© Путанс В.А., Мерклин Л.Р., Иванов А.Ю., Амбросимов А.К., 2019, Океанологические исследования, 2019, Том 47, № 5, С. 98–115

УДК 551 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(5).8

ПРОЯВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННОЙ ФЛЮИДОДИНАМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА СЕВЕРНОМ КАСПИИ (ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ)

Путанс В.А., Мерклин Л.Р., Иванов А.Ю., Амбросимов А.К.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36, e–mail: vitapu@mail.ru, lmerklin@mail.ru, ivanoff@ocean.ru, ambrosimov@ocean.ru

Статья поступила в редакцию 31.05.2019, одобрена к печати 13.12.2019

В статье проведен анализ геолого-геофизических данных, собранных в последних экспедициях Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН), фондовых данных инженерно-геологических исследований и данных дистанционного зондирования, интерпретация которых впервые позволила говорить о современном усилении флюидодинамической активности Северного Каспия. На основе обобщения материалов предыдущих изысканий в разрезе Каспия по признакам ритмостратиграфии выделяются седиментационные комплексы. Признаки свободного газа фиксируются в большинстве сейсмостратиграфических комплексов. Гидролокация бокового обзора показала наличие довольно большого количества донных отражающих объектов. Одна из примечательных особенностей геологического строения недр Северного и Среднего Каспия – множество трубообразных вертикальных тел, которые были обнаружены в экспедициях ИО РАН с помощью высокоразрешающей сейсморазведки. Трубообразные или колодцевидные образования уходят далеко за пределы сейсмозаписей, в недра; указанные сейсмические аномалии и донные микроформы могут рассматриваться в качестве признаков вертикальной миграции газа и воды через толщу грунтов и их поступления в водную толщу с образованием газовых грифонов. Космические снимки показывают большое количество сликов или нефтепроявлений на поверхности моря, причем некоторые из них присутствуют постоянно в одних и тех же местах, что подтверждает гипотезу о дренировании флюидов из морского дна. Впервые показана связь структур, обнаруженных на дне, с грифонной активностью Северного Каспия, выявленной по данным космической радиолокации (пространственно-временной группировке пятен-сликов) 2011–2019 гг.

Ключевые слова: Каспийское море, сейсмоакустика, сейсмостратиграфия, газонасыщенные осадки, флюидодинамика, нефтяные пятна

Введение

Каспийское море – уникальный природный объект, которому присущи многие неординарные явления, например, постоянное изменение уровня моря, аномалии волнового поля, аномалии гидрохимических характеристик и температуры в придонном слое. Всё это даёт большой простор для научных исследований. Актуальность изучения причин естественных нефтепроявлений в Каспии и их масштабов очевидна: от решения этого вопроса зависит развязка сложнейшего клубка научных, а также практических, ресурсных, социально-экономических и природоохран-

ных проблем Каспийского региона. Это напрямую касается освоения нефтегазовых месторождений, а также месторождений, уже вовлеченных в добычу. В настоящей статье проведен совместный анализ геолого-геофизических данных, собранных в последних экспедициях ИО РАН, и данных дистанционного зондирования, интерпретация которых впервые позволила говорить о современном усилении флюидодинамической активности Северного Каспия.

Геологическая обстановка

Северный Каспий рассматривается обычно как затопленная часть Прикаспийской низменности. Под водами Северного Каспия скрыты южный борт Прикаспийской впадины древней Восточно-Европейской платформы и окраины двух молодых плит, Туранской и Скифской, строение которых исследуется геофизическими методами с 20-х годов минувшего столетия (Глумов и др., 2004), которое в сочетании с бурением ряда скважин привело к открытию и разработке нескольких морских месторождений нефти и газа, что повысило риск антропогенного загрязнения моря (Амбросимов, Голубов, 2014).

В современном облике дна Северного Каспия и его осадков отчетливо запечатлена история многократных перестроек гидрографической сети и трансгрессивно-регрессивных циклов колебаний уровня моря в неоген-четвертичное время, в ряду которых замыкающую роль сыграли стадии последней новокаспийской трансгрессии, определившей нынешнее сложное сочетание рельефообразующих процессов осадконакопления и донной эрозии. Новейшую впадину Каспийского моря почти повсеместно выстилают плиоцен-четвертичные отложения, которые отличаются чрезвычайно пестрым фациальным составом и обособлены в виде самостоятельного структурного этажа, который наложен с резким угловым и азимутальным несогласием на разновозрастные структурные этажи древней Восточно-Европейской платформы, молодой Скифско-Туранской плиты и Кавказ-Копетдагского сегмента области альпийской складчатости. Грунтовой массив представляет собой горизонтально слоистую толщу, на востоке района расчлененную в верхней части погребенными речными врезами и палеоложбинами. На основе обобщения материалов предыдущих изысканий в разрезе Каспия по признакам ритмостратиграфии выделяются седиментационные комплексы (СК) (табл. 1).

Ритмостратиграфические комплексы достаточно уверенно выделяются на сейсмоакустических записях как на Северном, так и на Среднем Каспии. С геодинамической точки зрения, Средний Каспий представляет собой контрастное сочетание горных сооружений. Для региона характерна довольно высокая сейсмичность, интенсивное прогибание здесь началось в конце плиоцена и продолжается до сих пор, не компенсируясь при этом осадконакоплением (Иванова, Трифонов, 2002).

Таблица 1. Комплексы и периоды плейстоцена Каспия. Возраст по (Каплин, Селиванов, 1999)

Седиментационный комплекс	Период	Возраст, тыс. лет
Новокаспийский	новокаспийская трансгрессия	7–0
Мангышлакский	комплекс отложений, накапливающихся за береговой чертой в период мангышлакской регрессии	7–10 Мангышлакская регрессия
Хвалынский	комплексы отложений, сформировавшиеся в период повышения и последующего снижения уровня моря в соответствующий период	9–11 (позднехвалынская трансгресссия) 13–30 (раннехвалынская тансгрессия)
Верхнехазарский		80–130 (позднехазарская трансгресссия)
Нижнехазарский		150–300 (ранне хазарская трансгресссия)

