

## О ТОНКОЙ СТРУКТУРЕ И ПРОИСХОЖДЕНИИ ИНТРУЗИЙ ЧЕРНОГО МОРЯ

Стунжас П.А.

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва,  
Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: [pastunzhas@mail.ru](mailto:pastunzhas@mail.ru)*

Статья поступила в редакцию 13.03.2019, одобрена к печати 26.08.2019

Процесс рождения и дрейфа босфорских интрузий как одновременных аномалий температуры и кислорода в юго-западной части Черного моря рассмотрен на основе данных 2-х био-буев Арго. Размывание амплитуды аномалий прослеживается на расстояние до 500 км от Босфора. Но в зимнее время буи встречают аномалии температуры и кислорода еще дальше, причем как на периферии моря, так и в халистазах. Параметры этих аномалий противоречивы: повышенная температура говорит, что это босфорские интрузии, дрейфующие в море несколько месяцев. Но они содержат в верхней части сероводородной зоны до 20 мкМ кислорода, который, по прежним данным, имеет время жизни в таких условиях всего порядка 1 недели. Это подразумевает местное образование аномалий за счет слабоизученных процессов зимнего подповерхностного переноса вод. Автор склоняется в пользу второй причины и призывает других исследователей обратить на это внимание.

**Ключевые слова:** Черное море, босфорский плюм, рождение и трансформация интрузий, температура, кислород

### Введение

Все Черное море (ЧМ) можно рассматривать как гидрофизический полигон, созданный природой, так как, с одной стороны, оно достаточно большое (500×1000 км), а с другой, внешние воздействия, такие как ветер и волны холода, сказываются на всем море, но по-разному. Еще взаимодействие обильного речного стока и соленых вод нижнебосфорского течения (НБТ) обуславливает существование резкого галоклина, экранирующего поверхностные воды от глубинных, и как следствие – их застойность и накопление в них сероводорода. Другим следствием является постоянный холодный промежуточный слой (ХПС), обновляющийся зимой в зависимости от ее суровости частично или полностью. Считается, что само зимнее перемешивание не захватывает слои воды ниже ядра ХПС, но имеется механизм переноса части поверхностных вод (и тепла) на промежуточные глубины моря – это так называемый босфорский плюм (БП), или босфорские интрузии (БИ) воды, образующиеся при смешении воды НБТ с водой ХПС и хорошо заметные в прибосфорском районе моря (Богданова, 1961; Latif et al., 1991). Очень важным для всего состояния моря является то, что БП производит

«горизонтальную» поставку кислорода в верхнюю часть сероводородной зоны, что требуется для уравнивания вертикального потока  $H_2S$ . Часть научного сообщества считает, что эта поставка полностью обусловлена босфорским плюмом (Kononov et al., 2003), другая с этим не согласна, так как даже в северо-восточной части ЧМ наблюдаются подповерхностные максимумы  $O_2$  и другие динамические эффекты (Stunzhas, 2005; Елкин и др., 2017), а количество  $O_2$ , переносимое БП, получено из косвенных оценок, а не путем исследований самих интрузий. Это разногласие в какой-то мере относится и к происхождению аномалий температуры ниже ядра ХПС.

Новые возможности анализа гидрофизической и гидрохимической структур ЧМ дают дрейфующие буи Арго. Можно отметить, что число наблюдаемых интрузий растет по мере изменения способов наблюдений: при помощи батитермографа и батометров – единичные случаи и только в прибосфорском районе (Богданова, 1969); при зондовых наблюдениях – десятки, но на расстояниях не более 150 км от Босфора, если выделять их по кислороду (Glazer et al., 2006); при помощи буев Арго – сотни, и наблюдались они до 800 км от Босфора, если выделять их по совокупности искажений температуры  $T$ ,  $O_2$ , обратного рассеяния света (Stanev et al., 2017). В последней работе уже высказывается мнение, что не все наблюдаемые интрузии имеют «босфорское» происхождение, но критерий разделения интрузий не приводится.

Цель статьи – провести сравнительный анализ параметров интрузий на глубинах 70–250 м и привлечь внимание к аномалиям температуры и кислорода ниже ядра ХПС, которые чаще всего возникают зимой и имеют не совсем понятную природу. Для отделения таких аномалий от БИ сначала рассматривается тонкая структура истинных босфорских интрузий и прослеживается, как она меняется во время дрейфа.

### Материалы и методы

Материалом послужили данные био-буев Арго: 6900807, 6901866, 7900592, 7900594 (сокращенно: А807 и т.д.) (<http://www.ifremer.fr/co-argoFloats/float?ptf-Code=XXXXXX>), оснащенных большим набором датчиков, включая оптические – кислорода и мутности, что очень помогает в выделении разных интрузий. Следует отметить, что данные некоторых из этих буев уже рассматривались в литературе (Stanev et al., 2017), но без анализа тонкой структуры интрузий. Особенно много интрузий наблюдал буй А592, так как он очень удачно прошел по району их формирования зимой, циклы всплытия буя осуществлялись каждые сутки, а измерения проводились через 1 м (в отличие от обычных режимов работы буев Арго – всплытие через 5–10 сут). Из-за особенностей работы оптического датчика  $O_2$  на буях Арго происходит запаздывание показаний по времени; на графиках (кроме рис. 5Б) вводилась поправка путем сдвига показаний примерно на 5 м вниз.

