

*На правах рукописи*

**Сильвестрова Ксения Петровна**

**ПРИБРЕЖНЫЕ АПВЕЛЛИНГИ В  
СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ:  
СВЯЗЬ С ВЕТРОМ И ТЕЧЕНИЕМ**

Специальность 25.00.28 – Океанология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук, доцент  
**Зацепин Андрей Георгиевич**

**Официальные оппоненты:** **Белокопытов Владимир Николаевич**  
доктор географических наук, старший научный сотрудник, заведующий Отделом океанографии Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Морской гидрофизический институт РАН»

**Нестеров Евгений Самойлович**  
доктор географических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник Отдела морских гидрологических прогнозов Федерального государственного бюджетного учреждения «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации»

**Ведущая организация:** **Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова»**

Защита состоится «    » июня 2019 г. в    ч. 00 мин. на заседании Диссертационного совета Д 002.239.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук по адресу: 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.disser.ocean.ru> Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Автореферат разослан «    »    2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

Гинзбург Анна Ивановна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Шельфовая зона северо-восточной части Черного моря представляет собой стратегически важный регион, здесь находятся крупнейший по грузообороту порт России – Новороссийск и популярные курортные зоны. Для обеспечения экологической безопасности региона необходим постоянный мониторинг процессов кросшельфового водообмена, связанных с динамикой вод в прибрежной зоне моря. Актуальность изучения короткопериодной динамики вод, и в т. ч. процессов апвеллинга и даунвеллинга, обусловлена необходимостью получения адекватных оценок способности экосистемы выдерживать увеличивающуюся антропогенную нагрузку [Crise et al., 2015].

Несмотря на общую освещенность циркуляционных механизмов в прибрежной зоне Черного моря, остаются открытыми некоторые вопросы, например, каково влияние вихревых образований на гидрологическую структуру вод. Течения на шельфе Черного моря подвержены влиянию динамики глубоководной зоны, но также они имеют собственные моды изменчивости и сильно зависят от воздействия поля ветра и берегового стока [Зацепин и др., 2016].

Вышесказанное относится и к процессам прибрежного апвеллинга и даунвеллинга. Апвеллинг обычно определяется как поднятие холодных глубинных вод к поверхности (будем считать такие апвеллинги полными). Когда подтермоклинные воды не достигают поверхности, процесс апвеллинга как таковой существует, но он неполный. Совокупное влияние различных факторов (течений, мезомасштабных и субмезомасштабных вихрей, береговых захваченных волн, ветрового воздействия) может быть определяющим при развитии процесса апвеллинга, однако исследований по этому вопросу в Черном море практически нет. Также на сегодняшний день отсутствуют работы по изучению неполных апвеллингов, что связано прежде всего с невозможностью определения таких процессов по спутниковым данным.

Полные и неполные апвеллинги существенно изменяют термическую структуру вод, что приводит к изменению содержания биогенных элементов в системе и, следовательно, влияет на условия существования прибрежных морских экосистем.

Таким образом, получение достоверных сведений о характеристиках и генезисе полного и неполного апвеллинга, повторяемости этих событий, а также связи апвеллингов с особенностями локальной циркуляции вод в этом регионе является актуальной задачей, в т. ч. для исследований функционирования морских экосистем и для краткосрочного регионального прогноза гидрофизических условий.

**Цель диссертационной работы** – изучение локальных особенностей апвеллинга на шельфе северо-восточной части Черного моря и связи апвеллингов с ветровыми условиями и динамикой прибрежных вод. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**:

- Сбор, подготовка и обобщение данных наблюдений о течениях и термической структуре вод в районе исследования.
- Выявление событий полного и неполного апвеллинга по данным заякоренной термоксы. Оценка различных факторов, вызывающих апвеллинг, в т. ч. локальной динамики вод по данным акустического доплеровского профилографа (ADCP).
- Проведение дрейфтерных запусков на шельфе Черного моря, анализ полученных данных и описание особенностей циркуляции данного региона, оценка возможного влияния динамики на события апвеллинга.
- Разработка методики расчета и верификации критерия полного экмановского апвеллинга. Анализ критерия для выявленных событий апвеллинга, оценка влияния ветровых условий. Анализ межгодовой изменчивости ветровых апвеллингов по расчетным данным с 1979 по 2016 гг. в исследуемом районе.

**Научная новизна исследования.** В ходе работы проводился анализ новых данных высокого пространственного и временного разрешения о

течениях и температуре вод, полученных в ходе регулярных экспедиционных исследований и мониторинга на гидрофизическом подспутниковом полигоне «Геленджик» в Черном море с 2012 года. Разработана оригинальная методика и проведены дрейфтерные запуски в прибрежной зоне Черного моря для регистрации короткопериодных динамических процессов. Впервые выполнены расчеты критерия апвеллинга для исследуемого района за длительный период по данным современного метеорологического реанализа высокого разрешения.

**Основные положения**, выносимые на защиту:

1. Установлено, что апвеллинги в северо-восточной части Черного моря, зарегистрированные в теплый сезон года, бывают полные и неполные. Случаи возникновения полных апвеллингов довольно редки и наблюдаются не каждый год. Показано, что основной механизм, вызывающий полный апвеллинг, – продолжительный (более суток) ветер северо-западного направления совместно с юго-восточным течением (более 30 см/с). При воздействии одного из указанных факторов может наблюдаться только неполный апвеллинг.
2. На основе дрейфтерных запусков уточнены особенности прибрежной циркуляции: подтверждено наличие субмезомасштабных антициклонических вихрей, имеющих размер около 12 км по вдольбереговой оси и 6 км по оси, перпендикулярной берегу. В вихрях зафиксированы скорости течения 20–70 см/с, время их жизни составило менее 2 суток. Показано, что вихревые образования могут приводить к неполному апвеллингу.
3. Предложена методика расчета критерия полного ветрового экмановского апвеллинга, основанная на использовании данных о касательном напряжении ветра (реанализ NCEP/CFRSR, CFSv2) и толщины верхнего квазиоднородного слоя. Результаты расчетов критерия верифицированы по данным гидрометеорологической станции г. Геленджика о температуре воды на поверхности. Установлено, что 70 % случаев апвеллинга по данным расчета согласованы с уменьшением температуры воды на поверхности, при этом в 40 % случаев падение температуры воды на поверхности составило более 5°C.

4. На основе расчета критерия полного ветрового экмановского апвеллинга выполнен анализ сезонной и межгодовой изменчивости полных апвеллингов для исследуемого района с 1979 по 2016 гг. Показано, что в среднем полные ветровые апвеллинги могут проявляться 3 раза в год, чаще всего в июне–июле, максимальное количество апвеллингов (8 событий) по данным расчета наблюдалось в 1987 г., а в 2010 г. ввиду отсутствия продолжительных апвеллинговых ветров не было ни одного события. Таким образом наблюдается сильная межгодовая изменчивость количества полных ветровых апвеллингов.