Одна из примечательных особенностей геологического строения недр Северного и Среднего Каспия – множество трубообразных вертикальных тел, которые были обнаружены в экспедициях ИО РАН с помощью высокоразрешающей сейсморазведки (данные ГП «Шельф», Голубов, Исмагилов, 2003). Совместное использование методов исследования общей глубинной точки и однократного непрерывного сейсмоакустического профилирования показало, что эти тела имеют диаметр в плане от десятков до первых сотен метров, пронизывают осадочный чехол на глубину более 2000 м, то есть уходят далеко за пределы записи, в недра. Также при проведении инженерно-геологических исследований на сейсмоакустических записях над выделяющимися горизонтальными амплитудными аномалиями и по их обрамлению фиксируются столбчатые аномалии, представляющие серию следующих друг за другом дуг дифрагированных волн. Такие столбчатые образования разных уровней достигают поверхности дна. В водной толще отмечаются гребневидные аномалии, аналогичные тем, что фиксируется в ряде морей в местах истечения газа, а на дне изолированные микровозвышения (фондовые данные инженерно-геологических работ). Указанные сейсмические аномалии и донные микроформы могут рассматриваться в качестве признаков вертикальной миграции газа через толщу грунтов и поступления его в водную толщу с образованием газовых грифонов. При исследовании Среднего Каспия были обнаружены обширные провинции на дне моря, насыщенные такими колодцами с аномальными характеристиками донных осадков и придонной воды (Амбросимов, Верховская, 2012). Сами эти образования вызваны микросейсмичностью, которая взаимодействует с высоконапорными флюидами и газами, которые скопились под дном моря. Совместное использование методов общей глубинной точки и одноканального непрерывного сейсмоакустического профилирования показало, что «трубы» имеют диаметр от десятков до первых сотен метров, пронизывают осадочный чехол на глубину более 2000 м, уходят корнями в доюрское основание и обладают признаками инъективных дислокаций (Голубов, Исмагилов, 2003). Секущие контакты со слоями донных осадков ука-

зывают на современную геологическую активность трубообразных тел, характер которой, однако, оставался неясным до применения методов геохимии, гидрогеологии, геодинамики, гидробиологии и т.д. Радиолокационные изображения (РЛИ), полученные над Северным и Средним Каспием, показывают большое количество сликов или нефтепроявлений на поверхности моря, причем некоторые из них присутствуют постоянно в одних и тех же местах, что подтверждает гипотезу о дренировании флюидов из морского дна.

Методика исследований

Сейсмоакустика – направление малоглубинной сейсмики, в котором используются акустические волны на более высоких частотах (килогерцы), чем в «большой сейсмике» (десятки–сотни герц). Сейсмоакустический временной разрез даёт информацию только о самой верхней части осадочной толщи (не глубже 150 м под уровнем дна), но при этом вертикальное разрешение увеличивается до первых метров, а у параметрического профилографа до десятков сантиметров. Сейсмоакустические данные, использованные в исследовании, получены с помощью:

– системы непрерывного сейсмоакустического профилирования «Геонт-Шельф», источник Спаркер (300 Гц), одноканальная коса;

– «SES-2000-standard», ультравысокоразрешающий параметрический профилограф на бортовой штанге (несущая частота 100 кГц, разностная частота 8–15 кГц и 3–7кГц;

– CHIRP-II – высокоразрешающий буксируемый ЛЧМ профилограф (2–7 кГц);

– гидролокатор бокового обзора (ГБО) 450 кГц STARFISH.

Обработка сейсмоакустических данных осуществлялась в специализированных программных пакетах RadExPro 2012.3, ISE 3.2 и ChirpII. Для интерпретации применялся программный пакет Kingdom Suite 2d/3d, карты строились в программе Surfer 13.

Отбор геологических проб осуществлялся гравитационным пробоотборником с диаметром 15 см длиной 4 м, для отбора проб с поверхности (0–5 см) использовался малый пневматический дночерпатель. Также использованы фондовые материалы по инженерно-геологическим скважинам глубиной до 80 м.

Для оценки гидрофизического состояния водной среды в районах выходов флюидных колодцев проводился сбор информации с помощью доплеровского акустического измерителя течений SBE-700. Прогрессивно-векторные диаграммы течений строились в программном пакете Grafer 14.

Естественные нефтепроявления (пятна жидких нефтеуглеводородов – НУ) на поверхности Северного и Среднего Каспия неоднократно наблюдались из космоса в 2011–2017 гг. (Голубов, Иванов, 2014; Иванов и др., 2014). Эти пятна-слики появлялись и группировались в одних и тех же местах в течение семи последних лет и часто имели характерные для естественных нефтепроявлений сигнатуры.

С использованием геоинформационного (ГИС) подхода (Иванов, Затягалова, 2007), были созданы сводные карты распределения всех пятен-сликов – кандидатов в естественные нефтепроявления.

Результаты исследования

Сейсмоакустика

На акваториях в северной части Каспийского моря в районе Промысловой зоны поднятий на глубинах 10–16 м ярко проявляются эрозионные врезы, заполненные слабоконсолидированным материалом, и акустические аномалии типа «яркое пятно» (ЯП) на различных уровнях разреза (рис. 1). Для оценки газоносности грунтового массива используется комплекс сейсмических аномальных эффектов, характерных для газоносных залежей, так называемых аномалий типа «залежь». В данном исследовании использованы:

– амплитудные аномалии, фиксируемые на сейсмоакустических записях в виде «ярких пятен» и нередко сопровождающиеся по краям дифрагированными волнами;

– аномально высокое поглощение сейсмической энергии, проявляющееся на разрезах в виде сейсмически «немых» зон;

– резкое снижение интервальных скоростей упругих волн, вызывающее «затяжку времени» на ниже залегающих отражающих горизонтах.

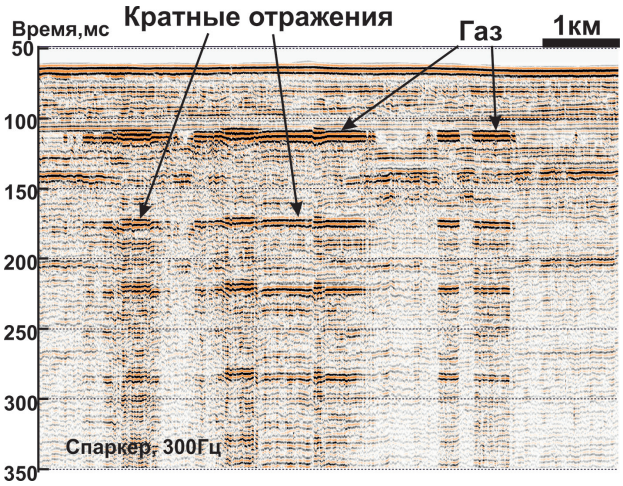

Рис. 1. Сеймоакустические аномалии типа «яркое пятно», НИС «Рифт», май 2012 г.

Эти эффекты проявляются в комплексе, либо отдельно. Выделение сейсмических аномалий осуществлялось путем определения относительных значений амплитуд и путем прослеживания в плане границ аномальных зон. Подобного типа аномалии отмечаются многими исследованиями на серии временных интервалов почти от поверхности до 100 мс. Основное количество ЯП приурочено к временному интервалу 42–88 мс. Отдельные изолированные аномалии отмечаются выше этого интервала до отметок 20–21 мс, повышение амплитуд отраженных волн зафиксировано также ниже, на отметках 110–118 мс (табл. 2). Литолого-стратиграфи-

ческая позиция выделена по материалам инженерно-геологических исследований, в процессе которых проводилось геологическое опробование бурением на глубину около 80 м и вибротрубками до 5 м.

