокеанского подвижного пояса. Примерами таких явлений могут служить сильное землетрясение в г. Угледорске (5 августа 2000 г.), а также обострения критического состояния популяций серых китов и сельди тихоокеанской, произошедшие в период проведения наших мониторинговых исследований на сахалинском шельфе в 2000 г.

Как известно, на северо-восточном шельфе Сахалина традиционно происходит летне-осенний

нагул серых китов охотско-корейской популяции в связи с большой продуктивностью бентосных сообществ в этом районе. В 1998-2000 гг. общее количество охотско-корейских серых китов заметно уменьшилось, и они были включены в категорию видов, находящихся под угрозой исчезновения. В 1999 г. 14-47% обследованных китов были признаны крайне истощенными. Многие из них погибли в зимний период в лагунах Калифорнийского залива и на пути миграции. В 2000 г. погибло почти в два раза больше китов, чем в 1999 г. [9].

У северо-восточного побережья Сахалина происходит также нагул и нерест другого важного промыслового объекта - тихоокеанской сельди. В период размножения сельдь заходит на нерест в зал. Пильтун и другие опресненные заливы восточного Сахалина. Однако в последние годы в этом районе резко обострилась экологическая обстановка, вызывающая массовые заморы сельди и других промысловых видов гидробионтов. В июне 1999 г. в зал. Пильтун произошла экологическая катастрофа, связанная с массовой гибелью тихоокеанской сельди. Тогда на побережье залива было обнаружено более 5000 т мертвой сельди [10].

**Сейсмическая активность.** По нашему мнению упомянутые выше масштабные экологические катастрофы могли быть обусловлены значительным деформированием и разрушением горных пород, вмещающих нефтегазовые залежи и ртуть. Согласно выводам экспертов, при сжатии блоков пород из газовой шапки нефтегазовых залежей сначала интенсивно выделяются углеводородные газы, обогащенные атомарной ртутью. Затем выделяется газовый конденсат, содержащий смесь УВ газов и жидких фракций легких углеводородов. Ртуть, поступающая из недр, естественным образом накапливается и в природном газе, и газовом конденсате месторождений. При этом наибольшее ее концентрирование происходит в высокотоксичном воднометанольном растворе, содержащемся в газовом конденсате [34].

В периоды землетрясений в шельфовые воды Сахалина регулярно попадают большие количества метана, ртути и других природных токсикантов. Однако в шельфовой экосистеме выработались, очевидно, природные механизмы микробиологического самоочищения морских вод от природных токсикантов в результате их естественной биодеградации адаптированной микрофлорой. Наглядным примером природного самоочищения может служить рассмотренное нами выше распределение концентраций метана и ртути в пределах фронтальной зоны Восточно-Сахалинского течения. Однако при интенсивной нефтедобыче, начатой на сахалинском шельфе в 1998 г., в прибрежные воды поступает слишком большое количество различных токсикантов и ксенобиотиков, поэтому нагрузка на естественные процессы самоочищения водной среды является избыточной, что приводит к постепенному накоплению загрязнений [35].

**Техногенные причины.** Причину гибели рыбы в водах зал. Пильтун официальные государственные органы объяснили недостатком кислорода из-

за неблагоприятной ледовой обстановки. Однако, по мнению экологических организаций, отравление рыбы произошло нефтепродуктами и диспергентами, используемыми для ликвидации последствий разливов нефти. Это могло произойти, в частности, в результате аварийного сброса в 1998 г. с нефтегазодобывающей платформы «Моликпак» Пильтун-Астохского нефтяного месторождения компании «Сахалин Энерджи» [10].

Негативные последствия разработок нефтяных месторождений могут быть также обусловлены нарушением природного механического равновесия земных недр в зонах залежей и в окружающей геофизической среде. Так, на Пильтун-Астохском месторождении после его 10-летней разработки была зафиксирована так называемая «наведенная сейсмичность». Подобные события обычно происходят через 12 и 14 лет после начала разработки нефтегазовых месторождений и приводят к значительным разрушениям и огромному экономическому и экологическому ущербу [36].