**Достоверность научных результатов** обеспечивается использованием данных высокоточных наблюдений температуры воды (по данным заякоренных термокос) для выявления событий полного и неполного апвеллингов. Для исследования связи данных событий с течениями также использовались данные акустических доплеровских профилографов, широко применяемых в мировой практике. Анализ пространственных особенностей циркуляции, в частности, вихревых образований, проводился на основе траекторий лагранжевых дрейфтеров с высокой точностью позиционирования. Проведена оценка качества результатов расчета критерия экмановского полного апвеллинга на основе данных натурной измерений на метеостанции г. Геленджика за длительный период времени (с 1979 по 2016 гг.).

**Научное и практическое значение** исследования определяется тем, что были получены новые знания о сезонной и межгодовой изменчивости ветровых экмановских апвеллингов в северо-восточной части Черного моря. Полученные результаты исследования по изменчивости экмановских апвеллингов могут быть использованы при изучении локальных условий существования прибрежных экосистем, т.к. динамика вод (в т. ч. апвеллинг) – один из основных факторов кросшельфового водообмена. На основе методики расчета критерия полного ветрового экмановского апвеллинга может быть разработана система прогноза прибрежных апвеллингов на 3–5 суток. Апвеллинг обеспечивает интенсификацию вертикального обмена и рост первичной биологической продукции за счет притока биогенных элементов в

эвфотический слой, что позволяет использовать критерий апвеллинга в качестве одного из параметров для прогноза состояния экосистем. Необходимо отметить, что полученное выражение для критерия апвеллинга может быть использовано для оценочных расчетов в других регионах Мирового океана со схожими условиями. Разработанная методика проведения дрейфтерных экспериментов успешно используется при проведении мониторинга на подспутниковом гидрофизическом полигоне ИО РАН. Данные о прибрежной циркуляции вод в северо-восточной части Черного моря, полученные благодаря дрейфтерным запускам, использовались для верификации радиолокационных измерений, а также могут быть использованы для проверки циркуляционных моделей и прогнозов экологического состояния морской среды.

**Личный вклад соискателя.** Автор регулярно принимал участие в экспедиционных исследованиях на гидрофизическом полигоне в Черном море с 2012 г., в ходе которых были получены данные, составляющие основу исследования. При его непосредственном участии были получены и обработаны данные с заякоренной термоксы и ADCP. Автором создана оригинальная система мониторинга течений с помощью дрейфтеров, предложена методика расчета критерия полного экмановского апвеллинга, проведены обработка и анализ данных, а также подготовка результатов исследования к печати и представлению на конференциях.

**Апробация работы.** Результаты данного исследования были представлены на заседании Ученого совета Физического направления Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН в 2018 г., на международных (3-я Международная конференция «Динамика прибрежной зоны бесприливных морей», Геленджик, 2014 г.; ассамблея Европейского геофизического общества, Вена, 2017 г.; 11-я конференция EMECS, Санкт-Петербург, 2016 г.; Международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование (MARESEDU – 2018)», Москва, 2018 г.) и российских конференциях (Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ), Москва, 2015 и 2017 гг.; Всероссийская молодежная

научная конференция «Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования», Севастополь, 2015 г.; «Комплексные исследования Мирового океана» (КИМО), Москва, 2017 г. и Санкт-Петербург, 2018 г.; «Морские исследования и рациональное природопользование», Севастополь, 2018 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 16 работ, включая 6 статей в рецензируемых журналах из списка, рекомендованного ВАК, 10 тезисов докладов на международных и российских конференциях.

**Благодарности.** Автор благодарит коллектив Лаборатории экспериментальной физики океана ИО РАН и научного руководителя д.ф.-м.н. Зацепина Андрея Георгиевича за помощь в работе и ценные замечания. Автор выражает признательность Дмитрию Соловьеву, к.ф.-м.н. Александру Осадчиеву за ознакомление с возможностями спутниковых исследований и к.ф.-м.н. Станиславу Мысленкову за всестороннюю поддержку.

**Структура и объем работы** Диссертация состоит из Введения, 4 глав, Заключения и Приложения. В работе содержится 61 иллюстрация и 5 таблиц. В работе цитируются 144 источника. Объем диссертации – 141 страница.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** описаны научная новизна, актуальность и практическая значимость исследования, а также сформулированы основная цель, задачи и положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** приведен обзор современного состояния изученности гидрологической структуры и динамики вод Черного моря.

В **разделе 1.1** приведены общие сведения о структуре и динамике вод Черного моря. **Раздел 1.2** посвящен работам о синоптической изменчивости. Развитие исследований синоптических и мезомасштабных процессов в черноморском регионе началось в 1950-х гг., обобщения экспедиционных исследований этого периода приведено в работах [Виноградов и др., 1966; Филлипов, 1968]. С развитием вычислительных мощностей появлялись работы

по численному моделированию циркуляции Черного моря [Stanev, 1990; Коротаев и др., 2002], учитывающему бароклинную неустойчивость Основного черноморского течения (ОЧТ), вследствие которой появляются меандры и вихри. С 1999 по 2003 гг. проводился международный дрефтерный эксперимент, в результате которого тоже зафиксировано присутствие в Черном море интенсивных мезомасштабных вихрей [Журбас и др., 2004; Poulain et al., 2005]. Мезомасштабные антициклонические вихри диаметром в диапазоне 40–100 км, описанные в работах [Титов, 2002; Ginzburg et al., 2002; Кривошея и др., 2004], с которыми связан юго-восточный перенос над континентальным склоном, играют не менее важную роль, чем ОЧТ, в процессах водообмена между шельфом и открытым морем.

В **разделе 1.3** приведен обзор работ по черноморским апвеллингам. Апвеллинги хорошо изучены в отдельных районах Черного моря, особенно около побережья Крыма [Gawarkiewicz et al., 1999; Гинзбург и др., 1998; Джиганшин и др., 2010; Goryachkin, 2018]. Однако для прибрежной зоны северо-восточной части моря таких работ мало.

Субмезомасштабные процессы на шельфе Черного моря описаны в **разделе 1.4**. В северо-восточной части Черного моря вследствие сдвиговой неустойчивости течения вблизи берега, согласно работам [Кривошея и др., 1998; Korotaev et al., 1999; Ginzburg et al., 2002; Зацепин и др., 2011], возникают цепочки перемещающихся на северо-запад антициклонических вихрей между ОЧТ и берегом. Благодаря развитию технологий спутниковых измерений, по радиолокационным снимкам описана статистика и пространственные характеристики субмезомасштабных вихревых образований, размер которых составляет 2–10 км [Костяной и др., 2010; Лаврова и др., 2010].

В **Главе 2** приведено описание используемых данных. В ходе исследования были использованы данные контактных измерений температуры и течений на подспутниковом гидрофизическом полигоне ИО РАН с 2012 по 2017 гг., данные дистанционного зондирования, данные метеорологических

реанализов NCEP/CFSR и CFSv2, метеорологические данные с гидрометеорологической станции (ГМС), расположенной в г. Геленджике.