Таблица 2. Пример распределения сейсмоакустических аномалий типа «яркое пятно», и их расположения на временном и литолого-стратиграфическом разрезе (фондовые данные инженерно-геологических работ)

Временной уровень	Временной интервал проявления, мс	Глубина проявления, м		Литолого-стратиграфическая позиция
		от поверхности моря	от дна	
«20 мс»	20–21	15–16	7–8	Озерные отложения мангышлакского комплекса
«43 мс»	42–44	32–35	23–26	Слой ракуши на границе хвалынского-хазарского комплекса
«57 мс»	56–58	43–45	34–36	Прослои ракуши в глинистых грунтах верхнехазарского комплекса
«66 мс»	64–70	51–54	42–46	Песчаные валы в песчано-глинистой пачке верхнехазарского комплекса
«74 мс»	73–75	около 60 м	52–53	Слой песка той же песчано-глинистой пачки
«86 мс»	84–87	68–70	60–62	Кровля базального песчаного слоя верхнехазарского комплекса
«114 мс»	112–115	около 90 м	около 82 м	Прослои ракуши в верхах нижнехазарского комплекса

Кроме сейсмоакустических разрезов в исследовании использованы материалы ГЛБО. На площадках отмечается сложный характер рассеяния сигналов. При этом рельеф поверхности дна не играет основной роли, так как дно практически плоское. На интенсивность рассеяния акустических сигналов в большей мере влияют микроформы рельефа дна, а также изменение физических свойств донных осадков и чередование их типов. В северной части Каспийского моря в зависимости от условий осадконакопления морское дно состоит из чередующихся полос ила, песков и ракуши (Мяконин, Тураев, 1970), поэтому наблюдаемая полосчатость, пятнистость акустического отображения морского дна в большей мере обусловлена такими участками. Например, по данным гидролокатора бокового обзора, на площадке, выполненной в 2018 г. (судно ПТР-45), наблюдаются полосы шириной до 300 м, вытянутые с северо-запада на юго-восток. Тон записи – светло-серый. Границы между полосами и основным фоном (темный) четкие (рис. 2). Также на дне наблюдаются покмарки глубиной около 50 см и линейными размерами около 6 м (рис. 2). На юго-восток от центра полигона наблюдаются два ярких объекта, выраженные в рельефе (рис. 2, рис. 3). Ещё один похожий наблюдается севернее. Объекты круглые диаметром около 10 м, расположены на краях каплеобразных недлинных и узких полос, отвечающих ракушечно-песчанистым отражениям (Путанс и др., 2019). Также обнаружено несколько округлых образований, не связанных со сменой литологии, но чётко выраженных в микрорельефе дна (диаметр 3–5 м).

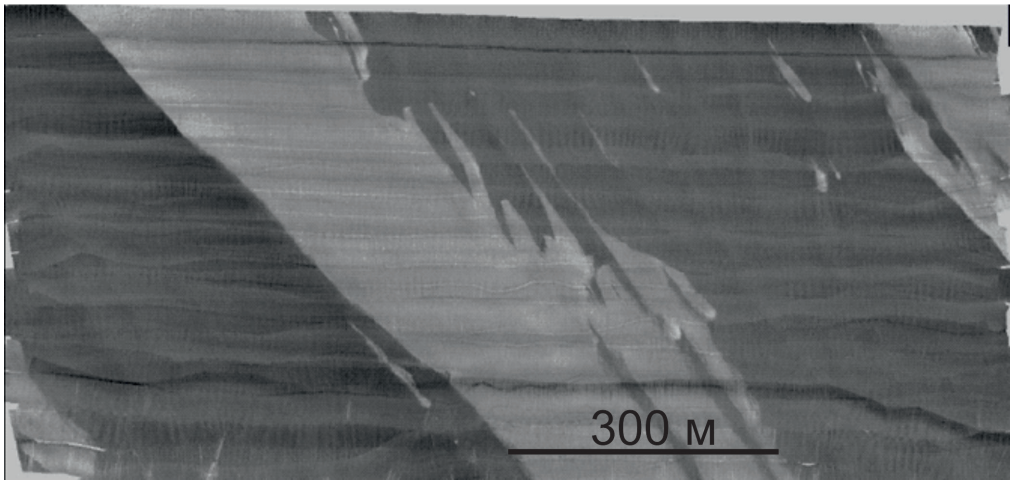

Рис. 2. Полигон № 1 (расположение см. рис. 5). Данные ГБО 450 кГц. ПТР-45, 2018 г.

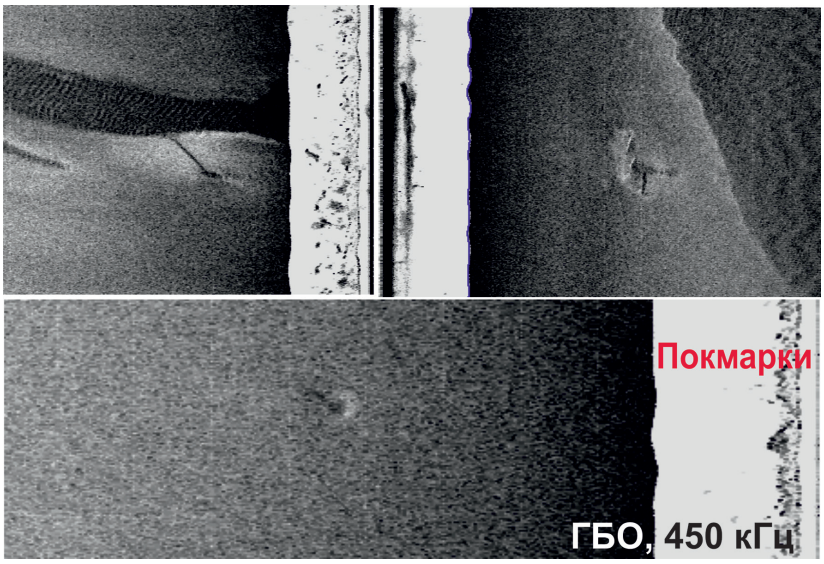

Рис. 3. Данные ГБО, 450 кГц. Покмарки. Местоположение см. рис. 5. ПТР-45, 2018 г.

Регистрация нефтепроявлений на поверхности моря из космоса

Для анализа пространственно-временного распределения пятен нефтепроявлений в северной части Каспийского моря использовались радиолокационные данные спутников Radarsat-2 и TerraSAR-X, а с 2015 г. – европейских спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B. Спутниковые данные собираются и анализируются в рамках ежегодного радиолокационного мониторинга Северного Каспия, проводимого российской компанией ГК «СКАНЭКС» с 2011 г. После обработки и предварительного анализа сами РЛИ и векторные контуры идентифицированных пятен выкладываются на специализированный геопортал, где результаты проходят окончательную экспертизу.