### Обсуждение данных

Сначала рассмотрим «классические» босфорские интрузии, то есть найденные в прибосфорском районе и несущие в себе часть воды НБТ. Они проявляются, в первую очередь, как экстремумы  $T$  на вертикальных профилях либо на  $T, S$ -диаграммах. Такие экстремумы наблюдались в большом количестве, например, в рейсах RV «Knorr» в 2001 г. (в положительную сторону) и в 2003 г. (в отрицательную), так как соответствующие им зимы были теплыми или холодными (Glazer et al., 2006). Механизм их образования представлен в простой 1.5-мерной модели (Samodurov, Ivanov, 1998). По ней на первом этапе поток воды НБТ, двигаясь по шельфу, вовлекает в себя окружающую воду, что приводит к увеличению толщины потока и уменьшению солености его верхней части (внутри потока предполагается ее линейный градиент по толщине). Второй этап начинается тогда, когда плотность верхнего слоя потока становится ниже плотности окружающей воды и эта более легкая вода всплывает и образует последовательность интрузий по глубине. Авторами показано, что при некоторых предположениях такой поток может производить интрузии до самых больших глубин, а получающиеся распределения  $T$  и  $S$  по глубине согласуются с наблюдаемыми, то есть модель предполагает, что никаких других интрузий, кроме босфорских, в море нет. Из нее также следует, что морем «управляют» два «вертикальных» параметра: скорость подъема вод и коэффициент турбулентного обмена. Это позволяет проводить некоторые химические балансовые оценки (Konovalov et al., 2003). Но переносить результат 1.5-мерной модели на реальное 3-мерное море – это очень большое упрощение.

Наблюдения показывают, что образование интрузий – это гораздо более сложный процесс. Сначала поток НБТ течет по шельфу в прорытом им каньоне, потом поворачивает на север-северо-запад и на пологом шельфе глубиной до 100 м растекается 2–3-мя струями, занимая полосу около 30 км шириной между точками 41.58°с.ш., 28.83°в.д. и 41.43°с.ш., 29.23°в.д. (Latif et al., 1991). На глубине 100 м в основной струе толщиной 2–3 м  $S$  придонной воды доходит до 22.8 епс (это больше, чем на глубине 2 км). Далее наклон шельфа резко растет, и тут уже могут появляться интрузии, то есть отрыв потока от дна. Но как из потока толщиной 2–3 м может получиться целый шлейф интрузий на глубинах от 150 до 800 м? Имея опыт анализа интрузий, автор попытается описать их 3-мерную структуру по данным первых наблюдений на мини-полигонах у Босфора рис. 2 и 3 в (Богданова, 1961). Там на глубинах 120–140 м поток воды НБТ с  $T > 10^\circ\text{C}$  раздваивается, его легкая часть образует зародыш интрузии – горизонтальную (точнее, изопикническую) выпуклость, которая заполняясь водой с температурой до  $15.5^\circ\text{C}$ , достигает размера несколько большего, чем  $5 \times 5 \text{ км}^2$ , а оставшиеся более тяжелые воды потока с  $T = 9.5\text{--}10^\circ\text{C}$  образуют следующие выпуклости на 150–200 м и еще глубже до 500 м. Потом, очевидно, эти выпуклости отрываются от дна течениями или внутренними волнами и превращаются в «босфорские» интрузии, а на их месте образуются новые зародыши интрузий, если поставка воды НБТ и другие условия будут сохраняться.

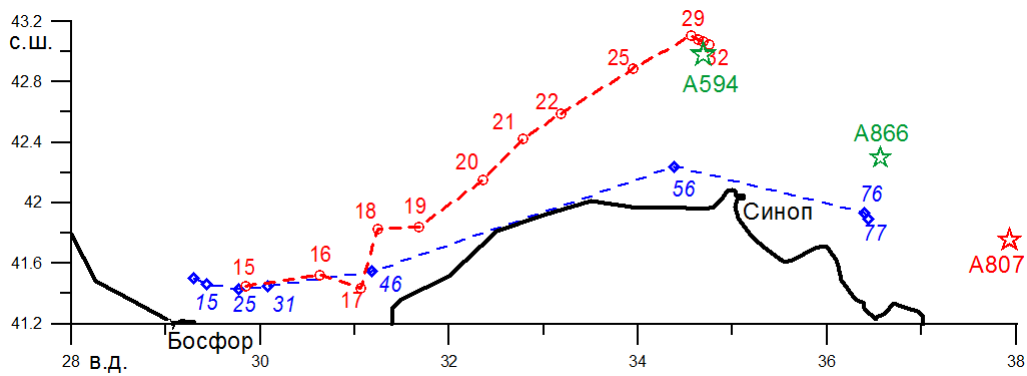


Рис. 1. Траектории дрейфа буев А807 (красная линия) с указанием первых циклов после прибосфорского района и А594 (синяя) с указанием циклов, упоминаемых в статье. Звездами отмечены места, где наблюдались аномалии в январе–феврале 2017 г. (пояснения см. в тексте).

По приведенным в (Богданова, 1961) рисункам можно оценить объем интрузии с ядром на 130 м в  $0.5\text{--}0.6 \text{ км}^3$ . При среднем потоке вод НБТ с учетом разбавления  $0.85 \times 4 = 3.5 \text{ км}^3/\text{сут}$ , такая интрузия образуется за несколько часов или в сутки – несколько интрузий. С учетом того, что есть несколько локальных мест образования интрузий, мимо которых проходит Основное Черноморское течение (ОЧТ), возможно их наложение одна на другую.

