

Метан как важнейший фактор дегазации акваторий

П.В. Люшвин

E-mail: lushvin@mail.ru

В работе показано как кардинально меняются абиотические и биотические характеристики акваторий при массовом поступлении метана и детрита в фотический слой. Обусловлено это как высокой токсичностью метана для большинства промысловых аэробных гидробионтов, гипоксией за счет окисления метана, включая метанотрофию, так и сокращением фотического слоя мелкодисперсным детритом, что обуславливает его дополнительный прогрев. Этим явлениям ранее почти не уделялось внимание в связи с их фрагментарностью и эпизодичностью, их влияние не просматривалось одновременно по абиотическим и биотическим данным. В результате едва ли не каждый сейсмогенный прогрев водной поверхности, сейсмогенное развоздь, масштабная придонная гипоксия и замор гидробионтов ставили в тупик гидрологов и гидробиологов. Особую актуальность их исследование приобрело в прошедшее и текущее десятилетие – максимум вековой цикличности сейсмодегазации на северо-западе Евразийской плиты. В аэрируемых водах при концентрации метана в воде ниже 10^{-4} мг/л, у промысловой биоты нормальное поведение, воспроизводство покрывает естественную убыль. Проблемы у биоты начинаются при возрастании концентрации метана на несколько порядков. При содержании метана 0,1-0,3 мг/л, что характерно в заболоченных акваториях, на реках в весеннее половодье, когда в них поступают воды с пойм, болот и взмучиваются донные илы с болотным газом – метаном, аэробные рыбы поднимаются к поверхности, молодь рыб старается покинуть такие места. С достижением концентрации метана 1 мг/л и выше начинаются нарушения репродуктивных функций у рыб и их массовые заморы, в придонных водах Азова и Каспия вне связи с гидрометеорологическими факторами, возникает масштабная придонная гипоксия, на порядки уменьшаются биомасса промысловых беспозвоночных. Сейсмодегазация приводит и к декадным прогревам холодного фотического слоя. Происходит это за счет взмучивания мелкофракционного детрита, что замутняя фотический слой, способствует его утончению, более интенсивному прогреву. Считается удобным переносить свойства модельного монолитного льда на лед пресных и соленых акваторий, однако при этом делается оговорка, что это неприемлемо в отношении пористого льда. Пористый лед образуется из монолитного в местах массовой дегазации метана. Связано это с подледными скоплениями метана в которых активизируются метанотрофные микроорганизмы, структурно и функционально специализированные на использовании метана в качестве источника углерода и энергии. Энергия, выделяющаяся при бактериальном окислении метана, превращает монолитный лед в пористый. При торошении такого льда на его поверхности оказываются серые продукты метанотрофии и детрит (поднятый пузырьками газов), что сокращая альбедо, способствуют инсоляционному утончению льда и образованию замутненных детритом теплых разводий. На максимуме вековой сейсмической активности на северо-западе Евразийской плиты, когда в богатой углеводородами Восточной Арктике растаял дрейфующий многолетний лед, в европейских морях фрагментарно стала уменьшаться биомасса промысловых гидробионтов. Дегазационные вспышки концентрации метана в приземной атмосфере и дегазационный прогрев поверхности, сейсмогенные разводья наблюдаемы по оперативным данным ДЗЗ с ИСЗ.

Ключевые слова: метан, землетрясения, дегазация, придонная гипоксия, гидробионты.

Введение

На начальном этапе развития промысловой гидробиологии и гидрометеорологии выявлялись в основном фоновые абиотические и биотические характеристики акваторий, океан представлялся неисчерпаемым, изучение почти всех редко встречающихся аномалий, как минимум, откладывалось. Негативных массовых явлений для гидробионтов почти не отмечалось, за исключением весеннего половодья и сейсмострессов, когда рыбы начинали вести себя возбужденно, вплоть до выбрасываний на берег, раскосячиваний, уходов из традиционных мест обитания в нехарактерные для них условия по температуре, солености или глубине, массовых заморов. Парадоксальным воспринимал-

ся пористый лед в море, что, подобно льду на болотах, не выдерживал расчетных нагрузок. Генезис этих явлений был не ясен, пока не начали определять содержание метана в воде, соответствующее поведение гидробионтов и лед. Оказалось, что в открытых акваториях концентрация метана в воде ниже 5 ppm, что не критично для гидробионтов и не превращает монолитный лед в пористый. В весеннее половодье, когда в водоемы массово поступают воды с пойм, болот и взмученные донные илы богатые болотным газом, рыбы, как бы под воздействием наркотиков, возбуждены. Когда концентрация метана достигает 0,1–0,3 мг/л, что характерно при сейсмодегазации, молодь рыб начинает покидать эти места. При дальнейшем росте концентрации начинаются массовые заморы; активизируются метанотрофные микроорганизмы, структурно и функционально специализированные на использовании метана в качестве источника углерода и энергии. Энергия, выделяющаяся при бактериальном окислении, превращает монолитный лед в пористый. При торошении такого льда на его поверхности оказываются продукты метанотрофии и детрит (поднятый пузырьками газов), что сокращая альбедо, способствуют инсоляционному утончению льда и образованию разводий. Особую актуальность учет этих явлений приобрел на рубеже XX–XXI веков, максимуме цикличности вековой сейсмической деятельности на западе евразийской плиты, когда в богатой углеводородами Восточной Арктике растаял дрейфующий многолетний лед, в Азове и Каспии, вне явной связи с гидрометеорологическими факторами, участилась придонная гипоксия, в европейских морях непредсказуемо фрагментарно стала уменьшаться биомасса промысловых гидробионтов.