В последнее время, в связи с резким обострением экологической обстановки на северо-восточном шельфе Сахалина, встал ребром вопрос: «нефть или рыба?». С подобной дилеммой несколько лет назад столкнулись в Норвегии, где «Союз рыбаков» потребовал запрета сейсмологических изысканий нефтедобытчиками в районах обитания и миграции рыб. Некоторый компромисс, наконец, был найден. Рыбодобытчикам были возвращены площади, конфискованные для добычи нефти и газа, а также было значительно снижено количество вредных отходов, сбрасываемых в морскую среду. Суть проблемы выразил представитель Ассоциации норвежских моряков Р. Нильсен, который подчеркнул, что рыбодобывающая и нефтегазовая отрасли просто обречены на сотрудничество. Развивая эти отрасли необходимо избегать взаимного ущерба, так как миру в первую очередь нужна еда. Она будет нужна и после того, как закончатся запасы нефти и газа на морском шельфе [37].

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Таким образом, в результате проведенных нами исследований установлено, что в шельфовые воды северо-восточного Сахалина в периоды сейсмотектонической активизации и напряженно-деформируемого состояния недр периодически поступают большие эманации ртути из нефтегазовых залежей. Уровни этих эманаций могут более чем в 100 раз превышать уровень ПДК ртути для вод рыбохозяйственных водоемов.

В периоды сейсмотектонической активизации происходит также разрушение залежей газогидратов метана и активизация разгрузки холодных метановых сипов. При этом формируются холодные водные массы, насыщенные метаном. Холодные шельфовые воды опускаются по континентальному склону и контактируют с поднимающимися глубинными более теплыми водами, в результате чего формируется контрастная фронтальная зона Восточно-Сахалинского течения. В этой фронтальной зоне под воздействием шельфовых вод, обогащенных метаном, формируется природный биофильтр,

где происходит интенсивная трансформация метана и ртути, при которой ее токсичная растворимая форма превращается в малотоксичную взвешенную форму, что приводит к очищению шельфовых вод от ртути. При этом основное накопление взвешенной ртути происходит в поверхностном слое воды непосредственно над фронтальной зоной, откуда она затем рассеивается в глубоководной части моря.

По нашему мнению, нефтегазовые месторождения, расположенные на северо-восточном шельфе Сахалина являются не учитываемым ранее значительным природным источником ртути, поступающей в морскую среду. Экологические катастрофы, произошедшие в данном районе в 1998-2000 гг., могли быть связаны с началом промышленной добычи нефти и периодом усиления сейсмичности, который мог быть опосредованно связан с эпизодом необычайно сильного явления Эль-Ниньо, произошедшего в 1997-1998 гг. Наложение антропогенного воздействия, вызванного интенсивной нефтедобычей на сахалинском шельфе, на природные эманации ртути способно значительно усугублять экологическую ситуацию в данном районе. Оно может являться основной причиной экологических катастроф в этом районе, особенно в годы значительной сейсмотектонической активности. Так как в эти периоды велика вероятность поступления больших эманаций ртути из нефтегазовых залежей в шельфовые воды Сахалина, необходимо поставить в известность нефтяников о реальной угрозе экологических катастроф. Поэтому требуется принятие соответствующих природоохранных мер с внесением изменений и дополнений в существующие нормативно-правовые акты, регулирующие добычу нефти и газа на сахалинском шельфе.