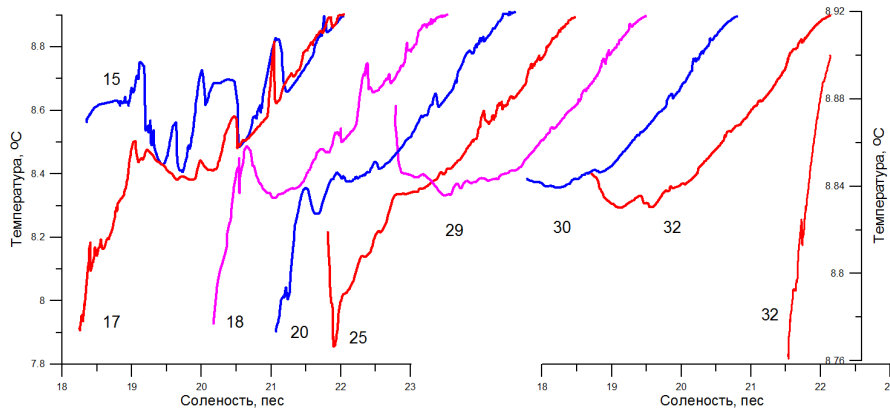


Рис. 2. Буй А807. Изменение вида интрузий на  $T,S$ -диаграммах в указанных циклах по мере удаления от прибосфорского района в период 11.02.2015–10.05.2015. Справа приведен вид аномалии температуры в  $\sim 0.01^\circ\text{C}$  для цикла 32 в увеличенном масштабе.

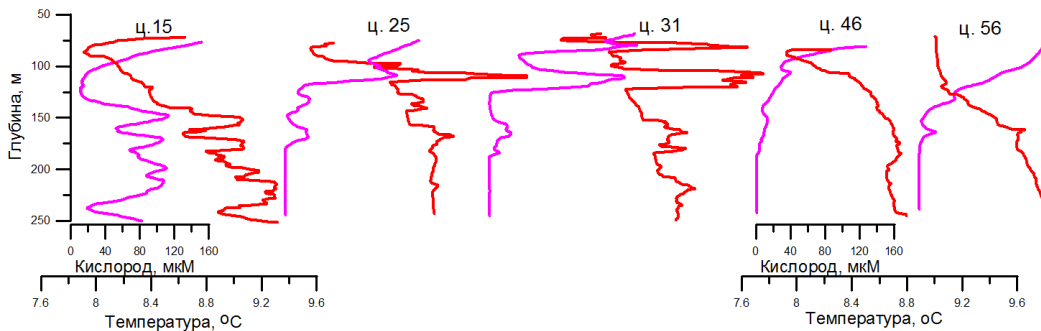


Рис. 3. Буй А592. Вертикальные профили  $T$  (красная линия) и  $\text{O}_2$  (сиреневая) для глубин 70–250 м. Приведены характерные циклы за период 26.12.2013–10.05.2014 (см. пояснения в тексте).

У интрузий, образующихся по этому механизму на глубинах 150–250 м, где градиент  $S$  составляет  $(20 \div 3)10^{-3}$  епс/м, отношение вертикального размера к горизонтальному ( $h/d$ ) можно оценить как  $10^{-3}$ , что характерно для интрузий в океане (Федоров, 1976), хотя их механизмы образования могут отличаться. Толщина интрузий в ЧМ будет зависеть не только от интенсивности потока НБТ, но и от градиента  $S$ , скорости течения и др. (Богданова, 1969). Так что с глубиной толщина интрузий  $h$  может увеличиваться, но количество опускающейся туда воды уменьшается. Для нас важно, что отношение  $h/d$  для глубинных интрузий, наверное, будет больше, то есть их горизонтальный размер будет меняться с глубиной не так сильно, как толщина. В противном случае, так как объем  $\sim h^3$ , то одна глубинная интрузия толщиной 200 м могла бы включить всю годовую поставку воды НБТ. Еще одно следствие такого механизма: во время больших затоков, если не вдаваться в сложности, происходит более сильный рост глубинных интрузий (на них остается больше воды). Поэтому глубина интрузий на профилях А592 до 800 м против обычных 500 м – свидетельство расхода НБТ больше среднего  $0.85 \text{ км}^3/\text{сут}$ .

Итак, поток воды НБТ течет по шельфу всего одни сутки (Богданова, 1969) и еще за сутки целиком превращается в интрузии. Это обстоятельство можно использовать для оценки горизонтальных размеров интрузий в полосе их рождения. Примем, что зимой поставка воды НБТ равна  $1.7 \text{ км}^3/\text{сут}$  (в 2 раза больше средней), разбавление 4 раза, средняя общая толщина интрузий – 500 м, а образуются они в сплошной полосе длиной 30 км, шириной  $d=7$  км, за время 9 сут (дрейф А592 между циклами 9–18). Тогда их объем  $V=30 \times 7 \times 0.5 = 105 \text{ км}^3$ , поставка из НБТ –  $1.7 \times 9 \times 4 = 61 \text{ км}^3$ . Учитывая грубость оценок, совпадение очень хорошее. Итак, в период дрейфа А592 в прибосфорском районе интрузии имели средний горизонтальный размер 5–7 км. В течение дрейфа они могут становиться тоньше, а  $h/d$  уменьшаться (Зацепин, 1982).