Объем дегазации в сейсмоспокойные годы в Каспии и Черное море $\approx 0,4$ млрд.м³. При активизации подводного вулканизма образуются острова, из воды неделями бьют фонтаны огня. За одно извержение эмиссия газов составляет от 20 до 500 млн.м³. Действующих вулканов в Каспии более сотни. Свыше 80% состава газов составляет метан. Через охотоморские воды в атмосферу поступает ≥ 1 млн.т. метана в год (Люшвин, 2008).

Лед

В традиционной гидрометеорологии и физике льда при анализе и прогнозе развития ледового покрова учитывают только абиотические факторы - градусо-дни мороза, чем определяется толщина и прочность монолитного льда, соленость воды и дрейф. Однако имеются ситуации, когда, несмотря на длительный мороз и отсутствие дрейфа, лед порист и не выдерживает расчетных нагрузок. Причина в метанотрофных микроорганизмах,

структурно и функционально специализированных на использовании метана в качестве источника углерода и энергии (Гальченко, 2001; Леин, Иванов, 2001). Энергия, выделяющаяся при бактериальном окислении метана, превращает монолитный лед в пористый с проталинами. Массовая дегазация метана происходит в заболоченных акваториях и при землетрясениях в местах скоплений углеводородов. Значимое доказательство скоплений метана подо льдом – фонтаны огня из лунок в реках Селенга и Лена, в море Лаптевых и у Аляски. На северо-востоке Баренцева моря в поверхностных водах Русской Гавани концентрация метана на несколько порядков выше фоновой (рис. 1) (Люшвин и др., 2010). Именно здесь в отрыве на 100÷300 км от чистой воды Баренцева моря, как правило, наблюдаются разводья и полыньи.

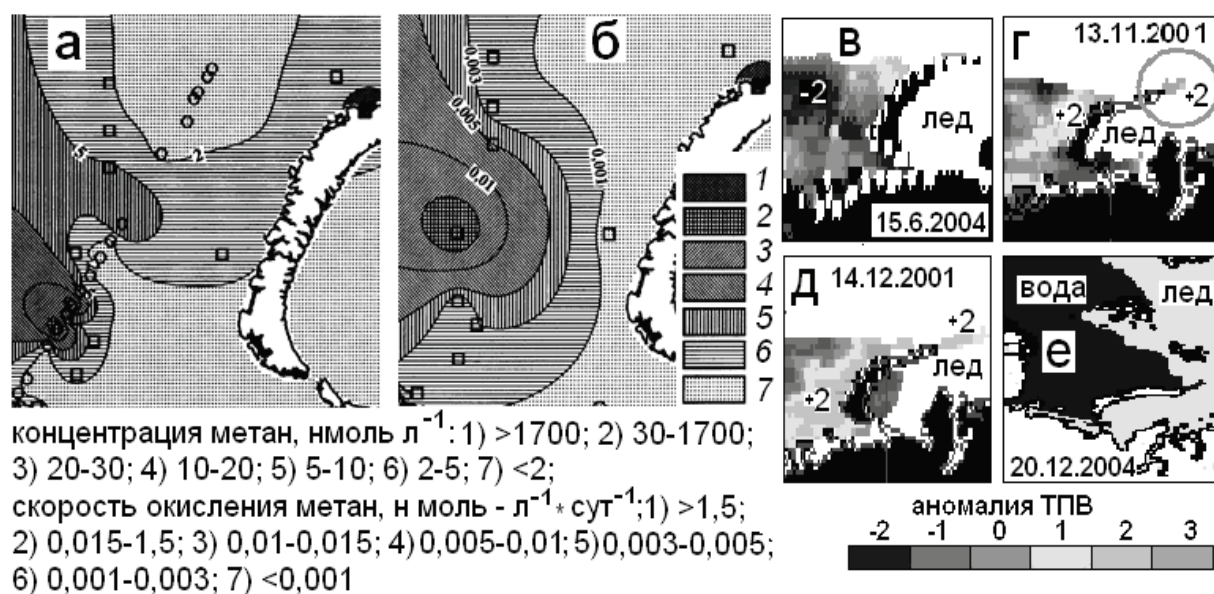


Рис. 1. Распределение концентрации метана (а) и скорости микробного окисления метана в поверхностном слое водной толщи Баренцева моря (б). Лед в Баренцевом и Карском морях. Аномалия ТПВ (в-е)

При наличии солнечной инсоляции у очагов землетрясений в дрейфующем льде образуются обширные длительные разводья. Их образованию способствует торошение пористого льда, образовавшегося в результате метанотрофии, появление на его поверхности серых продуктов метанотрофии и детрита (поднятого пузырьками газов), что сокращая альбедо, способствуют инсоляционному таянию. Живучесть разводий поддерживает дегазационный детрит, что утончая фотический слой, благоприятствует его дополнительному инсоляционному прогреву еще до 3°C (создаются условия подобные мороженому в кофе). Например, образование разводий у очагов землетрясений у южного и восточного берегов о-ва Сахалин (рис. 2). Аналогичен сейсмогенезис разводий на севере моря Лаптевых (рис. 3) и в Южном океане (рис. 4).