#### **References**

1. Degassing of the Earth and geotectonics / Ed. Kropotkin P.N. Moscow, Nauka Publ., 1980. 291 p.
2. Kuznetsov V.A., Obolensky A.A. Questions of the genesis of mercury deposits and the problem of the source of ore matter. *Geology and Geophysics*, 1970, no. 4, pp. 44-47.
3. Fedorchuk V.P. *Geology of mercury*. Moscow, Nedra Publ., 1983. 270 p.
4. Ozerova N.A., Pikovskiy Yu.I., Butuzova G.Yu., Karamata S. Mercury content of ore and hydrocarbon formations in conjugated zones of ocean-continent deep faults / *Geology of Seas and Oceans*. Moscow, IO RAS Publ., 2007. No. 2, pp. 56-58.
5. Kostova S.K., Popovichev V.N., Egorov V.N., Plotitsyna O.V., Artemov Yu.G. Distribution of mercury in water and bottom sediments in the places of localization of jet methane gas emissions from the bottom of the Black Sea. *Marine Ecological Journal*, 2006, vol. 5, no. 2, pp. 47-56.
6. Raznitsin Yu.N. Geodynamics of ophiolites and the formation of hydrocarbon deposits on the East Sakhalin shelf. *Geotectonics*, 2012, no. 1, pp. 3-18.
7. Rybalchenko V.V., Gogonenkov G.N., Slepchenko V.A. Vertical gas migration and gas hydrates

on the northeast Sakhalin shelf. *Oil and Gas Geology*, 2017, no. 2, pp. 38-51.

8. Monitoring of methane in the Sea of Okhotsk / Ed. Obzhirov A.I. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2002. 250 p.

9. Vinogradov M.E. On the catastrophic state of the Okhotsk-Korean population of gray whales and measures to save it. Available at: ([http://npacific.ru/np/sovproblem/oil\\_sea/vozdeistvie/whale/public8.htm](http://npacific.ru/np/sovproblem/oil_sea/vozdeistvie/whale/public8.htm)).

10. Samatov A.D. On the issue of the death of herring in Piltun Bay. Available at: (<http://www.book.lib-i.ru/25biologiya/266371-1-kvoprosu-gibeli-seldi-zal-piltun-rezultati-issledovaniy-zal-piltun-sahniro-1996-sootvetstvie-tematicheskim-plano.php>).

11. Prokofiev A.K., Stepanchenko T.V. Determination of labile mercury in sea water and total mercury in bottom sediments by cold vapor atomic absorption. *Proceedings of the State Oceanographic Institute*, 1981, no. 162, pp. 34-42.

12. Vircavs M.V., Veveris O.E., Bankovsii Yu.A. The use of thioxin for the concentration of heavy metals by co-precipitation / *Proceedings of the II All-Union Conference on concentration methods in analytical chemistry*. Moscow, Nauka Publ., 1977. Pp. 202-203.

13. Hatch W.R., Ott W.L. Determination of sub-microgramme quantities of mercury by atomic absorption spectrophotometry. *Anal. Chem.*, 1968, vol. 40, no. 14, pp. 2085-2087.

14. Bilous O., Amundson N.R. Chemical Reactor Stability and Sensitivity: II. Effect of Parameters on Sensitivity of Empty Tubular Reactors. *ICH E J.*, 1956, no. 2, pp. 117-126.

15. Yaroshevsky A.A. Application of Mathematics in Geochemistry: Some Types of Problems and Solution Methods. *Soros Educational Journal*, 1996, no. 7, pp. 67-73.

16. Aris R. Analysis of processes in chemical reactors. Leningrad, Chemistry Publ., 1967. 328 p.

17. Kapochkin B.B., Kucherenko N.V., Kapochkina A.B. The problem of the stability of reserves of explored natural gas fields under modern changes in geodynamic conditions / *Proc. Int. Symp. "Ecological problems of the oil and gas complex. Ecology Science Technique"*. Kyiv, 2007, pp. 23-25.