Методика распознавания нефтепроявлений (грифонных пятен) на РЛИ сводится к анализу совокупности пятен-сликов, обнаруженных на поверхности моря

и различению естественных пятен нефти от биогенных сликов и пятен иной, но пленочной природы, с учетом формы, размера, контраста, гидрометеорологических параметров среды, контекстной обстановки и пространственно-временной группировки (Иванов, 2007; Иванов и др., 2007). Метод распознания пятен-сликов основан на том, что большинство этих пятен обладает характерной формой и дополнительным набором вышеперечисленных характеристик, однозначно позволяющих отличить их, например, от пятен судовых разливов (Иванов, 2007). Одним из главных аргументов становится пространственно-временная групировка пятен-сликов в одних и тех же местах на разновременных РЛИ (рис. 4)

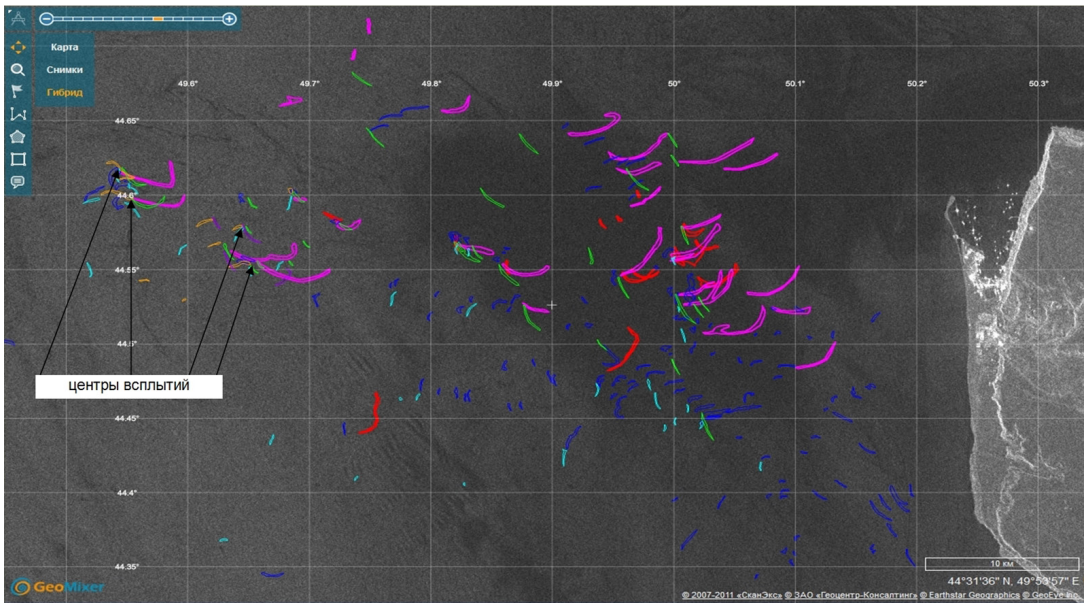

Рис. 4. Пример простанственно-временной группировки нефтепроявлений (пленочных сликов), обнаруженных в Северном Каспии, на радиолокационных изображениях в 2012 г. (рисунок из (Голубов, Иванов, 2014)).

На основе описанного подхода была создана карта естественных грифонных нефтепроявлений Северного Каспия за 2011–2017 гг. (Путанс и др., 2018). Её анализ позволил выбрать для детальных геолого-геофизических исследований те районы российского сектора моря, которые характеризовались появлением кластеров пятен на поверхности моря в разные годы. Затем путем совмещения данных ГБО, полученных в экспедиции ИО РАН 2018 г., и пятен-сликов, обнаруженных в результате радиолокационного мониторинга, было установлено достаточно хорошее соответствие структурных элементов дна по данным ГБО (см. рис. 2, рис. 3) и нефтепроявлений, обнаруженных на поверхности моря (рис. 5).

Гидрофизические наблюдения

Изучение гидрофизического и гидрохимического состояния водной среды и донных отложений, проведенное в 2003–2004 гг. в районах выходов флюидных колодцев (или окон) на дне Северного Каспия (Амбросимов, Голубов, 2014; Амбро-

симов, Верховская, 2012), показало, что эти проявления наиболее ярко выражены в донных осадках, обогащенных тяжелыми металлами и нефтяными углеводородами. Сами флюиды в водной среде довольно быстро растворяются и разносятся течениями, а содержащиеся в них тяжелые частицы осадков выпадают вблизи колодцев.

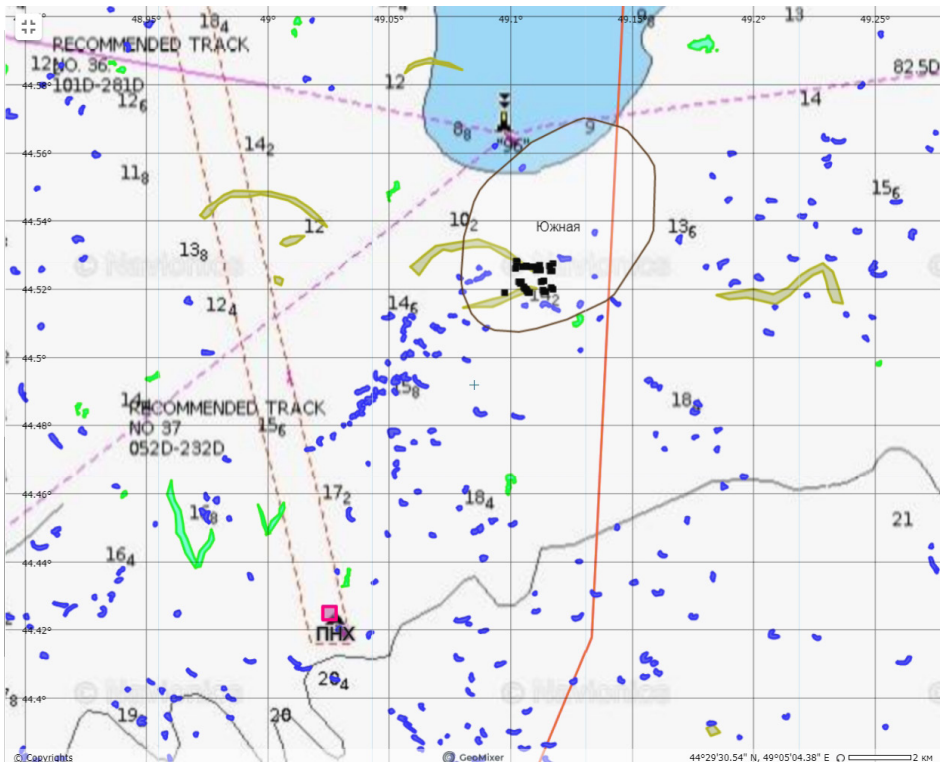

Рис. 5. Естественные нефтепроявления, обнаруженные в ходе спутникового радиолокационного мониторинга 2011–2018 гг. (полигон № 1), на подложке батиметрической карты: болотный – 2011, синий – 2016, светло-зеленый – 2017 гг. Черными квадратами показаны объекты на дне (покмарки), выявленные по данным ГБО в экспедиции 2018 г. Показаны также граница российского сектора моря (оранжевый), структура «Южная» и плавучее нефтехранилище – ПНХ. © СКАНЭКС.

Исследования показали, что химический и элементный состав воды и донных отложений в районе флюидодинамических колодцев значимо отличаются от фоновых значений, взятых вдали от них. Следует отметить, что дренирование газов из недр определяется довольно хорошо при гидроакустическом зондировании дна, а обнаружение выходов флюидов из геологических окон акустическими методами исследований затруднено, поскольку разница в удельных плотностях флюидов и морской воды ничтожно мала.