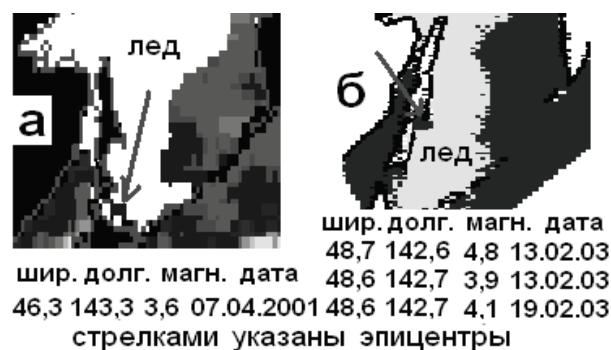


Рис. 2. Лед и эпицентры землетрясений у о-ва Сахалин 10.04.2001 г. (а), 01.03.2003 г. (б)

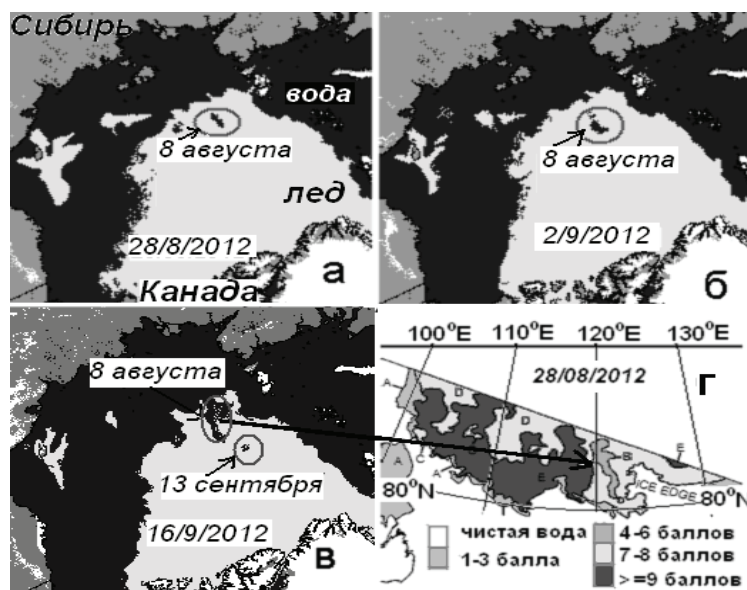


Рис. 3. Сейсмогенные разводя в ледовом покрове Арктики (в эллипсах под стрелками даты землетрясений) на спутниковых снимках 28/8, 02/09 и 16/9 2012 г. (а-в). Ледовая карта от 28/8 2012 г. с сейсмогенным разводьем (г)

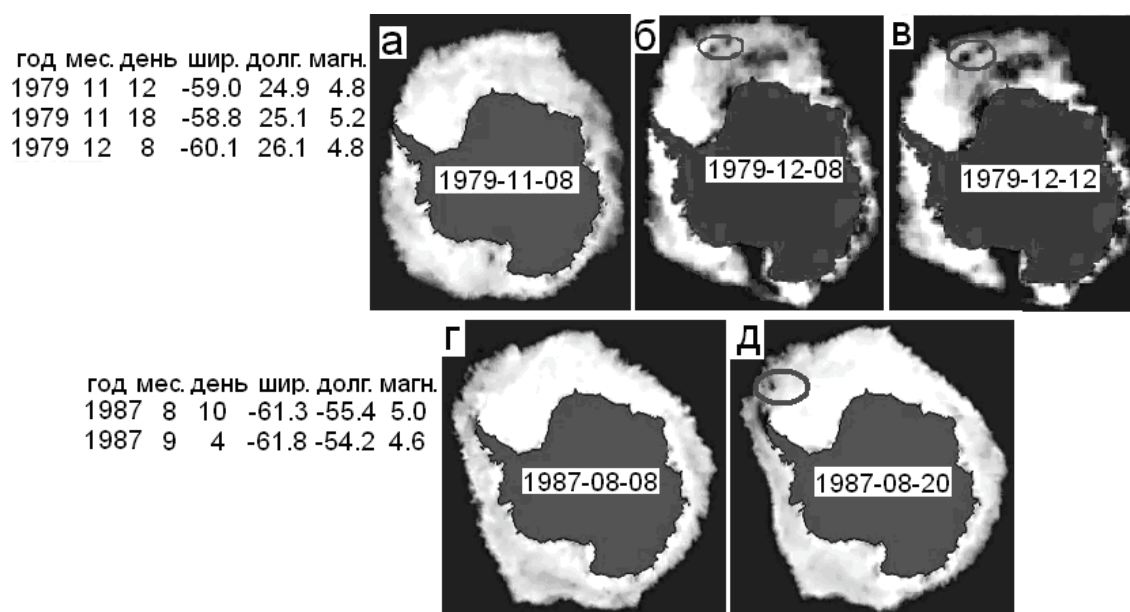


Рис. 4. Сейсмогенные разводя в ледовом покрове у Антарктиды (справа – сейсмические данные, в эллипсах - сейсмогенные разводя на спутниковых снимках)

Масштабное сокращение площади льда при активизации землетрясений

Массовая сейсмогенная метанотрофия и взмученный детрит способствуют таянию льда в целых регионах. При активизации землетрясений на юге Охотского моря с февраля по начало мая юго-восточный берег о. Сахалин очищается ото льда в конце мая - начале июня (рис. 5). В сейсмоспокойные весны лед задерживается до конца июня. Величина коэффициента линейной корреляции между числом землетрясений и датами очищения региона ото льда составляет $> -0,73$. Аналогично и в Арктике – сокращение за 30 лет к осени площади дрейфующего льда на треть и в разы площади многолетнего льда на фоне тройного учащения числа землетрясений. Некоторые несоответствия противофазных тенденций обусловлены ограничениями каталогов землетрясений, где содержится информация о событиях с магнитудами свыше $3\div 4$. К тому же сейсмическая активность однозначно не определяет дегазацию метана, подъем детрита и развитие льда, а лишь способствуют таянию местного льда.