В разделе 2.1. описаны данные о температуре воды. В июле 2012 года напротив Голубой бухты на расстоянии  $\sim 1$  км от берега на глубине 22 м установлена термокоса, которая представляет собой гирлянду из 17 термодатчиков, расположенных на заякоренной буйковой станции с подповерхностной плавучестью. Датчики расположены на кабель-тросе, на равном расстоянии (0.8 м) друг от друга в диапазоне глубин 6–20 м. Датчики работали с интервалом 30–60 секунд. Похожая термокоса установлена на расстоянии  $\sim 6$  км от берега в апреле 2015 г. на глубине 86 м. Датчики расположены на глубинах от 7 до 63 м на расстоянии  $\sim 1.8$  м друг от друга. Подробное описание устройства и функционирования термокос представлено в работе [Очередник и др., 2018].

В разделе 2.2 описаны данные о течениях, полученные измерителями течений ADCP. С 2012 году на северо-восточном побережье Черного моря функционировали заякоренные донные ADCP, позволяющие получить скорость и направление течения в точке. Во время экспедиционных выездов измерения скорости течения также проводились с помощью буксируемого ADCP, обеспечивающего измерение вертикальных профилей течения в шельфовой зоне, и дрейфтерных запусков, позволяющих получить пространственную картину динамики вод в прибрежной зоне. На протяжении нескольких лет при непосредственном участии автора для проведения исследований по изучению динамики шельфовых вод создано около 30 дрейфтеров. Дрейфтер состоит из поплавка с закрепленным на нем GPS-приемником со встроенным GSM-модулем передачи данных, подводного паруса и груза (рис. 1). Соотношение надводной части к подводной составляет около 1/40, что обеспечивает сокращение влияния ветрового дрейфа до 5% от течения.

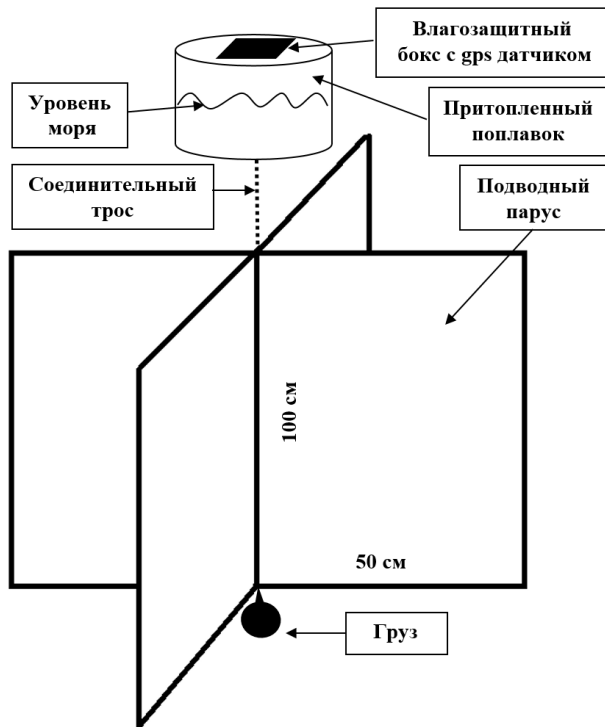


Рисунок 1. Конструкция дрейфтера

В разделе 2.3 описан многолетний архив данных ГМС Геленджика с временным разрешением 3 часа, позволивший в т. ч. провести анализ температуры поверхности моря для выявления случаев апвеллинга. В разделе 2.4 дана информация об использованных данных дистанционного зондирования Земли проектов NASA.

Глава 3 посвящена описанию характеристик конкретных случаев апвеллинга и особенностей прибрежной циркуляции во время экспедиционных исследований.

В разделе 3.1 описаны случаи апвеллингов, зафиксированные по данным заякоренных термокос. В большинстве случаев апвеллинги были неполными, т.е. подтермоклинные воды на поверхность не выходили.

Пример неполного апвеллинга в июле 2015 г. приведен на рисунке 2. Подъем вод с 17 по 20 июля был вызван интенсивным ветровым воздействием, но наличие мощного верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) и отсутствие

сильного юго-восточного (ЮВ) течения препятствовали поднятию глубинных вод до уровня верхнего датчика термокосы.

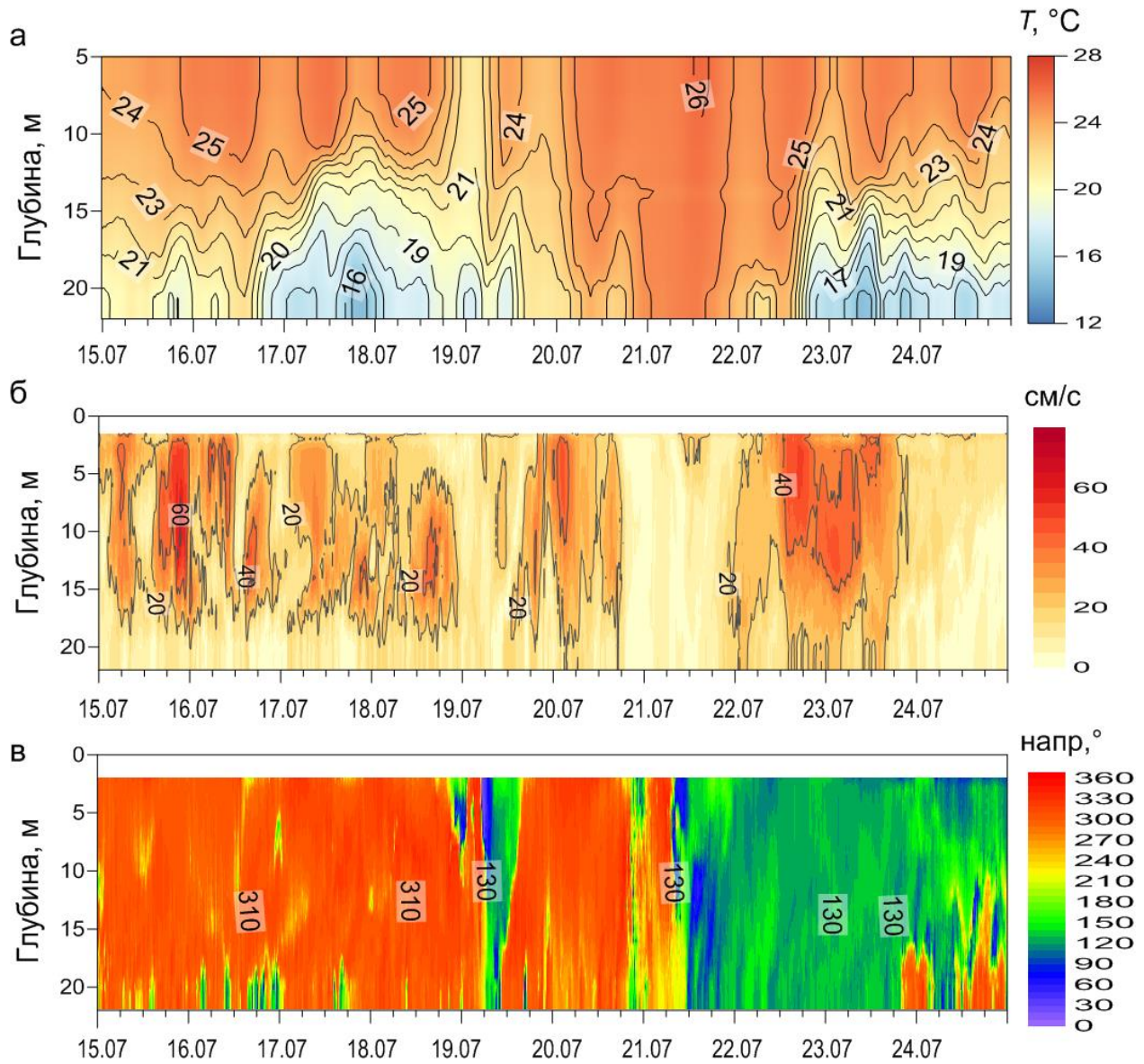


Рисунок 2. Данные наблюдений с 15 по 25 июля 2015 г.: (а) вертикальное распределение температуры воды по данным термокосы; (б) модуль скорости течения по данным донного ADCP; (в) направление скорости течения по данным донного ADCP