Почему буй Арго встречают больше интрузий, но с меньшими аномалиями  $T$ , чем находили при судовых измерениях? Возможно, это связано с какими-то изменениями гидрологической обстановки в последние годы, когда происходит потепление климата. Другой причиной могут быть особенности работы буюв. Основной их режим – дрейф 5–10 сут на глубине 500 м, а опускание на глубину 1000 м, медленный подъем к поверхности и передача данных занимают менее суток. Получается, что буй большую часть времени дрейфует вместе с глубинной интрузией, но интрузии на промежуточных глубинах могут чаще отклоняться от траектории дрейфа буюв. Посмотреть, как меняются параметры интрузий во время дрейфа, сложно, учитывая, что ширина ОЧТ составляет 50–100 км, а начальный диаметр интрузий не превышает 5–7 км. Маловероятно, что одна или похожие интрузии будут все время попадаться на пути буюв, тем более что параметры интрузий при их образовании сильно разнятся. Однако для простой задачи – посмотреть, как далеко и долго прослеживаются босфорские интрузии, – данные буюв А807 и А592 подходят.

Буй А807 сначала шел в ОЧТ (циклы 15–17), а потом на северо-восток, на окраину западной халистазы (см. рис. 1). Из рис. 2 видно, что вблизи от места

рождения величина аномалии  $dT$  на промежуточных глубинах достигала  $0.3^{\circ}\text{C}$ , а на глубинах 300–500 м была в 4–5 раз меньше. По мере удаления буя на восток обе аномалии уменьшались по величине, но относительное убывание последних было более медленным. Так, аномалии величиной более  $0.02^{\circ}\text{C}$  наблюдались еще в циклах 25 и 30 (в 29 – нет), то есть на расстоянии 440 км от места рождения, а регистрировались в течение 48 сут. Учитывая все обстоятельства, их все можно считать босфорскими интрузиями. Что брать за нижний предел регистрации аномалий  $T$  при чувствительности измерений лучше  $0.002^{\circ}\text{C}$ ? Автор считает, что ЧМ на глубинах 400–800 м не является полностью застойным, поэтому аномалии в  $0.01^{\circ}\text{C}$  могут образовываться за счет динамических процессов, а не только из-за БИ. Поэтому за нижний предел регистрации БИ лучше брать величину  $0.02^{\circ}\text{C}$ , чем  $0.01^{\circ}\text{C}$ , которая предложена в (Falina et al., 2017). В цикле 32 слабая аномалия  $T$  величиной  $0.0125^{\circ}\text{C}$  показана в увеличенном масштабе на рис. 2 справа.

Теперь перейдем к интрузиям, которые зарегистрировал буй А592 (рис. 3). Его путь с указанием номеров циклов, которые будут обсуждаться, показан на рис. 1. Так как вероятность образования небосфорских интрузий резко убывает с глубиной, то автор ограничился рассмотрением слоя 70–250 м, но с показом профилей  $\text{O}_2$ , так как в них аномалии размываются быстрее. Итак, в цикле 15 видны, по крайней мере, 5 больших (по величинам аномалий  $dT$  и  $d\text{O}_2$ ) слабо перекрывающихся интрузий – максимальное число для А592. Причем по  $\text{O}_2$  видна часть интрузии с пиком на 264 м (то есть глубоко в зоне  $\text{H}_2\text{S}$ ), что говорит о недавнем времени образования этой интрузии; а в дальнейшем пики  $\text{O}_2$  глубже 180 м уже не фиксировались. Цикл 25 – это интрузия с самыми большими вне прибосфорского района  $T$  и  $dT$  на 110 м, которая близка к минимальной для БИ глубине. Цикл 31 пришелся на каньон Сакарья, где ОЧТ, проходя через свал глубин, часто образует аномалии распределения  $T$ . В нашем случае аномалия  $T$  на 160–190 м и 210–250 м – это, скорее всего, БИ, максимум же  $T$  на 80 м (то есть выше границы таких интрузий) – влияние каньона, а сильная аномалия на 108 м (максимум) может иметь или первое, или второе происхождение. Максимум  $T$  на 80 м похож на слоистость, которая бывает при прерывистых циклах похолодания, но тогда  $\text{O}_2$  на эту изменчивость почти не реагирует, а до цикла 31 буй А592 еще не отмечал волн холода. Перед циклом 46 волна холода уже прошла, но искажения  $T$  и  $\text{O}_2$  на глубинах 107–142 м и 142–195 м, имеющие большую толщину и малое отношение  $d\text{O}_2/dT$ , скорее имеют босфорское, чем иное происхождение (более четкие примеры последних приведены ниже). К ним можно было бы отнести аномалию  $T$  и  $\text{O}_2$  в цикле 56 на глубине 161 м, но это только предположение, так как в этой части дрейфа буя А592 еще было много разных интрузий, хотя уже в цикле 57 они размываются до  $dT$  менее  $0.02^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, данные буюв А807 и А592 показывают, что босфорские интрузии могут наблюдаться как в ОЧТ, так и в западной халистазе до  $43^{\circ}\text{с.ш.}$  на расстояниях до 650 км от Босфора – глубинные и 500 км – на промежуточных глубинах.