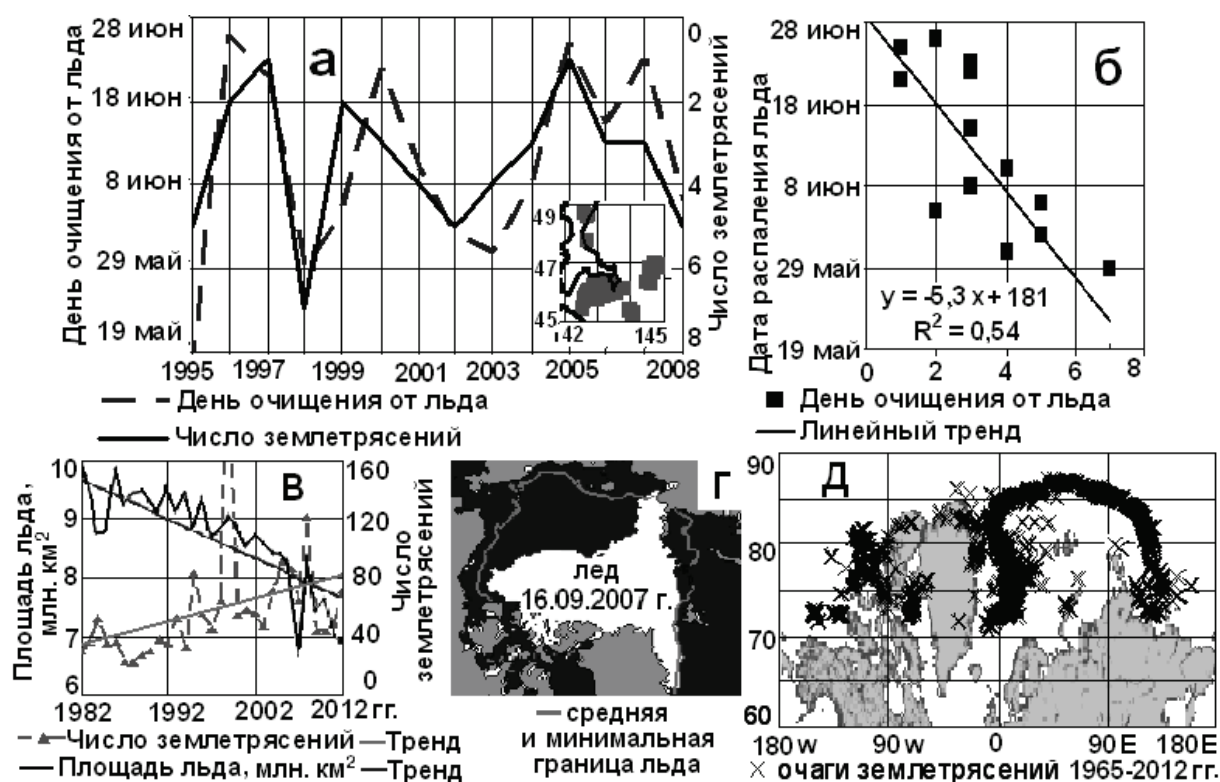


Рис. 5. Число землетрясений и даты очищения от льда восточного берега о. Сахалин (а,б). На врезке эпицентры землетрясений. Межгодовой ход минимальной площади льда и числа землетрясений в Арктике (в), среднее многолетнее и минимальная граница льда – 16.09.2007 г. (г). Эпицентры землетрясений с 1965 г. по 2012 г. (д)

Сокращение толщины льда в Арктике

На рубеже 70-х - 80-х годов XX века в Арктике был экстремально толстый лед (рис. 6). К 2002-2012 гг. толщина пакового льда и льда, сохранившегося с прошлого года, уменьшилась на $\approx 40\%$. Произошло это на фоне потепления арктического воздуха на $1\div 2^\circ\text{C}$, как в полярной атмосфере в целом, так и регионально на м. Барроу и в п. Тикси (рис. 7). Однако фрагментарные ледовые и тепловые аномалии не совпадали. В сейсмический рубеж 70-80-х годов XX века было утолщение льда. Похолодание пришло позже в 1982-1987 гг. Сокращение площади и толщины льда в 90-е годы XX века было на фоне активизации землетрясений и отсутствия тренда к потеплению. Сейсмогенные метанотрофные процессы к началу XXI века привели к тому, что ни локальное охлаждение, ни спад числа землетрясений в отдельные годы на рубеже первого и второго десятилетий XXI века немедленно не заморозили «теплую» Арктику. Окончание глобального потепления, что шло с Арктики, начнется после 2015-2017 гг., когда вслед за прохождением максимума вековой цикличности землетрясений на севере евразийской плиты начнет восстанавливаться многолетний лед (рис. 8) (Люшвин, 2013).