Позже, 22 июля, со сменой течения на ЮВ зафиксировано начало еще одного неполного апвеллинга, связанного не только с ветровым воздействием, но и с интенсивным ЮВ течением (скорость течения более 40 см/с).

Всего в 2012–2017 гг. в теплый период года отмечено более 50 случаев апвеллинга. Из них 5 случаев можно назвать полными апвеллингами, при которых присутствие глубинных вод с температурой 10–12°C было зафиксировано на верхнем датчике температуры термокосы. Установлено, что события полного апвеллинга происходят не каждый год и чаще приурочены к раннему лету (май–июнь) или осени (сентябрь–октябрь). В точке расположения заякоренной станции колебания направления вдольберегового течения вызывают вертикальные колебания верхней границы термоклина, иногда с амплитудами 10 м и более. Они являются одной из основных причин частого (2–3 раза в месяц) возникновения неполного апвеллинга.

В разделе 3.2 сделано обобщение зафиксированных по данным термокосы случаев апвеллинга, а также описаны результаты расчета коэффициентов корреляции между скоростью ветра, скоростью течения и температурой воды для 2013 г. и результаты расчетов потока тепла из океана в атмосферу для 2013 г.

Анализ данных измерений термокосы с мая по ноябрь показывает, что события неполного апвеллинга часто повторяются и далеко не всегда совпадают с событиями апвеллингового ветра. Полный апвеллинг обычно реализуется при наличии обоих факторов: северо-западного ветра и юго-восточного течения. При прекращении действия ветра апвеллинг релаксирует. Скорость его релаксации значительно увеличивается при изменении вдольберегового течения на северо-западное. При этом развивается даунвеллинг.

Апвеллинг также может быть зафиксирован при воздействии сильных стгонных ветров (например, новороссийской боры в исследуемом районе) или вследствие прохождения береговых захваченных волн (БЗВ) и вихревых образований. На рисунке 3 приведена схема, обобщающая возможные причины возникновения апвеллинга в исследуемом регионе.

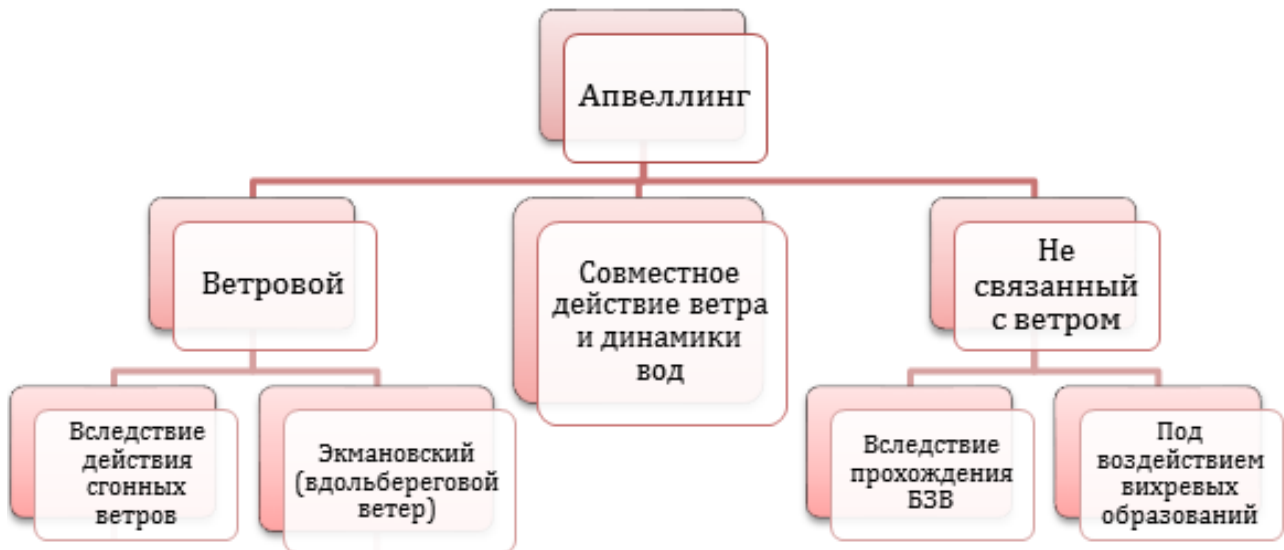


Рисунок 3. Генезис апвеллинга в СВ части Черного моря

Нижняя граница термоклина подвержена колебаниям, которые зависят от изменчивости динамики вод, и экмановский перенос не всегда может сгенерировать полный апвеллинг. Если момент поднятия термоклина совпадает с интенсивным ветровым воздействием, то мы увидим холодную воду на поверхности, если же эти моменты разнесены по времени, то мы сможем зафиксировать лишь неполный апвеллинг, т.к. толщина ВКС будет значительно больше.

В разделе 3.3 описываются особенности локальной циркуляции вод. По данным дрейферных запусков в 2013, 2015 и 2016 гг. подтверждено наличие субмезомасштабных антициклонов, а также установлено, что время их жизни в исследуемом районе не превышает нескольких суток.

По данным буксировки ADCP в сентябре 2013 г. (см. рис. 4) предположительно определено наличие нескольких антициклонических и циклонических вихревых структур, которые вследствие диссипации энергии выродились в затухающий диполь.