18. Obzhirov A.I. Gas geochemical fields of the bottom layer of seas and oceans. Moscow, Nauka Publ., 1993. 139 p.

19. Henze M., Armoes P., La-Cour-Jansen J., Arwal E. Wastewater treatment. Moscow, Mir Publ., 2004. 480 p.

20. Rusanov I.I., Savvichev A.S., Yusupov S.K., Pimenov N.V., Ivanov M.V. Formation of exometabolites during microbial methane oxidation in marine ecosystems. *Microbiology*, 1998, vol. 67, no. 5, pp. 710-717.

21. Ilyaletdinov A.N. Microbiological transformations of metals. Alma-Ata. Science Publ., 1984. 268 p.

22. Derkachev A.N., Obzhirov A.I., Borman G. et al. Authigenic mineral formation in areas of manifestation of cold fluid-gas emanations at the bottom of

the Sea of Okhotsk / Conditions for the formation of bottom sediments and related minerals in the marginal Seas. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2002. Pp. 47-60.

23. Luchsheva L.N., Kononov Yu.I., Obzhirov A.I. Gas hydrate deposits are a real source of mercury in marine ecosystems. *Norwegian Journal of development of the International Science*, 2017, vol. 2, no. 6, pp. 10-14. Available at: ([http://www.njd-iscience.com/NJD\\_6\\_2.pdf](http://www.njd-iscience.com/NJD_6_2.pdf)).

24. Luchsheva L.N., Obzhirov A.I., Kononov Yu.I. Distribution of mercury / Monitoring of methane in the Sea of Okhotsk. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2002. Pp. 95-113.

25. Luchsheva L.N., Obzhirov A.I., Kononov Yu.I. Distribution of mercury / Monitoring of methane in the Sea of Okhotsk. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2002. Pp. 95-113.

26. Lomtev V.L., Nikiforov S.P., Chung Un Kim. Tectonic aspects of Sakhalin crustal seismicity, *Vestnik FEB RAS*, 2007, no. 4, pp. 64-71.

27. Guseva I.S., Arkhipova E.V. Analysis of the system unity of the modern development of the Kuril-Kamchatka island arc and Sakhalin Island based on seismological data. *Advances in Modern Natural Science*, 2019, no 6, pp. 46-50.

28. Khain V.E., Lomize M.G. Geotectonics with the basics of geodynamics. Moscow, Moscow State University Publ., 1995. 480 p.

29. Tamaki K., Honza E. Incipient subduction and obduction along the Eastern margin of the Japan Sea. *Tectonophysics*, 1985, vol. 119, pp. 381-406.

30. *Vulkanian.ru* (2015), The Pacific Plate is in strong motion. Available at: (<http://vulkanian.ru/novosti/tihookeanskaya-plitahoditsya-v-silnom-dvizhenii.html>).

31. UN News, El Niño of 2015 - 2016 has passed its peak, but its effects will still be felt for several months. Available at: (<https://news.un.org/ru/story/2016/02/1280361>).

32. Walker D.A. More evidence indicates link between El Niño and seismicity. *EOS Trans. AGU*, 1995, vol. 76, no. 4, pp. 33-34.

33. Syvorotkin V.L. Deep degassing of the Earth and global catastrophes. Moscow, Geoinformcenter Publ., 2002. 250 p.

34. Shevkunov S.N. Processes for processing gas condensate with high mercury content. Available at: (<http://vesti-gas.ru/sites/default/files/attachments/vgn-1-33-2018-207-215.pdf>).

35. Ilyinsky V.V. Microbiological monitoring of oil pollution of water ecosystems: theory and practice / *Oil pollution: monitoring and rehabilitation of ecosystems*. Moscow, FIAN Publ., 2003. Pp. 4-47.

36. Tikhonov I.N. On induced seismicity on the shelf of Sakhalin Island near the Piltun-Astokhskeye oil and gas condensate field. *Vestnik FEB RAS*, 2010, no. 3, pp. 59-63.

37. Vakhnin S.I. Oil and fish. Available at: (<http://gderyba.net/2014/04/02/%D0%BD%D0%B5%D1%84%D1%82%D1%8C-vs->).