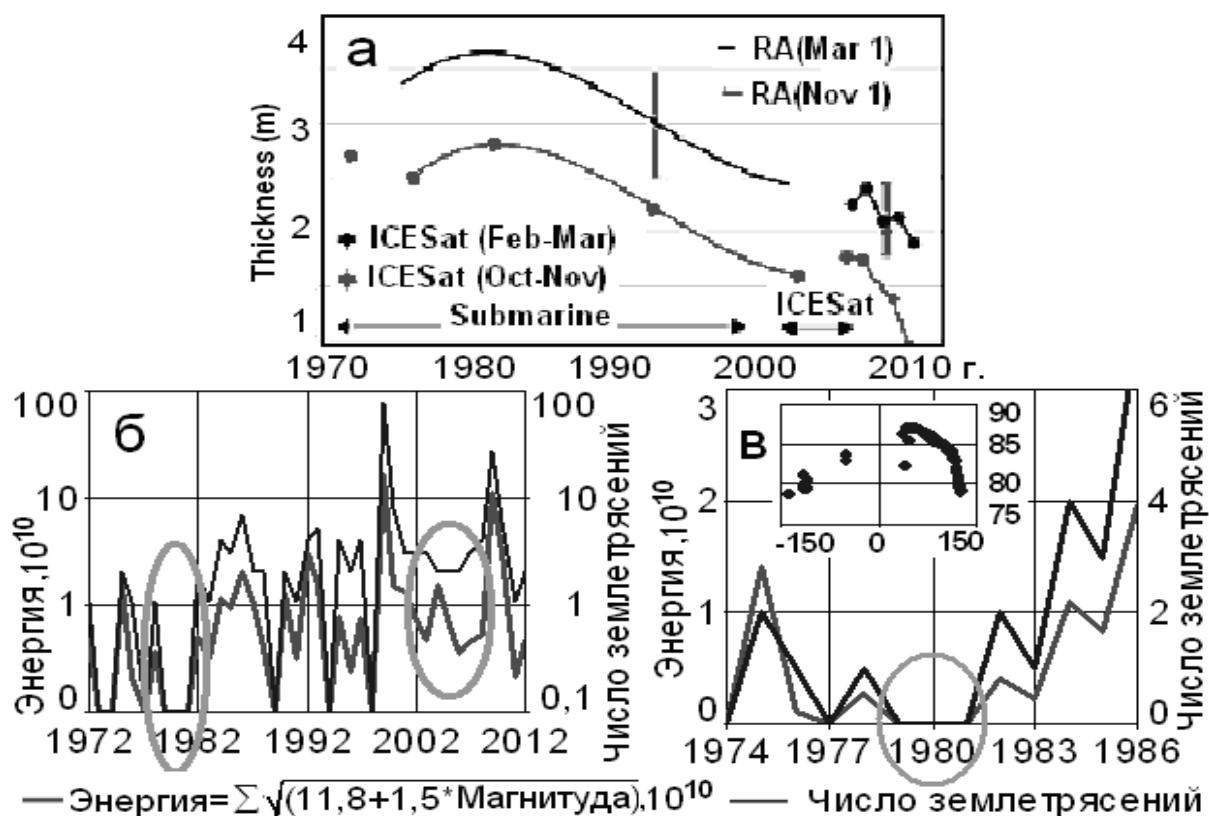


Рис. 6. Толщина весеннего и осеннего льда (а).

Энергия и число учтенных землетрясений за 1972 - 2012 гг., 1974 - 1986 гг. (б, в).

На врезке эпицентры землетрясений за 1972 - 2012 гг.

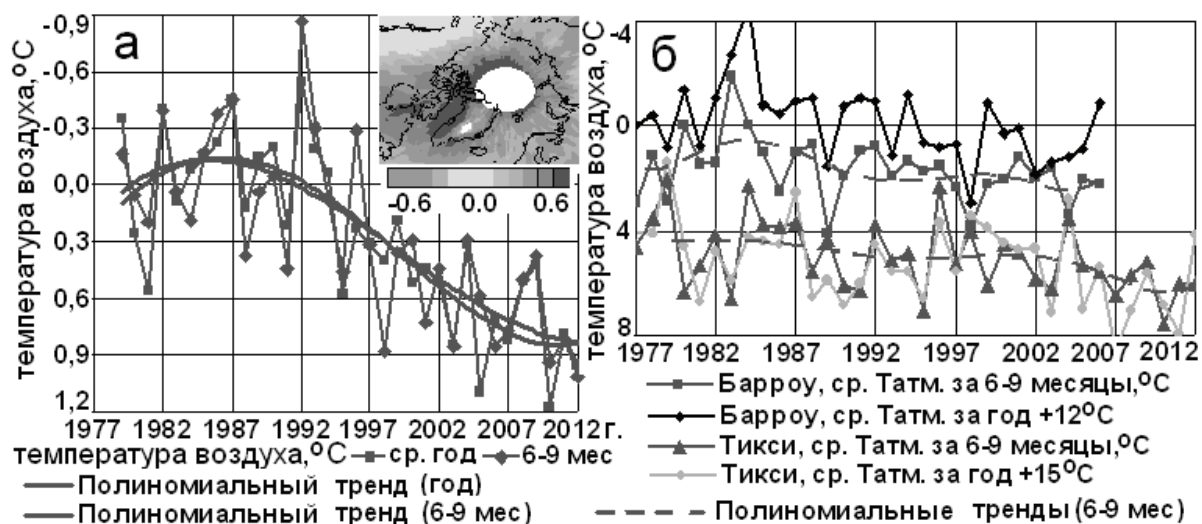


Рис. 7. Аномалии температуры воздуха в нижней тропосфере в полярных широтах за год и за 6-9 месяцы. На врезке картированный тренд температуры (а). Средняя температура воздуха за год и за 6-9 мес. на м. Барроу и в п. Тикси (б)