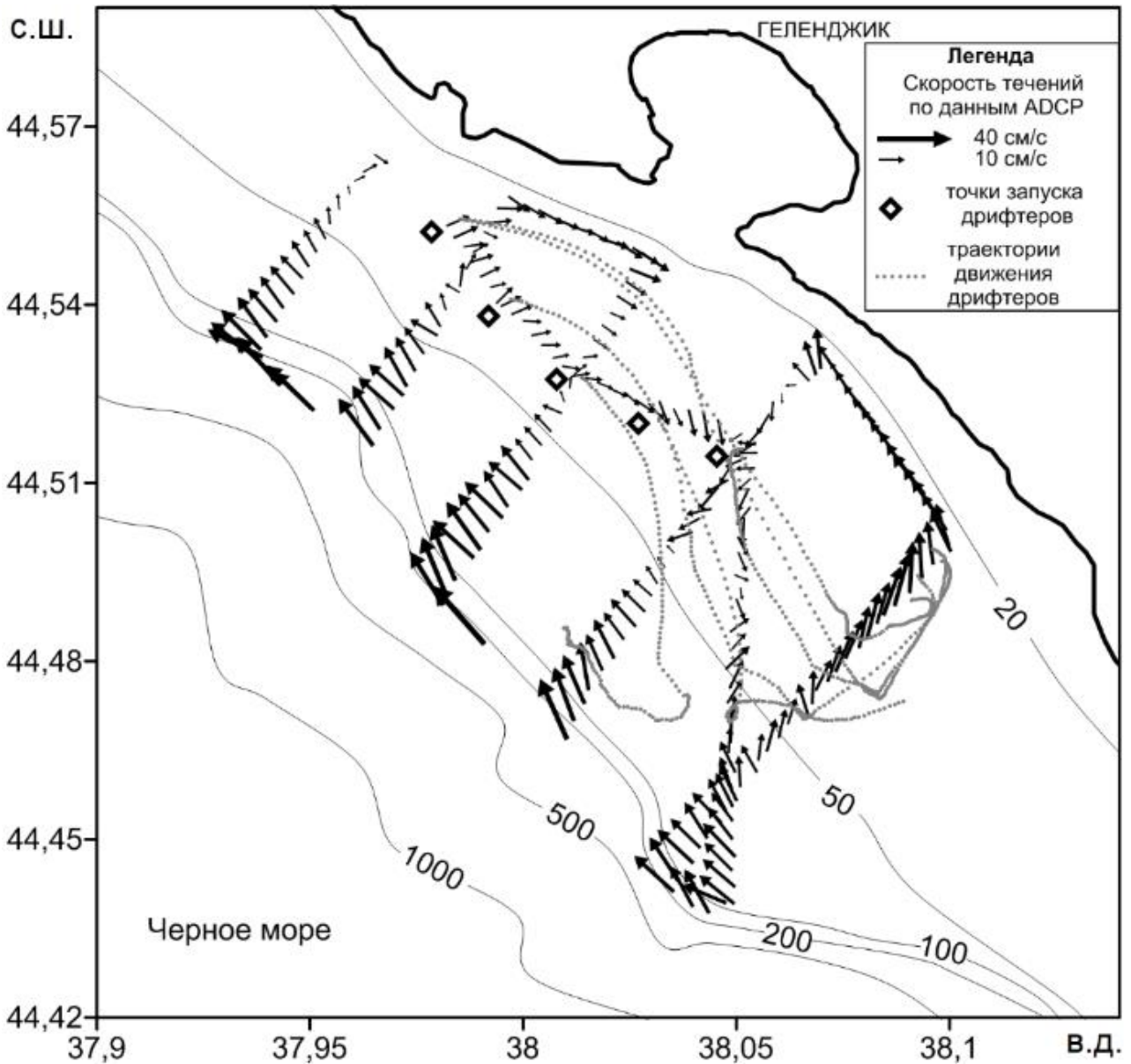


Рисунок 4. Дрифтерный запуск и данные буксировки ADCP в сентябре 2013 г.

По траекториям дрейфтеров видно (рис. 4), что сначала движение было параллельно-струйным на ЮВ (со скоростями 15–20 см/с), а потом дрейфтеры разошлись на значительное расстояние друг от друга и скорость их перемещения резко снизилась до 2–3 см/с.

По данным дрейфтеров 3 июля 2014 г. был зафиксирован ЮВ поток, который может возникать на периферии мезомасштабных антициклонов. Такие вихревые образования часто формируются в летний период из-за ослабления экмановской накачки и меандрирования ОЧТ [Зацепин и др., 2010]. Наличие крупного антициклонического вихря у новороссийского побережья

подтвердилось по данным спутниковых измерений в поле хлорофилла «а». По данным дрейферного запуска средние скорости течения в поверхностном слое до 1.5 м составили 45 см/с, а на глубинах 4–5 м – 37 см/с.

По данным термоксы в этот период были зарегистрированы вертикальные движения термоклина (рис. 5). Установлено наличие неполных апвеллингов в периоды 1–2, 3–6 и 7–8 июля.

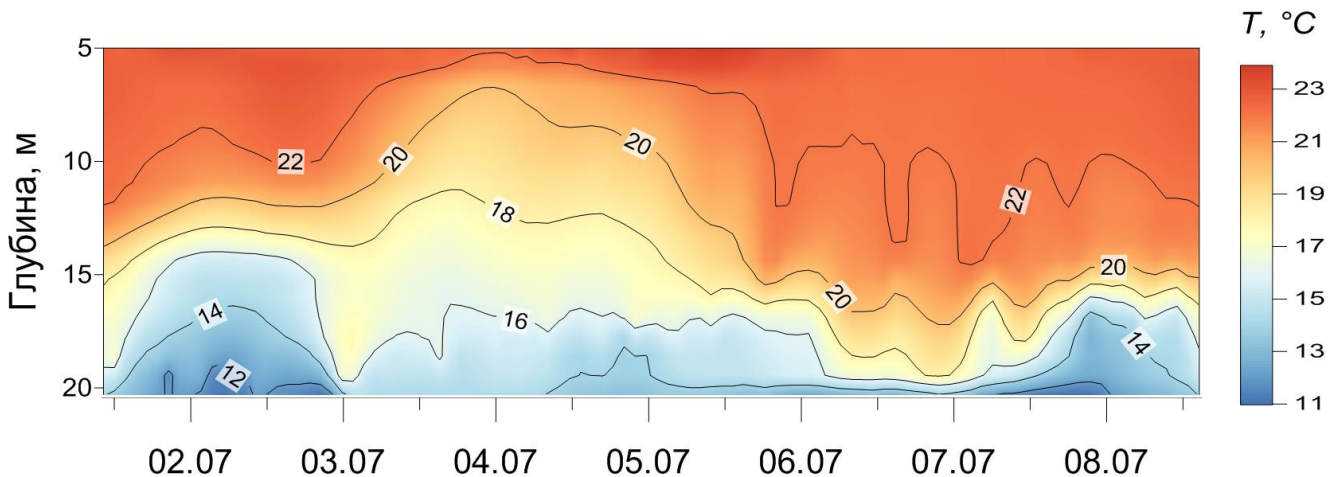


Рисунок 5. Вертикальное распределение температуры воды по данным термоксы с 1 по 8 июля 2014 г.

При анализе событий прибрежного апвеллинга надо принимать во внимание возможность локального подъема холодных вод, вызванного наличием вихревых образований в районе исследования, а также переноса холодных вод вдольбереговым течением.

В **Главе 4** рассмотрена повторяемость ветровых апвеллингов в северо-восточной части Черного моря.