В 2005–2015 гг. в северо-восточной части Среднего Каспия, в провинции с большим количеством флюидодинамических окон у дна, были обнаружены слои теплой воды с температурой на ~0.4–0.8°C, превышающей температуру вышележащих слоев. Мощность этих слоев составляла около 20 м, а простирание не менее чем в несколько десятков километров, хотя специальных исследований по их простиранию не проводилось. Можно предположить, что такие объемы выдавленной из недр воды могут влиять и на динамику уровня Каспийского моря.

Во время проведения экспедиции в Северном Каспии осенью 2018 г. измерения проводились на акватории, где информация о флюидодинамических колодцах отсутствовала, но были спутниковые снимки нефтепроявлений на поверхности моря. Во время сейсмоакустической съемки по выявлению покмарок и их геологической структуры наблюдалась сложная гидрофизическая обстановка. Сильный ветер 15–17 м северо-восточного направления нарушал картину стокового течения в южном направлении. Скорость результирующего течения на горизонте 10 м при глубине моря 14 м составила $V_{ср.}$= 5.1 см/с в юго-западном направлении. При этом в верхнем слое на горизонте ~3 м скорость составляла около 12 см/с. Ветер, а также обрушение волн, нарушили картину сликов на поверхности моря и прицельный отбор проб воды на нефтегазоносность оказался невозможным. Для получения репрезентативных данных о характеристиках водной среды в районе сипов и сочений из колодцев необходим отбор проб воды на разных горизонтах и постановка приборов CTD-зонда и измерителя течений в центр колодца при минимальных значениях ветра и дрейфового течения.

Обсуждение результатов

Сейсмоакустика

Подавляющая масса «ярких пятен» (ЯП) приурочена к верхнехазарскому сейсмостратиграфическому комплексу (ССК) и к соответствующей «песчаной» пачке, что обусловлено хорошими коллекторскими свойствами грунтов – рыхлыми песками, обогащенными дисперсным органическим материалом. Поровые воды этих песков по обрамлению ЯП насыщены газом, выделяющимся при подъеме образцов на поверхность. При этом аномалии размещаются в несколько ярусов, когда над более крупными «пятнами» располагаются более мелкие. За счет повышенных потерь энергии при отражении образуется «сейсмическая тень» и сильные частичнократные волны, в итоге происходит маскирование верхними ЯП части нижних. Такое сочетание часто отражается на временных разрезах в виде комплексных аномалий пирамидального сечения с интервалом до 20 мс.

Наряду с высокими, контрастными значениями амплитуд отраженных волн, для «ярких пятен» характерны и другие аномальные эффекты, возникающие при наличии газа: уменьшение частоты отраженных волн; формирование под ними «акустической тени»; изменение полярности волн; проявление на их границах дифрагированных волн, свидетельствующие о скачкообразном изменении плотности грунтов. Ещё одна общая особенность аномалий – пологая куполовидность кровли наиболее крупных «ярких пятен», что отражает либо первичную седиментационную форму тел коллекторов, либо вторичную, которую вызвало нагнетание газа.

«Яркие пятна», приуроченные к мангышлакскому ССК, располагаются в 5–7 м от поверхности дна. На сейсмоакустических разрезах они выделяются в виде залежей с выпуклой кровлей. Под такими залежами всегда наблюдаются «акусти-

чески немые зоны», либо «затяжка» времени по ниже лежащим горизонтам. В то же время, в грунтах, отобранных вибрационной трубкой на горизонтах, соответствующих мангышлакскому возрасту, отмечен стойкий запах сероводорода (фондовые данные инженерно-геологических работ), что свидетельствует о миграции газа вверх по разрезу.

Таким образом, признаки свободного газа фиксируются в большинстве сейсмостратиграфических комплексов. При этом сейсмические аномалии, рассматриваемые в качестве этих признаков, проявлены по-разному. Комплексные аномалии, характеризующиеся повышением амплитуд и обуславливающие «затяжку времени» и создание сейсмически немых интервалов, приурочены к мангышлакскому ССК. Аномалии, располагающиеся на таких же временных отметках, но приуроченные к верхнехвалынским отложениям, фиксируются по пониженным скоростям упругих волн. Аналогичного типа аномалии связаны с погребенными валами в песчано-глинистой пачке верхнехазарского ССК. Аномалии остальных уровней являются амплитудными, иногда сопровождающимися по краям дифрагированными волнами. Например, нормальная интервальная скорость на уровне проявления аномалии составляет около 1840 м/с. Соответственно, в грунтах, обусловливавших аномальный эффект, скорость упругих волн составляет около 1300 м/с. Такое снижение скорости до значений меньших, чем в воде, скорее всего, связано с присутствием в грунте незначительных количеств свободного газа. И действительно, при инженерном бурении наблюдалась дегазация образцов, отобранных на отметках 67–72 мс, то есть на глубине 54–58 м от поверхности моря (фондовые данные).

Помимо плоских «ярких пятен» на сейсмических записях фиксируются столбчатые аномалии, представляющие серию следующих друг за другом дуг дифрагированных волн. Такие столбчатые образования достигают разных уровней и даже поверхности дна. В водной толще отмечаются гребневидные аномалии, аналогичные тем, что фиксируется в ряде морей в местах истечения со дна газа, а на дне изолированные микровозвышения и, чаще, микроуглубления. Гидролокация бокового обзора показала наличие довольно большого количества донных отражающих объектов. Анализ полученных акустических изображений позволяет сделать вывод, что по своим геометрическим и механическим характеристикам наличие этих объектов обусловлено главным образом геологическими особенностями дна. При этом рельеф поверхности дна в целом не играет основной роли, так как дно практически плоское. На интенсивность рассеяния гидроакустических сигналов в большей мере влияют микроформы рельефа дна, а также изменение физических свойств донных осадков и чередование их типов. Известно, что в северной части Каспийского моря в зависимости от условий осадконакопления морское дно состоит из чередующихся полос ила, песков и ракуши (Мяконин, Тураев, 1970), поэтому наблюдаемая полосчатость акустического отображения морского дна в большей мере обусловлена такими участками.

Регистрация пятен нефтепроявлений на поверхности моря из космоса

Развитые в последние годы технические средства и методы исследования из космоса позволили по-новому оценить флюидодинамику недр Каспийского моря. Снимки и радиолокационные изображения, полученные с космических аппаратов, фиксируют на поверхности моря слики, которые образуются при попадании и растекании на поверхности нефти при ее просачивании из естественных источников на дне, а также нефтяные разливы антропогенного происхождения. Данные космической радиолокации позволяют с высокой вероятностью обнаруживать пленочные/нефтяные образования различных типов, в том числе способные сохраняться на поверхности моря в течение нескольких часов и даже дней. Использование РЛИ с разрешением 10 и 20 м позволяет обнаружить и исследовать грифонную активность в Северном Каспии. По площади пятен нефтеуглеводородов (НУ) и скорости их дрейфа на поверхности моря, можно оценить объемы НУ, поступающих с морского дна при скоростях ветра 10–12 м/с. Оценки площадей сликов в несколько км^2 (Голубов, Иванов, 2014; Иванов и др., 2014) говорят о том, что для их образования необходимы объемы НУ от единиц до десятков м^3. При проведении сейсмопрофилирования площадок особую роль играют измерения поверхностных и приповерхностных течений, которые перемещают плёнки нефти по поверхности моря, и в итоге позволяют уточнить местоположение источника НУ на дне.