Перейдем теперь к аномалиям  $T$  и  $\text{O}_2$ , которые, по мнению автора, связаны с воздействием волн холода на слои воды ниже ХПС, и наблюдаются они



в областях как ОЧТ, так и халистаз. Начнем с первой. На рис. 4А показаны аномалии в виде  $T,S$ - и  $O_2,S$ -диаграмм, найденные буюм А592 в ОЧТ (см. рис. 1) в цикле 76 (25.09.14) на фоне цикла 77. Вряд ли это дальнейшее продвижение босфорской интрузии, так как расстояние до Босфора – более 800 км и  $dT$  здесь превышает  $0.13^\circ\text{C}$ , а должна была бы стать менее  $0.02^\circ\text{C}$ , как в цикле 57 А592. Еще более веский довод – появление до 20 мкМ  $O_2$  ниже аэробной зоны, что говорит о недавнем  $\sim 1$  недели – времени ее образовании. На рис. 4Б показаны аномалии  $T$  и  $O_2$ , буй А807, цикл 151, 30.01.17,  $41.74^\circ\text{с.ш.}$ ,  $37.92^\circ\text{в.д.}$ , т.е. на 130 км восточнее предыдущего случая (красная звезда на рис. 1). Здесь под ХПС проник тонкий слой теплой воды с повышенным содержанием  $O_2$ . О возможных причинах таких проникновений теплой воды под ХПС поговорим позже, а пока перейдем к области халистаз. Выше отмечалось, что буй Арго видит больше интрузий в холодный период года, чем в теплый. Рекордным в этом отношении, вероятно, явились январь–февраль 2017 г. Этот период явился аномально холодным (у берегов море замерзло) на фоне предыдущих 4-х теплых лет, когда  $T$  в ядре ХПС повысилась выше  $8^\circ\text{C}$ , так что под ХПС градиент температуры сильно понизился.

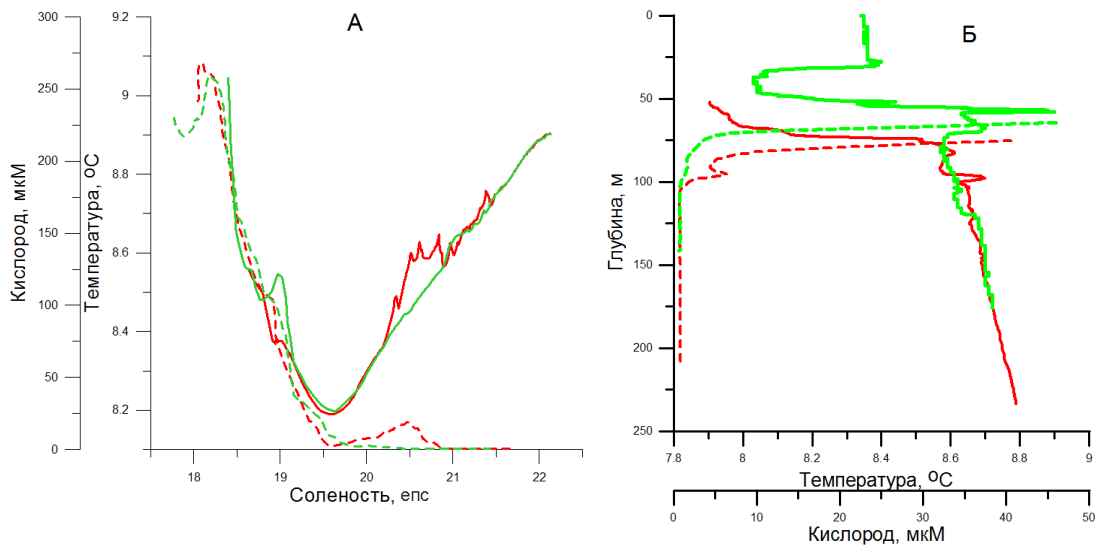


Рис. 4. А – Буй А592,  $T,S$ -диаграммы – сплошные линии,  $T,O_2$ -диаграммы – пунктирные. 25.09.2014, цикл 76 – положительная аномалия  $T$  и  $O_2$  (красные), цикл 77 – фон (зеленые); Б – буй А866, 11.02.17,  $42.29^\circ\text{с.ш.}$ ,  $36.50^\circ\text{в.д.}$ . Положительные аномалии  $T$  и  $O_2$  (сплошная и пунктирные красные линии) на фоне предыдущего цикла без аномалий (зеленые линии)

На рис. 5А и 5Б приведены примеры аномалий  $T$  и  $O_2$ , наблюдавшихся в это время буюми А594 и А866 (зеленые звезды на рис. 1). А594 перед этим кружился в западной халистазе, в районе примерно  $42.96^\circ\text{с.ш.}$ ,  $34.74^\circ\text{в.д.}$ , почти не смещаясь. Профили  $T$  и  $O_2$  еще в цикле 22.01.17 были гладкими, но, начиная со следующего цикла 27.01.17, на профилях возникли аномалии  $T$  и  $O_2$ , продолжавшиеся до 16.02.17, то есть 20 дней в 4-х циклах. Самые сильные показаны на рис. 5А на фоне цикла без аномалий. Похожая ситуация произошла и с буюм А866. Он шел на юго-восток из