**Раздел 4.1** посвящен методике расчета и верификации критерия развития прибрежного экмановского апвеллинга.

Критерий развития полного ветрового (экмановского) апвеллинга предложен для анализа ветровых апвеллингов и представляет собой выражение:

$$R_u = \tau_{yt}/f\rho_w HR_d.$$

Здесь:  $\tau_y$  – вдольбереговая составляющая напряжения трения ветра,  $t$  – время квазистационарного действия апвеллингового ветра,  $f$  – параметр Кориолиса,  $\rho_w$  – плотность морской воды,  $H$  – толщина верхнего квазиоднородного слоя,  $R_d$  – локальный бароклинный радиус деформации Россби. Система координат развернута на  $50^\circ$  против часовой стрелки, и вдольбереговой компоненте соответствует  $\tau_y$  (отрицательной принята скорость северо-западного ветра, создающего дрейфовый перенос от берега).

В разделе 4.2 приведены результаты совместного анализа значений критерия апвеллинга для зафиксированных случаев апвеллинга.

Например, к 16 августа 2016 г. критерий апвеллинга достигает значения -1.26 (рис. 6). В термической структуре по данным термоксы, заякоренной на 85 м, вода с температурой  $10^\circ\text{C}$  поднялась до 30 м, а на верхнем горизонте температура воды опустилась с  $27^\circ\text{C}$  до  $21.7^\circ\text{C}$ .

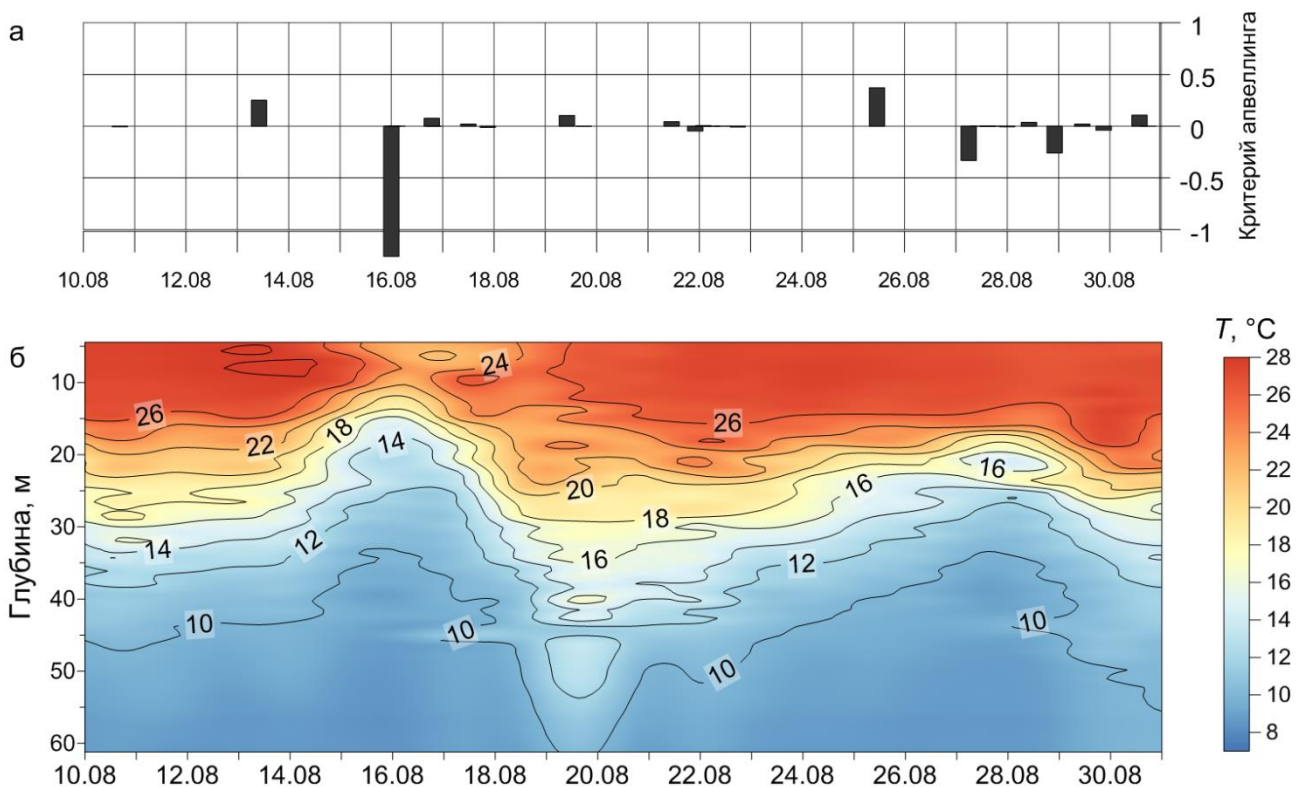


Рисунок 6. Вертикальное распределение температуры воды (б), и соответствующие значения критерия апвеллинга (а) – для периода с 10 по 30 августа 2016 г.

В результате анализа всех зафиксированных случаев апвеллинга получена некоторая характеристика данных процессов в исследуемом районе (табл. 1). Выделено несколько типов апвеллингов в соответствии со значениями критерия  $R_u$  и данными о динамике вод. 40% зафиксированных апвеллингов характеризовались высокими абсолютными значениями критерия  $R_u$  и сильными ЮВ течениями, в т. ч. полные апвеллинги. Для 22% случаев критерий апвеллинга составлял от -0.5 до -0.2, однако именно для таких случаев было также характерно длительное воздействие ветра при средних скоростях ЮВ течения. В 14% случаев изменения температуры на нижнем датчике, свидетельствующие о вертикальных движениях термоклина, приурочены к событиям, связанным со сменой направления вдольберегового течения, которая может объясняться прохождением субмезомасштабных вихрей или топографических волн.

Таблица 1. Характеристика апвеллингов в северо-восточной части Черного моря по данным 2012–2016 гг.

Критерий экмановского апвеллинга $R_u$	Направление и скорость течения	Изменения $T$ на глубине 18 м	% от общего количества
Менее -0.5 (в т. ч., менее -1)	ЮВ >30 см/с	>7°C	40 % (в т. ч., полные апв.)
От -0.5 до -0.2	ЮВ около 20 см/с	4–7°C	22 %
От -0.2 до 0.1	знакопеременные	3–7°C	14 %
От -0.2 до 0.1	ЮВ, 20–30см/с	1–5°C	11 %
От -0.2 до 0.1	ЮВ, 30–50 см/с	3–4°C	9 %
Менее -0.6	10–20 см/с	2–3°C	4 %

Для определения межгодовой и сезонной изменчивости по данным реанализа проведены расчеты критерия апвеллинга с временным шагом 1 час с 1979 по 2016 гг. Всего за исследуемый период было зафиксировано около 120 случаев, когда критерий апвеллинга  $R_u < -1$ . Проведен анализ сезонного

распределения событий, когда критерий апвеллинга по абсолютным значениям достигал порогового значения (рис. 7).