На рис. 4 и рис. 5 показана интегральная карта распределения пятен-сликов, обнаруженных на поверхности Северного Каспия в 2011, 2016 и 2017 гг. Наблюдается хорошее соответствие объектов на дне (покмарки – черные квадраты), обнаруженных по данным ГБО в экспедиции 2018 г., с положением нефтепроявлений на поверхности моря, особенно в 2011 г. Линейная протяженность сликов указывает на то, что эти пятна подпитываются снизу, а перенос происходит под воздействием ветра и течений.

Определение границ провинции распространения колодцевидных образований (КО) и оценка их плотности на единицу площади, проведенная в экспедициях ИО РАН 2004–2016 гг., показала, что эти площади с колодцами охватывают значительную часть Среднего и Северного Каспия, исчисляющуюся тысячами кв. км.

Космические РЛИ, полученные над Северным и частично над Средним Каспием, показывают, что большое количество пятен-сликов или нефтепроявлений часто наблюдаются на поверхности моря в районе интереса ежегодно, причем ряд из них наблюдается постоянно в одних и тех же местах, что подтверждает гипотезу о выходе флюидов из осадочных пород морского дна (Путанс и др., 2018). Комплексный анализ РЛИ (Иванов и др., 2014) показал, что часть сликов НУ обнаруживается строго в одних и тех же местах на поверхности моря и они являются трассерами подводных источников, постоянного получающих подпитку из недр. Кроме того, грифонная активность в районе полигона № 1 наблюдалась и в 2019 г. (рис. 6).

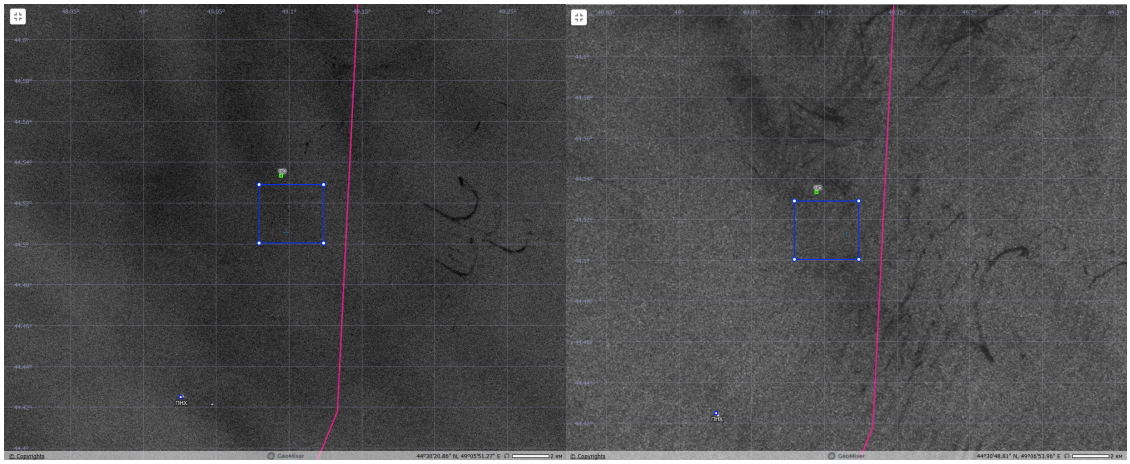

Рис. 6. Грифонная активность (нефтепроявления) в районе полигона № 1 в 2019 г.: справа на РЛИ спутника Sentinel-1A (13.05.2019), слева на РЛИ спутника Radarsat-2 (17.05.2019). © ESA, MDA, СКАНЭКС.

Гидрофизика

Гидрофизические, гидрохимические и гидробиологические наблюдения выполнялись с целью оценки влияния флюидов, обогащенных нефтяными углеводородами. Изучение воды и донных отложений у отдельных КО в Северном Каспии, выполненное в исследованиях (Амбросимов, Верховская, 2012); (Амбросимов, Голубов, 2014), показало, что химический и элементный состав воды и донных отложений в районе КО значимо отличаются от фоновых значений, взятых вдали от них. Это указывает на дренирование через КО высоконапорных обогащенных вод из недр моря.

Очаги разгрузки напорных пластовых флюидов из недр Скифско-Туранской плиты давно известны на Каспии и соседних территориях, в первую очередь, в виде грязевых вулканов. Однако, очень мало информации о том, что происходит в зонах структурных аномалий в донных осадках, которые могут служить каналами флюидообмена. В 2004–2018 гг. в экспедициях Института океанологии им П.П. Ширшова РАН над трубообразными образованиями в Северном и в Среднем Каспии были выполнены исследования воды и донных осадков. Над трубообразными телами и в их окрестности вода и донные осадки содержат повышенные концентрации металлов Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Co, Cr, Pb, Cd. (Амбросимов, Голубов, 2014; Амбросимов, 2018). Вода над некоторыми «трубами» обогащена железом в 192 раза больше по сравнению с фоновыми данными, марганцем в 70 раз, Cd – в 18.5, Zn – в 11.7, Cu – в 6 раз. Очевидно, что это весьма большое обогащение, и создавать его должны аномальные источники. Кроме этого анализ осадков в районе «труб» показал повышенное содержание нефтяных углеводородов.

Учитывая большие площади распространения КО и их высокую плотность, а также сейсмичность региона, можно предположить, что изменение уровня Каспийского моря может быть связано, в том числе, и с процессами выноса флюидов

в морскую среду из недр. По оценкам специалистов, в водонасыщенных глинах под дном Каспия содержится связанный объем воды, на порядок превышающий нынешний объем Каспийского моря.

Полученные данные о гидрофизике Северного Каспия являются пока лишь косвенными признаками субмаринной разгрузки подземных флюидов на дно моря. Однозначное добротное решение этой задачи может быть достигнуто при условии более детального обследования флюидодинамических колодцев с использованием методов электроразведки, гидрохимии, гидробиологии, бурения и водолазного обследования в сочетании с методами экспериментальной геохимии.

Выводы

Наиболее добротным признаком современной геодинамической активности недр Северного Каспия до недавних пор мог служить лишь активный рост соляных куполов южного борта Прикаспийской впадины. Местами здесь подмечена также приуроченность отдельных островов и банок к локальным поднятиям осадочного чехла (Леонтьев и др., 1977), что все же не воспринимается однозначно как надежное свидетельство тектонических подвижек дна моря на фоне их «подавления» экзогенными процессами эрозии и осадконакопления. Особое место занимают вновь обнаруженные трубообразные тела. То, что они пронизывают донные осадки, несомненно, указывает на нынешнюю геодинамическую активность недр Северного Каспия, которая охватывает не только область солянокупольной тектоники Прикаспийской впадины, как это считалось до недавних пор, но и пространство молодой Скифско-Туранской плиты.