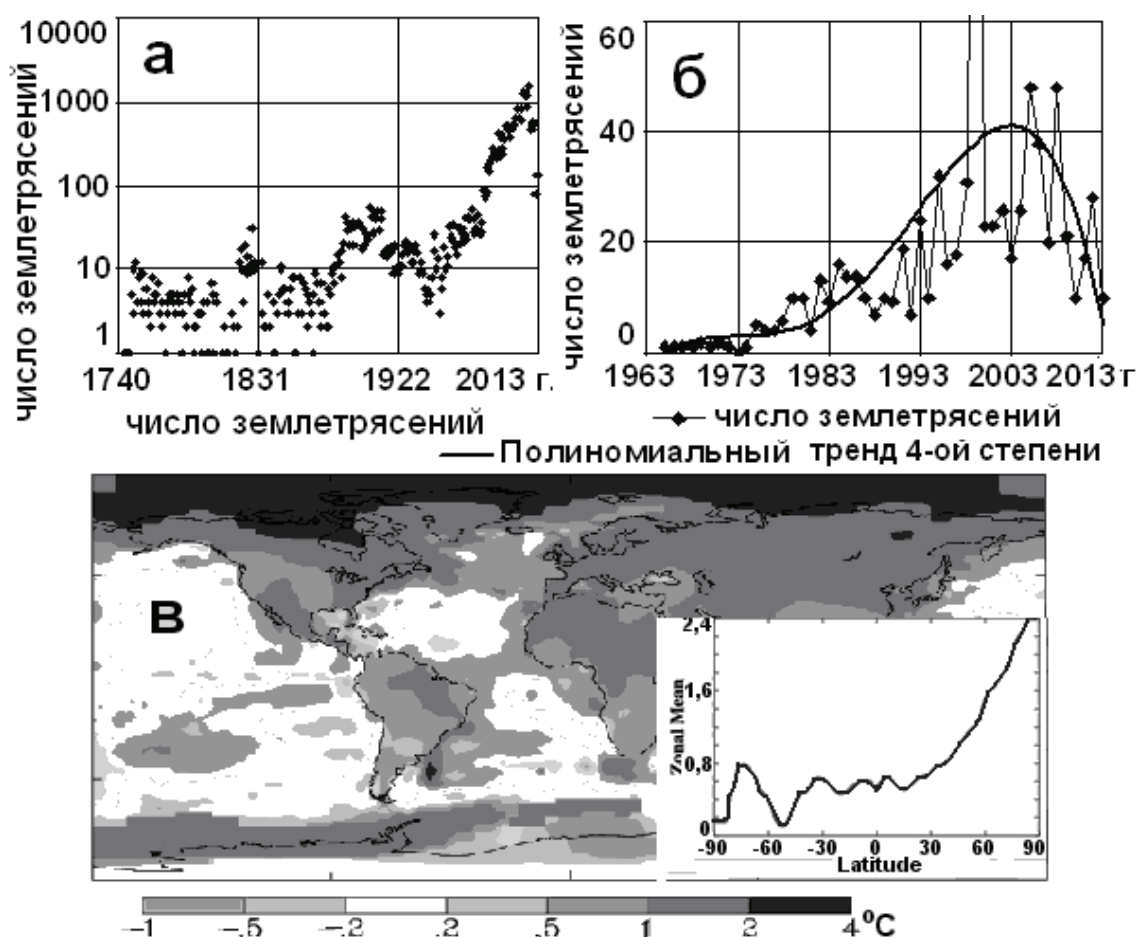


Рис. 8. Временной ход числа землетрясений на севере Евразии (а) и в мористой Арктике (б). Широтный ход приземной температуры воздуха с 1960 по 2011 гг. (в)

Метаногенная придонная гипоксия и её последствия

Масштабную эпизодическую придонную гипоксию в Азове и Каспии свыше 40 лет пытались связать с изменениями стока рек, ледяным покровом и другими гидрометеорологическими факторами. Стабильных зависимостей не обнаружили, как не получили устойчивых связей перечисленных характеристик с развитием бентоса и бентофагов (Люшин, Карпинский, 2009). При этом ни как не учитывали концентрацию метана, поскольку в воде содержание метана, как правило, не превышает 10^{-4} мг/л, а в мягких грунтах не достигает ПДК (10^{-2} мг/л), что не критично для гидробионтов. Однако в грунтах заболоченных акваторий, над скоплениями углеводородов, у очагов землетрясений и активных разломов земной коры концентрация метана достигает 0,1–10 мг/л, например, над газовым месторождением в центре волжского взморья и в грунтах основного рукава Бахтемир после весеннего паводка. Именно к этим местам приурочена гипоксия и низкая биомасса зообентоса (рис. 9) (Катунин и др., 2006).