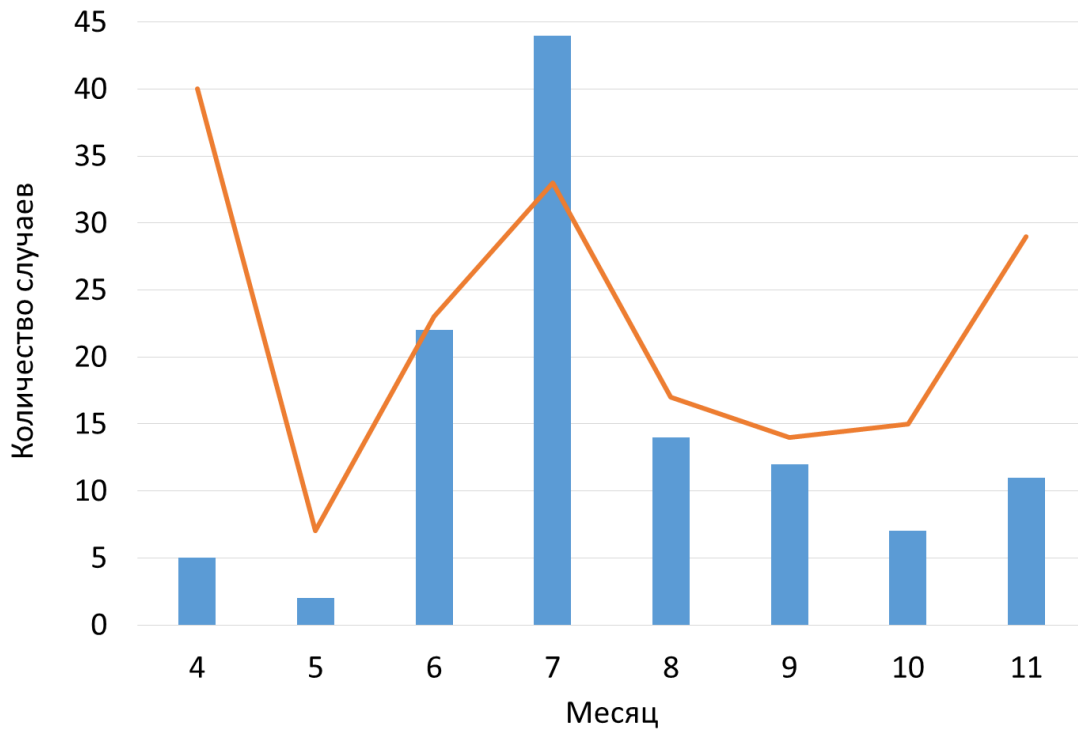


Рисунок 7. Сезонное распределение повторяемости событий для периода 1979–2016 гг., когда  $R_u < -1$  (синие столбцы) и когда, благодаря экмановской накачке, вода могла подняться на 10 м и более (оранжевая линия)

Максимальное число таких событий происходит в июле месяце (около 38%). Также проанализировано сезонное распределение экмановского переноса, максимальные значения которого приурочены к началу весны и к осени. Значительный экмановский перенос в апреле и ноябре не приводит к увеличению количества событий, когда  $R_u < -1$ , т. к. в эти месяцы средние значения толщины ВКС более 20 метров. На рисунке 7 помимо количества случаев апвеллинга отражено количество случаев, когда вертикальный перенос, благодаря экмановской накачке, составил 10 метров и более. Таким образом, если в весенний или осенний период, толщина ВКС меньше средних значений, вероятность возникновения ветрового апвеллинга довольно высока.

По данным расчета критерия экмановского апвеллинга установлено, что межгодовая изменчивость событий экмановского прибрежного апвеллинга высока (рис. 8).

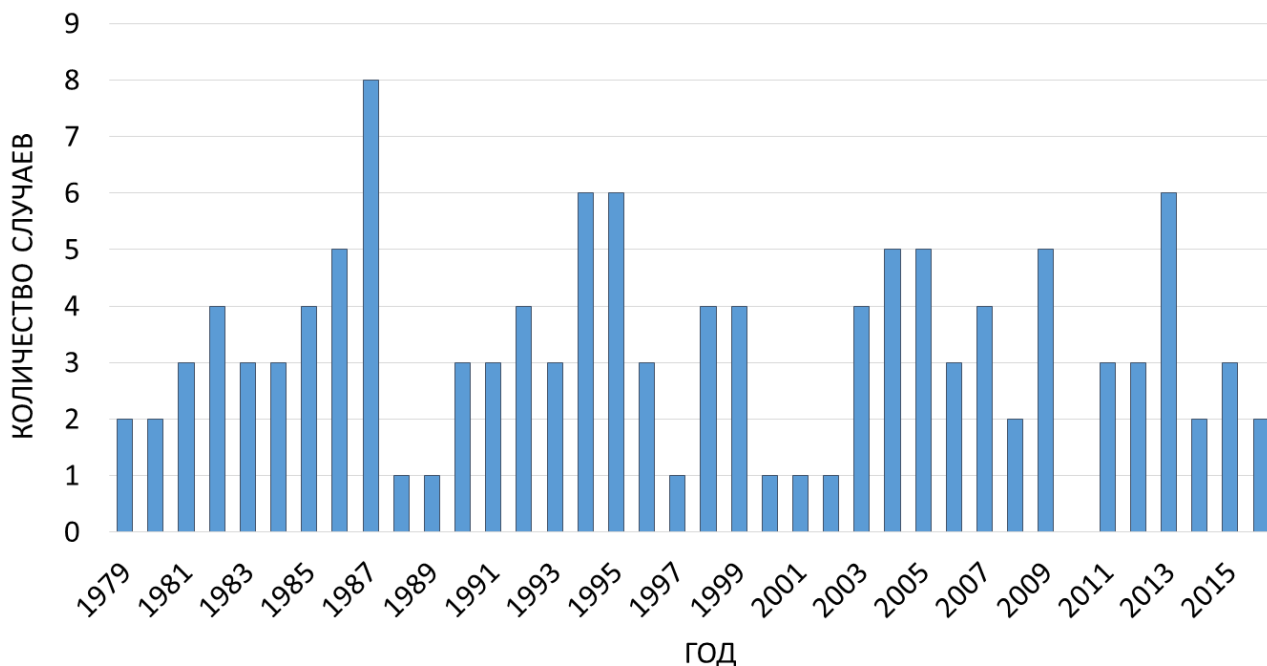


Рисунок 8. Межгодовая изменчивость событий, для которых  $Ru < -1$

Среднее количество экмановских апвеллингов в год составляет около 3 событий. За весь период вычислений лишь однажды, в 2010 г., не было зарегистрировано ни одного события с  $Ru < -1$ . Минимальное количество (1 случай) было зафиксировано в 1988, 1989, 1997, 2000, 2001, 2002 гг. Максимальное число случаев 8 – в 1987 году; 5–6 случаев регистрировались в 1995, 1996, 2004, 2009, 2013 гг.

**В Заключение** сформулированы основные результаты диссертации.

1. Обработаны и проанализированы данные о вертикальном распределении температуры воды и вертикальном распределении характеристик течения, выявлены события апвеллинга. Установлено, что апвеллинги в северо-восточной части Черного моря бывают полные и неполные. Описаны особенности выявленных событий. При неполных апвеллингах значительных изменений температуры на морской поверхности не происходит. Однако на нижних термодатчиках (на глубинах более 10 м) в зависимости от интенсивности события, регистрируется температура, меньшая приповерхностной на 2–14°C.