Гидровулканизм и залповые прорывы газовых струй из недр – явление весьма типичное для новейшей тектонической впадины Каспийского моря, особенно его южной котловины. В последние годы геодинамическая нестабильность впадины Каспийского моря и её водно-газовых систем стала приобретать аномальный и особо интенсивный характер (Голубов, Катунин, 2002). Анализ полученных акустических данных позволяет сделать вывод о том, что по своим геометрическим и механическим характеристикам наличие круглых объектов диаметром до 10 м на данных ГБО обусловлено либо геологическими особенностями дна, либо являются следами техногенной деятельности в виде небольших борозд, ям и т.п.

Над отдельными трубообразными телами и в их окрестности, воды и донные осадки Северного Каспия содержат повышенные концентрации металлов Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Co, Cr, Pb, Cd, которые образуют в земной коре самостоятельные минералы двух основных групп. К первой из них относятся Fe, Mn, Cu, которые наиболее характерны для пород платформенного чехла древней и молодых платформ. Вторая группа объединяет элементы Cu, Zn, Ni, Co, Cr, Pb, Cd, которые также могут присутствовать в виде обломочных минералов в осадочном чехле платформ, но все же более характерны для рудных тел и гидротерм, свойственных более глубоким горизонтам земной коры.

Указанные сейсмические аномалии и донные микроформы могут рассматриваться в качестве признаков вертикальной миграции газа через толщу грунтов и поступления его в водную толщу с образованием газовых грифонов. При дренировании флюидов и газов из дна, в месте их выхода образуются небольшие провалы в структуре дна. Физически это можно объяснить разрыхлением и размягчением грунта в точке выхода флюидов или газов и выноса его течением.

В последние годы на дне Каспийского моря обнаружены обширные провинции со множеством разрыхленных вертикальных трубообразных или колодцевидных образований, уходящих в недра, по которым может осуществляться выход на дно, а затем и в море, флюидов и газов. Трубообразные тела могут служить каналами разгрузки гидротермальных флюидов, сосредоточенных как в осадочном чехле платформ, так и в его основании. Эти образования вызваны сейсмичностью во взаимодействии с высоконапорными флюидами и газами, которые сконцентрированы в осадках под дном моря. Особую роль в образовании разрыхленных трубообразных тел играет сейсмичность. Газовые сипы определяются очень хорошо, а обнаружение сочений флюидов из геологических окон акустическими методами исследований затруднено, поскольку разница в удельных плотностях флюидов и морской воды ничтожно мала.

В результате экспедиционных геолого-геофизических исследований впервые показана связь структур, обнаруженных на дне, с грифонной активностью Северного Каспия, выявленной по данным космической радиолокации (пространственно-временной группировке пятен-сликов) 2011–2019 гг.

Работа проведена в рамках государственного задания Министерства науки и образования России (темы №№ 149-2019-0006, 0149-2019-0003) и при поддержке гранта РФФИ 17-55-560003

Благодарность. Авторский коллектив выражает благодарность всем людям, которые организовали и провели экспедиции ИО РАН на Каспийское море в 2000–2016 гг. (включая НИС «Рифт» в 2004–2016 гг., ПТР-45 в 2018 г.) и собрали данные по сейсмоакустике.

Литература

Амбросимов А.К. О динамике течений в северо-восточной части Дербентской котловины // Изв. РАН. ФАО. 2018. Т. 54. № 4. С. 474–484.

Амбросимов А.К., Голубов Б.Н. Металлоносность вод и донных отложений Северного Каспия как показатель субмариной разгрузки флюидов из его недр // Экологические системы и приборы. 2014. № 5. С. 50–63.

Амбросимов А.К., Верховская З.И. Экогеохимические комплексные исследования донных осадков, морской воды и поверхностного микрослоя на полигонах Каспийского моря // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 2. С. 1–7.

Глумов И.Ф., Маловицкий Я.П., Новиков А.А., Сенин Б.В. Региональная геология и нефтегазоносность Каспийского моря. М.: Недра, 2004. 342 с.

Голубов Б.Н. Исмагилов Д.Ф. Трубообразные тела под дном Северного Каспия и флюидный режим его недр. Генезис нефти и газа // Тр. Всеросс. конференции. Москва 15–18

апреля 2003. Под ред. Д.Н. Дмитриевского, А.Э. Конторовича. М.: ГЕОС. 2003. С. 78–80.

Голубов Б.Н., Иванов А.Ю. Активизация выбросов нефти из недр Северного и Среднего Каспия в апреле-июне 2012 г. по спутниковым и геолого-геофизическим данным // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 2. С. 67–81.

Голубов Б.Н., Катунин Д.Н. Импульс гидровулканизма и дегазации недр Дербентской котловины как возможный фактор массовой гибели рыбы в Каспийском море весной 2001 г. // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ. Материалы межд. конф. памяти акад. П.Н. Кропоткина. 20-24 мая 2002, Москва. М.: ГЕОС, 2002. С. 31–33.

Иванов А.Ю., Колмыков Е.В., Бобков А.А., Филимонова Н.А., Антонюк А.Ю., Ускова А.А. О характере и причинах возникновения мелкомасштабных пленочных сликов в Северном Каспии, обнаруженных по данным спутникового радиолокационного мониторинга // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2014. № 12. С. 17–22.

Иванов А.Ю., Затягалова В.В. Картографирование пленочных загрязнений моря с использованием космической радиолокации и географических информационных систем // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 6. С. 46–63.

Иванов А.Ю. Слики и плёночные образования на космических радиолокационных изображениях // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 3. С.73–96.

Иванова Т.П., Трифонов В.Г. Сейсмотектоника и современные условия колебания уровня Каспийского моря // Геотектоника. 2002. № 2. С. 27–42.

Каплин П.А., Селиванов А.О. Изменения уровня морей России и развитие берегов: прошлое, настоящее, будущее. М.: ГЕОС, 1999. 298 с.

Леонтьев О.К., Маев Е.Г., Рычагов Г.И. Геоморфология берегов и дна Каспийского моря. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977. 208 с.

Мяконин В. С., Тураев И. А. Литолого-стратиграфическая характеристика и особенности строения четвертичных отложений северо-западной части Каспийского моря // Комплексные исследования Каспийского моря. М.: Изд-во МГУ, 1970. Вып. 1. С. 149–159.

Путанс В.А., Мерклин Л.Р., Амбросимов А.К., Иванов А.Ю. Флюидодинамические аномалии Каспийского моря // Neftegaz.RU (Offshore). 2019. № 1(85). С. 74–77.

Путанс В.А., Мерклин Л.Р., Иванов А.Ю. Признаки флюидодинамической активности Каспийского моря // Журнал Евразийский союз учёных. 2018. Т. 54. № 9. Ч. 4. С. 9–13.