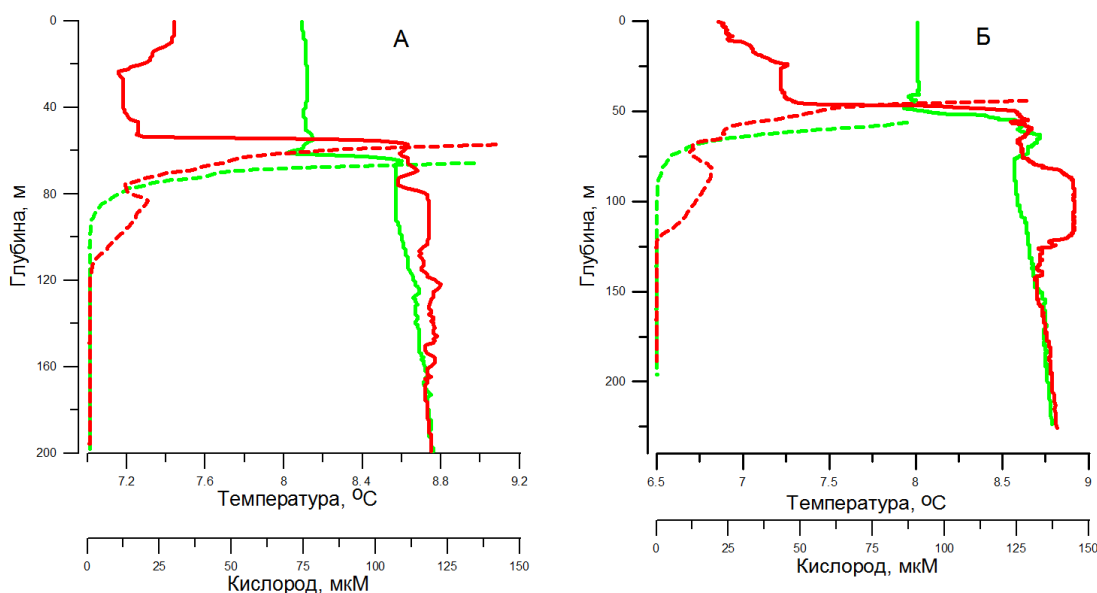


Рис. 5. А – Буй А594, 06.02.17, 42.98°с.ш., 34.74°в.д. Аномалии  $T$  и  $O_2$  на фоне более раннего профиля без аномалий (обозначения см. рис. 4); Б – то же для буйа А866, 11.02.17, 42.29°с.ш., 36.50°в.д., (пояснения см. в тексте).

западной халистазы, последняя точка, где не было аномалий: 22.01.17, 42.67°с.ш., 35.47°в.д. Последующие 4 цикла фиксировали аномалии, самая сильная из которых, наблюдавшаяся 11.02.17, показана на рис. 5Б. Причина возникновения аномалий на рис. 5 не ясна.

Есть ряд доводов считать, что оба буйа А594 и А866 встретили босфорские интрузии: 1) Вид профилей и довольно сильные возмущения  $T$  и  $O_2$  похожи на таковые для БИ в халистазах. 2) По положению и по расстоянию от Босфора БИ могли сюда попасть (см. примеры выше), хотя тогда аномалии были гораздо меньше. 3) Только БИ могли нести воду со столь высокой  $T$ , так как в это время во всем море в слое 0–200 м вода была холоднее, что показывали эти и другие буйа.

Доводы против босфорских интрузий:

1) Согласно выводам, сделанным выше, каждая БИ имеет диаметр менее 7 км, а общий их объем сравнительно мал (если считать на зимний месяц, это будет  $1.7 \times 4 \times 30 \approx 200 \text{ км}^3$ ). Попадание двух из них на пути буйев на расстоянии 180 км требует, чтобы они образовались в разное время с интервалом порядка месяца. Учитывая это, их одновременная встреча с буйами в самое холодное время кажется маловероятной.

2) Причем А594 и до обнаружения аномалий, и после сдвинулся всего на 2 км за 20 сут. Сравнение по 4-м циклам его аномалий  $T$  и  $O_2$ , показывает, что это могла бы быть одна слоистая аномалия в слое 65–165 м. При размере 7 км, вода в этом слое имела скорость  $7/20 = 0.35 \text{ км/сут}$ , что в несколько раз больше, чем у самого А594. Могло ли быть такое слоистое движение воды в центре западной халистазы?

3) Буй А866 имел гораздо большую скорость дрейфа (около 5 км/сут), встреченные им аномалии в 3-х циклах различались по виду от таковой на рис. 5Б, и вряд ли все они могли быть БИ.



4) В обоих случаях (рис. 5) аномалия  $T$  сопровождается не просто максимумом  $O_2$ , но и заглублением его нижней границы относительно фона и по плотности – увеличением с 15.9 до 16.17 и 16.3 у А594 и А866 соответственно. Такое проникновение  $O_2$  в зону  $H_2S$  наблюдалось только в прибосфорском районе, где время образования интрузии было менее недели.

В то же время у всех аномалий на рис. 4А–5Б есть общая особенность: они все наблюдались после резкого похолодания (из рисунков это видно). Таким же образом появлялись почти все большие аномалии  $T$  ( $>0.1^\circ C$ ), приведенные в статье (Falina et al., 2017). Там они приписывались «большим» босфорским интрузиям, образованным в ноябре, когда ветер усиливает в несколько раз НБТ, перекрывая верхнебосфорское течение, так как дрейфовать на дальние расстояния якобы могли только они. Так это или не так сказать сложно: те аномалии  $T$  достигали глубин 400–500 м, но тогда буи имели плохое разрешение по глубине и не измеряли  $O_2$ .

Но может ли зимнее появление всех этих аномалий иметь единую физическую причину? Один вариант описывается в статье (Кубряков и др., 2018): зимой в ЧМ с волнами холода происходит увеличение циклонической завихренности ветра, что приводит к усилению ОЧТ, экмановской дивергенции воды в халистазах и оттоку легких поверхностных вод из центра моря на его периферию, то есть в область ОЧТ. Согласно анализу, сделанному А.А. Кубряковым (не опубликовано), в центре моря верхний слой воды (с плотностью  $<14.5$ ) теплее на  $0.5–0.8^\circ C$  и солонее до 0.1 епс, чем на периферии. Аномалии  $T$ , показанные выше, были меньше в 2–3 раза, то есть в принципе такой механизм мог бы работать для ситуации рис. 4А, а также в других случаях, когда аномалии возникают в ОЧТ. Но для объяснения ситуации на рис. 5А, Б такой механизм явно не подходит, так как в халистазах в это время не было столь теплой воды, как в аномалиях (см. выше). Для случая с бумом А807 на рис. 4Б теплая вода, возможно, и была южнее, но ее перенос на север объяснить довольно сложно. Итак, аномалии на рис. 4А–5Б могли бы объяснить или босфорские интрузии с такими свойствами (в зимнее время они могут одновременно появляться в разных местах и иметь пока не наблюдавшуюся устойчивость кислорода в зоне  $H_2S$ ), или пока не известные процессы зимнего подповерхностного переноса вод. Автор как химик пока выбирает второе, а разрешить этот вопрос могли бы специальные судовые наблюдения в районе интрузий, найденных буями Арго в зимнее время.