2. Проведена оценка различных факторов, вызывающих апвеллинг, в т. ч. локальной динамики вод по данным ADCP. Показано, что основной механизм, вызывающий полный апвеллинг, – продолжительный (более суток) ветер северо-западного направления совместно с ЮВ течением (более 30 см/с). При воздействии одного из указанных факторов может наблюдаться только неполный апвеллинг.
3. Разработана методика проведения дрейфтерных экспериментов, проведено более 20 дрейфтерных запусков. Выполнен анализ полученных траекторий дрейфтеров и описаны особенности циркуляции данного региона. Подтверждено наличие субмезомасштабных антициклонических вихрей и уточнены их параметры. Показано, что при интерпретации данных буксируемого ADCP, необходимо учитывать продолжительность съемки и уточнять пространственную картину циркуляции по спутниковым или дрейфтерным данным. Также по данным дрейфтерного запуска в сентябре 2014 г. зафиксирован случай прохождения БЗВ.
4. Предложен простой критерий развития полного экмановского апвеллинга. Разработана методика его расчета, основанная на использовании данных о касательном напряжении ветра (реанализы NCEP/CFRSR, CFSv2) и толщины ВКС. Написан блок программ для расчета критерия. При сравнительном анализе с архивными данными ГМС Геленджика установлено, что 88 случаев апвеллинга (из 120 за исследуемый период), определенных по данным расчета критерия, согласованы с уменьшением температуры воды на поверхности. В 51 случае падение температуры воды на поверхности составило более 5°C. В некоторых случаях, когда критерий апвеллинга не достигал порогового значения, но был довольно высоким по абсолютным значениям, также фиксировались изменения температуры морской поверхности.
5. Впервые выполнен анализ сезонной и межгодовой изменчивости полных апвеллингов за продолжительный период с 1979 по 2016 гг. В среднем полные ветровые апвеллинги могут проявляться 3 раза в год, чаще всего в июне-июле. Выявлена сильная межгодовая изменчивость, не связанная с индексами

глобальной атмосферной циркуляции. Показано, что в случаях, когда толщина ВКС меньше среднегодовой в апреле и ноябре, вероятность возникновения апвеллинга возрастает, т.к. весной и осенью по данным расчета зафиксированы высокие значения экмановской накачки.

В **Приложении** приводится код программ на языке Fortran 90, используемых для расчета критерия экмановского апвеллинга.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Мысленков С.А., Зацепин А.Г., **Сильвестрова К.П.**, Баранов В.И. Использование дрейфующих буев и буксируемого профилографа для исследования течений на шельфе Черного моря // Вестник Московского университета. – Серия 5: География. – 2014. – № 6. – С. 73–80.
2. **Сильвестрова К.П.**, Краюшкин Е.В., Мысленков С.А. Анализ данных дрейфующих буев и буксируемого профилографа течений на подспутниковом полигоне в Черном море // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12. – № 3. – С. 171–184.
3. **Сильвестрова К.П.**, Мысленков С.А., Зацепин А.Г., Краюшкин Е.В., Баранов В.И., Самсонов Т.Е., Куклев С.Б. Возможности использования GPS–дрифтеров для исследования течений на шельфе Черного моря // Океанология. – 2016. – Т. 56. – № 1. – С. 159–166.
4. Зацепин А.Г., **Сильвестрова К.П.**, Куклев С.Б., Пиотух В.Б., Подымов О.И. Наблюдение цикла интенсивного прибрежного апвеллинга-даунвеллинга на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море // Океанология. – 2016. – Т. 56. – № 2. – С. 203–214.
5. **Сильвестрова К.П.**, Зацепин А.Г., Мысленков С.А. Прибрежные апвеллинги в геленджикском районе Черного моря: связь с ветровым воздействием и течением // Океанология. – 2017. – Т. 57. – № 4 – С. 521–530.
6. **Silvestrova K.**, Myslenkov S., Zatsepin A. Variability of Wind-Driven Coastal Upwelling in the North-Eastern Black Sea in 1979–2016 According to NCEP/CFSR Data // Pure and Applied Geophysics. – 2018. – Vol. 175. – P. 4007–4015.

*Опубликованные тезисы докладов:*

1. **Silvestrova K.** Short-term variability of water structure in coastal areas of the Black and Baltic seas // 3-rd International Conference on the Dynamics of Coastal Zone of Non-Tidal Seas, Russia, Gelendzhik, Russia. – 2014. – P. 204–206.

2. **Сильвестрова К.П.**, Мысленков С.А., Зацепин А.Г., Краюшкин Е.В., Баранов В.И. Использование дрейфующих буев для исследования течений на шельфе Черного моря // XIV Международная научно-техническая конференция «Современные методы и средства океанологических исследований» (МСОИ-2015). – 2015. – С. 19–23.
3. Зацепин А.Г., Баранов В.И., Куклев С.Б., Мельников В.А., Пиотух В.Б., Подымов О.И., **Сильвестрова К.П.**, Станичный С.В. Предварительные результаты исследования прибрежных апвеллингов и даунвеллингов на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море // XIV Международная научно-техническая конференция «Современные методы и средства океанологических исследований» (МСОИ-2015). – 2015. – С. 27–30.
4. **Сильвестрова К.П.**, Мысленков С.А., Зацепин А.Г., Баранов В.И. Использование дрейфующих буев и буксируемого профилографа течений ADCP на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море (г. Геленджик) // Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования. – 2016. – С. 575–579.
5. **Silvestrova K.**, Myslenkov S., Zatsepin A., Baranov V. Surface GPS-drifters for study coastal water dynamics in the Black sea. Results and experience from 2013 to 2015 year // EMECS 11 - Sea Coasts XXVI. Joint conference. Managing risks to coastal regions and communities in a changing world. ABSTRACT BOOK. – 2016. – P. 169.
6. **Сильвестрова К.П.**, Зацепин А.Г. Характеристика апвеллингов в северо-восточной части Черного моря около Геленджика с 2013 по 2015 гг. // Комплексные исследования Мирового океана. – 2017. – С. 259–264.
7. **Сильвестрова К.П.**, Мысленков С.А., Зацепин А.Г. Результаты дрейфтерных экспериментов на гидрофизическом полигоне ИО РАН (Геленджик) в 2016 году // Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2017). – 2017. – С. 35–38.
8. **Silvestrova K.** Coastal upwelling in Gelendzhik area of the Black sea: wind and dynamics influence // EGU General Assembly Conference Abstracts. – 2017. – T. 19. – P. 1074.
9. **Сильвестрова К.П.** Повторяемость ветровых апвеллингов в районе г. Геленджик по данным реанализа за период с 1979 по 2016 год // Процессы в геосредах. – № 3(17). – 2018. – С. 309–310.
10. **Сильвестрова К.П.**, Очередник В.В. Изучение пространственных особенностей процессов апвеллинга и даунвеллинга на черноморском гидрофизическом полигоне ИО РАН по данным заякоренных термокос // Материалы молодежной научной конференции "Морские исследования и рациональное природопользование" – 2018. – С. 165.