MANIFESTATIONS OF MODERN FLUID DYNAMIC ACTIVITY OF THE NORTHERN CASPIAN SEA (GEOPHYSICAL DATA)

Putans V.A., Merklin L.R., Ivanov A.Yu., Ambrosimov A.K.

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36 Nahimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e–mail vitapu@mail.ru, lmerklin@mail.ru, ivanoff@ocean.ru, ambrosimov@ocean.ru
Submitted 31.05.2019, accepted 13.12.2019

The paper presents analysis of geological-geophysical data, both from archives and collected in recent expeditions by Shirshov Institute of Oceanology, RAS (SIO RAS) together with

satellite data. The interpretation shows modern rise of fluid dynamic activity on North Caspian. Based on summary of previous data, it is possible to recognize ryithmostratigraphic and seismostratigraphic complexes. Side sonar data shows many reflexing objects on the sea bottom. One of the most prominent features of Northern and Central Caspian is great number of pipe-like vertical bodies, they were discovered by SIO RAS expeditions with high-resolution seismic methods. These "pipes" go down beyond seismic section data. All specified seismic anomalies and bottom microrelief can be considered as evidence of vertical migration of gas and water via sediments and its escaping to water by gas and water grifons. Satellite images of North and Central Caspian show great amount of sliks and oil signs on the sea surface, and some of them present constantly on the same place, so it is possible to claim the sub-bottom fluid escape theory. The paper shows connection between bottom structures and grifon activity via satellite images (spatial-time grouping of oil slicks) of 2011–2019.

Keywords: Caspian Sea, seismoacoustics, seismostratigraphy, gas saturated sediments, fluid dynamics, oil seeps

References

Ambrosimov A.K. Anomalous dynamics of bottom currents and temperature in the northeastern sector of the middle Caspian Sea. *Izvestiya. Atmospheric and ocean physics*, 2018, Vol. 54, No. 4, pp. 404–413.

Ambrosimov A.K. and Golubov B.N. Metallonosnost vod i donnyh otlozheniy severnogo Kaspia kak pokazatel submarinnoy razgruzki fluidov v vodu (Metals concentration of water and bottom sediments in Northern Caspian as evidence of submarine reload of fluids). *Ekologicheskie sistemy i pribory,* 2014, No. 5, pp. 50–63.

Ambrosimov A.K. and Verkhovskaya Z.I. Multidisciplinary ecogeochemical studies of bottom sediments, seawater, and surface microlayer in some parts of the Caspian Sea. *Water resourses*, 2012, Vol. 39, No. 2, pp. 216–222.

Glumov I.F., Malovickiy Y. P., Novikov A.A., and Senin B.V. Regionalnaya geologiya i neftegazonosnost Kaspiyskogo morya (Regional geology and hydrocarbon potential of the Caspian Sea). Moscow: Nedra, 2004, 342 p.

Golubov B.N. and Ismagilov D.F. Truboobraznye tela pod dnom Severnogo Kaspia i fluidniy rezhim ego nedr. In Proceedings of Genezis nefti i gaza, Moscow: 2003, pp. 78–80.

Golubov B.N. and Ivanov A.Yu. Aktivizacia vibrosov nefti iz nedr Severnogo i Srednego Kaspia v aprele-iune 2012 po sputnokovym I geologo-geofizicheskim dannym (Activation of oil seeping in the Northern and Middle Caspian in April-June 2012 studied by satellite and geological-geophysical data). *Issledovanie Zemli iz kosmosa,* 2014, No. 2, pp. 67–81.

Golubov B.N. and Katunin D.N. Impuls gidrovulkanizma i degazacii nedr Derbentskoy kotloviny kak vozmozhniy factor massovoy gibeli ryby v Kaspiyskom more vesnoy 2011 (Impulse of hydrovolcanic and degasation activities in Derbent basin as possible factor of mass fish extinction in Caspian Sea in spring 2011). In Proceedings of International conference in memory of academician P.N. Kropotkin Earth degasation: gedynamics, geofluids, oil and gas, Moscow: 2002, pp. 31–33.

Ivanov A.Yu., Kolmykov E.V., Bobkov A.A., Filimonova N.A., Antonyuk A.Yu., and Uskova A.A. O kharaktere i prichinakh vozniknoveniya melkomasshtabnykh plenochnykh slikov v Severnom Kaspii, obnaruzhennykh po dannym sputnikovogo radiolokacionnogo monitoring (On the nature and causes of the occurrence of small-scale oil slicks in the Northern Caspian Sea discovered according to satellite radar monitoring). *Zaschita okruzhayuschey sredy v*

neftegazovom complexe, 2014, No. 12, pp. 17–22.

Ivanov A.Yu. and Zatyagalova V.V. Kartografirovanie plenochnykh zagryazneniy moray s ispolzovaniem kosmicheskoy radiolokacii i geograficheskikh informacionnikh system (Mapping oil spills in the marine environment using satellite radar imagery and geographic information systems). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2007, No. 6, pp. 46–63.

Ivanov A.Yu. Sliki i plenochnye obrazovaniya na kosmicheskikh radiolokacionnykh izobrazheniyakh (Slicks and oil films signatures on synthetic aperture radar images). *Issledovanie Zemli iz kosmosa,* 2007, No. 3, pp.73–96.

Ivanova T.P. and Trifonov V.G. Seismotectonics and Contemporary Caspian Sea Level Oscillations. *Geotectonics*, 2002, No. 2, pp. 27–42.

Kaplin P.A. and Selivanov A.O. Izmeneniya urovnya morey Rossii i razvitie beregov: proshloe, nastoyaschee, buduschee (Russian seas level change and shore development: past, present, future). Moscow: GEOS, 1999, 298 p.

Leontiev O.K., Maev E.G., and Rychagov G.I. Geomorphologiya beregov i dna Kaspiyskogo moray (Coastal and bottom geomorphology of the Caspian Sea). Moscow: MSU Publishing, 1977, 208 p.

Myakonin V.S. and Turaev I.A. Litologo-stratigraficheskaya kharakteristika i osobennosti stroeniya chetvertichnykh otlozheniy severo-zapadnoy chesti Kaspiyskogo morya (Lithology-stratigraphical characteristics and peculiarities of structure of Quaternary sediments in north-western part of Caspian Sea). Complex investigations on the Caspian Sea. Moscow: MSU Publishing, 1970, Vol. 1, pp. 149–159.

Putans V.A., Merklin L.R., Ambrosimov A.K., and Ivanov A.Yu. Fluidodynamycheskie anomalii Kaspiyskogo moray (Fluid dynamic anomalies of the Caspian Sea). *Neftegaz.RU (Offshore),* 2019, No. 1(85), pp. 74–77.

Putans V.A., Merklin L.R., and Ivanov A.Yu. Priznaki fluidodinamycheskoy aktivnosti Kaspiyskogo morya (Signs of fluid dynamic activities in the Caspian Sea). *Evraziyskiy souz uchenikh journal*, 2018, Vol. 54, No. 9, part 4, pp. 9–13.