### Выводы

Процесс рождения и дрейфа босфорских интрузий как одновременных аномалий температуры и кислорода в юго-западной части Черного моря рассмотрен на основе данных 2-х био-бумов Арго 6900807 и 7900592. Размывание амплитуды аномалий удалось проследить на расстоянии до 500 км от Босфора, но кислород на глубине зоны сероводорода наблюдался только на расстояниях менее 200 км. А в январе–феврале 2017 г. после резкого похолодания аномалии температуры и кислорода были встречены буями 6900807, 6900866 и 7900594 еще дальше, причем

как на периферии моря, так и в халистазах и на удалении друг от друга 180 км. Параметры этих аномалий противоречивы: повышенная температура говорит, что это могут быть босфорские интрузии, дрейфующие в море несколько месяцев. Но против босфорских интрузий говорит то, что эти аномалии были найдены на большом удалении друг от друга одновременно, в момент аномального похолодания, когда усиливаются динамические процессы в море; еще один довод – они содержат в верхней части сероводородной зоны до 20 мкМ кислорода. По прежним данным, время жизни кислорода в таких условиях – всего порядка 1 недели. Эти параметры подразумевают местное образование аномалий за счет слабо изученных процессов зимнего подповерхностного переноса вод. Автор склоняется ко второй причине объяснения образования аномалий и призывает других исследователей обратить на это внимание.

Работа выполнена по госзаданию ИО РАН № 0149-2019-0008 и при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ 17-05-00381 и 19-05-00459. Автор благодарит А.Г. Зацепина за интерес к работе и многочисленные консультации.

### Литература

- Богданова А.К.* Распределение средиземноморских вод в Черном море // *Океанология*. 1961. Т. 1. № 6. С. 983–991.
- Богданова А.К.* Гидрология Босфора и прибосфорского района Черного моря. В кн. *Водообмен через Босфор и его влияние на гидрологию и биологию Черного моря*. Киев: «Наукова думка», 1969. С. 5–121.
- Елкин Д.Н., Зацепин А.Г., Подымов О.И., Островский А.Г.* Опускание вод в экмановском слое, образованном прибрежным даунвеллинговым течением над наклонным дном // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 4. С. 531–537.
- Зацепин А.Г.* О коллапсе стратифицированных пятен // *Доклады АН*. 1982. Т. 265. № 2. С. 460–463.
- Кубряков А.А., Зацепин А.Г., Станичный С.В.* Об особенностях сезонной генерации синоптических антициклонов в Черном море // *Сборник трудов Международного симпозиума МСП-2018*. Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. М.: ИО РАН, 2018. С. 201–204.
- Федоров К.Н.* Тонкая термохалинная структура вод океана. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 184 с.
- Falina A., Sarafanov A., Ozsoy E., Turuncoglu U.* Observed basin-wide propagation of Mediterranean water in the Black Sea // *J. Geoph. Res. Oceans*. 2017. Vol. 122. No. 4. P. 1–13. DOI: 10.1002/2017JC012729.
- Glazer B.T., Luther G.W. III, Konovalov S.K., Friederich G.E., Trouwborst R.E., Romanov A.S.* Spatial and temporal variability of the Black Sea suboxic zone // *Deep-Sea Research*. P. II. 2006. Vol. 53. No. 7. P. 1756–1768. DOI:10.1016/j.dsr2.2006.03.022.
- Konovalov S.K., Luther G.W., Friederich G.E., Nuzzio D.B., Tebo B.M., Murray J.W., Oguz T., Glazer B., Trouwborst R.E., Clement B., Murray K.J.* Lateral injection of oxygen with the Bosphorus plum – fingers of oxidizing potential in the Black Sea // *Limnol. Oceanogr.* 2003. Vol. 48. P. 2369–2376.

- Latif M.A., Ozsoy E., Oguz T., Unluata U.* Observations of the Mediterranean inflow into the Black Sea // *Deep Sea Res.* 1991. Vol. 38. Suppl. 2. P. S711–S724. DOI:10.1016/S0198-0149(10)80005-6.
- Samodurov A.S., Ivanov L.I.* Processes of ventilation of the Black Sea related to water exchange through the Bosphorus // *Ecosystem modeling as a management tool for the Black Sea*. L.I. Ivanov, T. Oguz – eds. NATO Science. Ser. 2: Environmental security. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. Vol. 47. P. 221–235.
- Stanev E., Grayek S., Claustre H., Schmechtig C., Poteau A.* Water intrusions and particle signatures in the Black Sea: a Biogeochemical-Argo float investigation // *Ocean Dynamics*. 2017. Vol. 67. P. 1119–1136. DOI:10.1007/s10236-017-1077-9.
- Stunzhas P.A.* Applications of continuous oxygen profiles to redox zone study // *Oceanology*. 2005. Vol. 45. Supplement. P. 93–100.