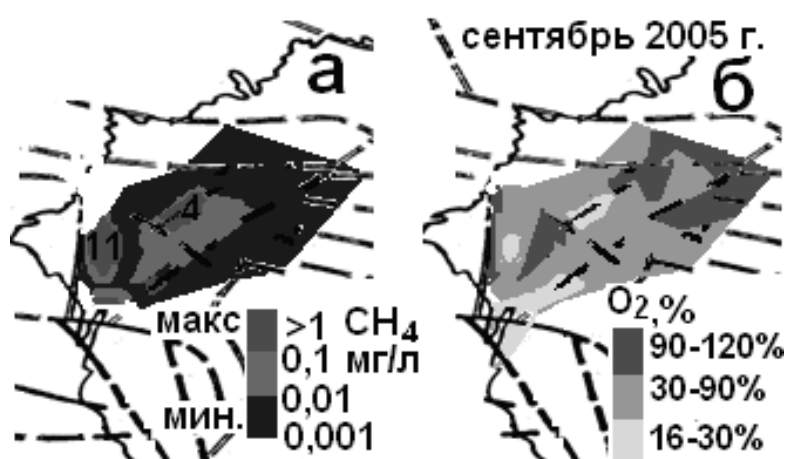


Рис. 9. Содержание метана в донных осадках Северного Каспия на схеме разломов земной коры (а), относительное содержание O_2 в воде у дна в сентябре 2005 г. (б)

Начиная с 50-х годов XX века тенденция хода величин биомассы бентоса в морской части Северного Каспия (над разломами земной коры, тянущимися от сейсмоактивного Терского берега к Уральской Бороздине) следовала в противофазе с числом и энергией терских землетрясений (рис. 10). В сейсмоактивные годы межгодовые сокращения биомассы моллюсков доходили до 90%, червей - нереиса – 30-70%, развивалась и придонная гипоксия. Синхронизация развития гипоксии, спадов биомассы бентоса и активизации терско-сулакских землетрясений наблюдалась и ранее в 1934 г. и в 1938 г., когда содержание кислорода у дна снижалось до 30%. В годы резких сейсмострессовых снижений биомассы бентоса пищевые отношения между бентофагами обострялись, что влекло за собой снижение темпа их роста. В сейсмострессовые 1954–1956 гг. у осетров и

воблы в Северном Каспии в желудках было до 15-20% растений и грунта, тогда как в сейсмостойкие годы в 2-3 раза меньше. В 1957-1958 гг. нагрузка на бентос снизилась, произошло это на фоне ослабления сейсмострессовых нагрузок, а не за счет сокращения бентофагов.

Особенно катастрофичными для гидробионтов Северного Каспия были последствия почти двух десятков (в основном майских) землетрясений в Дагестане в 1988 г., когда насыщение воды кислородом у дна снижалось до 9%. На глубинах свыше 10 м осталось менее 2% животных по сравнению с предшествующими и последующими годами. Это не было обусловлено бентофагами-осетровыми, поскольку их основные скопления в этом году остались на юге моря. На мелководье был разнонаправленный ход биомасс групп бентоса (влияние ледовых, паводковых и сгонно-нагонных явлений). В сейсмостойком 1989 г. на фоне хорошей придонной аэрации биомасса всех групп беспозвоночного бентоса поднялась до уровня прошлых лет. Осетровые вернулись в Северный Каспий, концентрации севрюги оказались самыми высокими за последние 6 лет. Массовые проблемы с воспроизводством среди нижеволжских рыб отмечаются в основном только у воблы-бентофага, что более резистентна к солёности, чем лещ, судак и сазан, и кормится над мористыми активными разломами земной коры.



Рис. 10. Число терских землетрясений, биомасса бентосных организмов в Северном Каспии (а). Коэффициент использования бентоса в Северном Каспии (б). Сопоставления числа терских землетрясений с биомассой моллюсков и нереиса на глубине свыше 10 м (в)

Обычно резкие снижения биомассы зообентоса в Азове пытались связать с изменениями температуры и солёности воды, речным стоком, интенсивностью ветрового перемешивания. При разнонаправленности тенденций, искали объяснения в придонной гипоксии, развивающейся при ослаблении перемешивания, часто в сочетании с повышением температуры воды. Такой подход традиционен при интерпретации фрагментарных данных, когда часть резких снижений биомассы совпадает с масштабным развитием гипок-

сии, хотя известно, что многие виды бентоса выживают даже при длительной гипоксии. Однако при учете исключенных из анализа материалов, либо при удлинении рядов оказывается, что совпадения межгодовых и межсезонных изменений биомассы с речным стоком или температурой воды в целом случайны. К тому же развитие гипоксии не всегда обусловлено ослаблением ветрового перемешивания и потеплением, по крайней мере, при годовичном осреднении. Например, гипоксия в 1963 г. наблюдалась при охлаждении моря, а в 1966, 1988 и 1993 гг. при потеплении. В 1969 г. гипоксия была в год экстремально интенсивного ветрового перемешивания. Аналогичные результаты получаются для сезонных и более коротких периодов осреднения (Гаргопа, 2006). Противоречия устраняются, когда для анализа вариаций биомассы бентоса и гипоксии привлекаются данные по сейсмической деятельности. Оказывается, что в годы активизации землетрясений угнетенность бентоса и площадь гипоксии в море максимальны. Даже единичные зимние землетрясения, когда активность бентоса понижена, приводят к снижению биомассы. Межгодовые снижения биомассы, что не «попали» под азово-таманские землетрясения – последствия кавказских землетрясений. В сейсмоспокойные годы биомасса бентоса в Азовском море увеличивается от апреля к октябрю вдвое. В сейсмоактивные годы прирост минимален, для середины лета характерен даже локальный минимум за счет выедания бентоса бентофагами (рис. 11).

Работа выполнялась при поддержке РФФИ (грант РФФИ № 12-07-00654-а).



Рис. 11. Сопоставление биомассы бентоса в Азовском море в октябре с числом землетрясений, площадь зон гипоксии в море (а,б), среднее изменение биомассы бентоса с апреля по октябрь в сейсмоспокойные и сейсмострессовые годы (в)

Литература

1. Люшвин П.В. Стрессовые и комфортные условия развития рыбных популяций // Рыбное хозяйство. 2008. № 6. С. 42-50.
2. Гальченко В.Ф. Метанотрофные бактерии. М.: ГЕОС, 2001. 500 с.
3. Леин А.Ю., Иванов М.В. Биохимический цикл метана в океане // М: Наука, 2009. 576 с.
4. Люшвин П.В., Коршенко А.Н., Катунин Д.Н., Станичный С.В. Активная роль метана в распределении гидрохимических характеристик вод окраинных морей // Рыбное хозяйство. 2010. №4. С.57-60.
5. Люшвин П. В. Метанотрофное таяние Восточносибирской Арктики // Электронное научное издание Альманах Пространство и время. 2013. Том 4. Выпуск 1.
6. Люшвин П.В., Карпинский М.Г. Причины резких сокращений биомасс зообентоса и их последствия // Рыбное хозяйство. 2009. №5. С.65-69.
7. Катунин Д.Н., Егоров С.Н., Кашин Д.В., Хрипунов И.А., Галушкина Н.В., Кравченко Е.А., Азаренко А.В., Гуляев В.Ю. Особенности гидролого-гидрохимического режима нижнего течения р. Волги в 2005 г.// Рыбохозяйственные исследования на Каспии. Результаты НИР за 2005 год, Астрахань: КаспНИРХ, 2006. С.15-22.
8. Гаргона Ю.М. Современное состояние и тенденции изменения гидрометеорологических условий формирования биопродуктивности Азовского моря // Вопросы промысловой океанологии. 2006. Вып. 3. С. 216-240.

Methane as the most important factor of water bodies degassing

P.V. Lyushvin

E-mail: lushvin@mail.ru

In the work, it is shown how cardinally abiotic and biotic characteristics of water areas change at mass intake of methane and detritus into the photic layer. It is caused by both high toxicity of methane for the majority of trade hydrobionts, hypoxia due to methane oxidation, including methanotrophy, and reduction of the photic layer due to fine detritus that causes its additional warming up. Earlier, these phenomena were out of the focus of researchers because of their fragmentariness and rare occurrence, their impact could not be traced via abiotic and biotic data at the same time. As a result, almost each case of seismogenic warming up of water surface, seismogenic icelead, large-scale benthonic hypoxia and unexpected mortality of hydrobionts puzzled hydrologists and hydrobiologists. Their research gained special relevance in the last and current decades – a maximum of century recurrence of seismodegassing in the northwest of the Eurasian Plate. Methane concentration degassing outbursts in the near-surface atmosphere and degassing warming up of the surface, seismogenic ice leads can be observed by satellite sensors of the Earth.

Keywords: methane, earthquakes, degassing, benthonic hypoxia, hydrobionts.

References

1. Lyushvin P.V. Stressovye i komfortnye usloviya razvitiya rybnykh populyatsii (Stressful and comfortable conditions of development of fish populations), *Rybnoe khozyaistvo*, 2008, No. 6, pp. 42-50.
2. Gal'chenko V.F. *Metanotrofnye bakterii* (Methanotrophic bacteria), Moscow: GEOS, 2001, 500 p.
3. Lein A.Yu., Ivanov M.V. *Biokhimicheskii tsikl metana v okeane* (Biochemical cycle of methane at the ocean), Moscow: Nauka, 2009, 576 p.
4. Lyushvin P.V., Korshenko A.N., Katunin D.N., Stanichnyi S.V. Aktivnaya rol' metana v raspredelenii gidrokhimicheskikh kharakteristik vod okrainnykh morei (Active role of methane in distribution of hydrochemical characteristics of waters of the suburban seas), *Rybnoe khozyaistvo*, 2010, No. 4, pp. 57-60.
5. Lyushvin P.V. Metanotrofnoe tayanie Vostochnosibirskoi Arktiki (Methanotrophic thawing of the East Siberian Arctic), *Al'manakh Prostranstvo i vremya*, 2013, Vol. 4, No. 1, available at: <http://e-almanac.space-time.ru/assets/files/Tom%204%20Vip%201/rubr4-st1-lyushvinpv-2013.pdf>.

6. Lyushvin P.V., Karpinskii M.G. Prichiny rezkikh sokrashchenii biomass zoobentosa i ikh posledstviya (Reasons of sharp reductions of a biomass of a zoobenthos and their consequence), *Rybnoe khozyaistvo*, 2009, No. 5, pp. 65-69.
7. Katunin D.N., Egorov S.N., Kashin D.V., Khripunov I.A., Galushkina N.V., Kravchenko E.A., Azarenko A.V., Gulyaev V.Yu., Osobennosti gidrologo-gidrokhimicheskogo rezhima nizhnego techeniya r. Volgi v 2005 g. (Peculiarities of hydrologic and hydrochemical regime of river Volga lower current in 2005), *Rybokhozyaistvennye issledovaniya na Kaspii. Rezul'taty NIR za 2005 god*, Astrakhan': KaspNIRKh, 2006. pp. 15-22, 435 p.
8. Gargopa Yu.M. Sovremennoe sostoyanie i tendentsii izmeneniya gidrometeorologicheskikh uslovii formirovaniya bioproduktivnosti Azovskogo morya (Current state and tendencies of change of hydrometeorological formation conditions of bioproductivity of the Azov Sea), *Voprosy promyslovoi okeanologii*, 2006, No. 3, pp. 216-240.