## ABOUT FINE STRUCTURE AND THE ORIGIN OF THE INTRUSIONS IN THE BLACK SEA

**Stunzhas P.A.**

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
36 Nahimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia, e-mail: pastunzhas@mail.ru*  
Submitted 13.03.2019, accepted 26.08.2019

The process of birth and drift of the Bosphorus intrusions as simultaneous temperature and oxygen anomalies in the S-W part of the Black Sea was considered on the basis of data from 2 Argo bio-buoys. The erosion of the amplitude of the anomalies can be traced to a distance of 500 km from the Bosphorus. But in winter, buoys encounter anomalies of temperature and oxygen even further, moreover, both on the periphery of the sea and in the gyres. The parameters of these anomalies are contradictory: increased temperature says that these are Bosphorus intrusions that have been drifting at sea for several months. But they contain up to 20  $\mu\text{M}$  of oxygen in the upper part of the hydrogen sulphide zone, which according to previous data has a life time in such conditions of only about 1 week. This implies local formation of anomalies due to poorly studied processes of winter subsurface water transfer. The author is inclined in favor of the second reason and calls on other researchers to pay attention to this.

**Keywords:** Black Sea, Bosphorus plume, intrusions, temperature, oxygen

### References

- Bogdanova A.K.* Hidrologija Bosfora i pribosforskogo rajona Chernogo morja. Vodoobmen cherez Bosfor i ego vlijanie na gidrologiju i biologiju Chernogo morja. (Hydrology of the Bosphorus and near-Black Sea region of the Black Sea. Water exchange through the Bosphorus and its influence on the hydrology and biology of the Black Sea). Kiev: "Naukova Dumka", 1969, pp. 5–121.
- Bogdanova A.K.* Raspredelenie sredizemnomorskih vod v Chernom more (Distribution of Mediterranean waters in the Black Sea). *Okeanologija*, 1961, Vol. 1, No. 6, pp. 983–991.
- Elkin D.N., Zatsepin A.G., Podymov O.I., and Ostrovskij A.G.* Opuskanie vod v jekmanovskom sloe, obrazovannom pribrezhnom daungvellingovym techeniem nad naklonnym dnom.

- (Lowering the waters in the Ekman layer formed by the coastal downwelling current over an inclined bottom). *Okeanologija*, 2017, Vol. 57, No. 4, pp. 531–537.
- Falina A., Sarafanov A., Ozsoy E., and Turuncoglu U. Observed basin-wide propagation of Mediterranean water in the Black Sea. *J. Geoph. Res.: Oceans*, 2017, Vol. 122, No. 4, pp. 1–13, doi:10.1002/2017JC012729.
- Fedorov K.N. Tonkaja termohalinnaja struktura vod okeana. (Fine-scale thermohaline structure of ocean waters). Moscow: Gidrometeoizdat, 1976, 184 p.
- Glazer B.T., Luther G.W.III, Konovalov S.K., Friederich G.E., Trouwborst R.E., and Romanov A.S. Spatial and temporal variability of the Black Sea suboxic zone. *Deep-Sea Res., Part II*, 2006, Vol. 53, pp. 1756–1768, doi:10.1016/j.dsr2.2006.03.022.
- Konovalov S.K., Luther G.W., Friederich G.E., Nuzzio D.B., Tebo B.M., Murray J.W., Oguz T., Glazer B., Trouwborst R.E., Clement B., and Murray K.J. Lateral injection of oxygen with the Bosphorus plume – fingers of oxidizing potential in the Black Sea. *Limnol. Oceanogr.*, 2003, Vol. 48, pp. 2369–2376.
- Kubryakov A.A., Zatsepin A.G., and Stanichnyj S.V. Ob osobennostjah sezonnoj generacii sinopticheskikh anticiklonov v Chernom more. Sbornik trudov Mezhdunarodnogo simpoziuma MSP-2018; Institut okeanologii im. P.P. Shirshova RAN, Moskva: IO RAN, 2018, pp. 201–204. (On the features of seasonal generation of synoptic anticyclones in the Black Sea. Proceedings of the International Symposium ICP-2018); Moscow: IO RAN, 2018, pp. 201–204, doi: 10.29006/978-5-9901449-4-1-2018-56.
- Latif M. A., Ozsoy E., Oguz T., and Unluata U. Observations of the Mediterranean inflow into the Black Sea. *Deep-Sea Res.*, 1991, Vol. 38, Suppl. 2, pp. S711–S724, doi:10.1016/S0198-0149(10)80005-6.
- Stanev E., Grayek S., Claustre H., Schmechtig C., and Poteau A. Water intrusions and particle signatures in the Black Sea: a Biogeochemical-Argo float investigation. *Ocean Dynamics*. 2017, Vol. 67, pp. 1119–1136, doi:10.1007/s10236-017-1077-9.
- Samodurov A.S. and Ivanov L.I. Processes of ventilation of the Black Sea related to water exchange through the Bosphorus. Ecosystem modeling as a management tool for the Black Sea. L.I. Ivanov, T. Oguz – eds. *NATO Science. Ser. 2: Environmental security*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998, Vol. 47, pp. 221–235.
- Stunzhas P.A. Applications of continuous oxygen profiles to redox zone study. *Okeanologiya*, 2005, Vol. 45, Supplement, pp. 93–100.
- Zatsepin A.G. O collapse stratifitsirovannyh pjaten. Doklady Akademii Nauk, (About collapse of stratified spots). *Reports of Academia of Science*, 1982, Vol. 265, No. 2, pp. 460–463.