

## Гидрофизические процессы вблизи подводной горы Ампер по измерениям *in situ* и спутниковым данным

В. А. Мельников

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия  
E-mail: [vmelnikov@ocean.ru](mailto:vmelnikov@ocean.ru)

Даётся описание многомасштабных гидродинамических процессов, развивающихся в акватории вблизи подводной горы Ампер в Северо-Восточной Атлантике. Интерпретация процессов основана на совместном анализе данных гидрофизических измерений, полученных в январе–феврале 1985 г. в ходе экспедиции Института океанологии АН СССР (ИОАН) на борту научно-исследовательского судна «Рифт» (5-й рейс), и современных спутниковых данных. В экспедиции были выполнены разрезы при помощи буксируемого зонда STD (*англ.* Conductivity, Temperature, Depth), гидрологические измерения на якорной стоянке судна на банке Ампер, измерения скорости течений на буйковой станции. Использовались материалы измерений некоторых других экспедиций, состоявшихся в районе горы Ампер. Рассматривались также спутниковые массивы данных температуры поверхности океана Pathfinder SST (*англ.* Sea Surface Temperature); многолетние ряды уровня моря и геострофической скорости AVISO (*англ.* Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data), SSH (*англ.* Sea Surface Height); данные мирового банка гидрологических станций WOD 13 (*англ.* World Ocean Database 2013); а также глобальная модель рельефа дна ETOPO 2022 (*англ.* Earth TOPOgraphy 2022) с разрешением 15 дуговых секунд. Показано, что сложные гидрологические поля в окрестности подводной горы Ампер обусловлены многомасштабными процессами в области восточной ветви Азорского течения. На поверхности океана наблюдается крупномасштабный дрейф со скоростью  $\sim 5,54 \pm 0,05$  см/с преимущественно на восток. В области смещения субтропических вод и вод умеренных широт развиваются разнообразные по формам и размерам меандры и вихри. Плотность кинетической энергии геострофических течений составляет в среднем  $87 \pm 1$  эрг/см<sup>3</sup>. Спорадически, по невыясненной причине, возникают вспышки течений, в которых энергия возрастает почти на порядок (до 610 эрг/см<sup>3</sup>). Выделяются три группы циклических колебаний течений: многолетние, годовые и внутrigодовые, а также хаотическая фоновая составляющая колебаний. Отмечается существенная перемежаемость по мощности и частоте всех перечисленных составляющих. По данным контактных измерений, в субсиноптическом диапазоне масштабов обнаружены: локальный фронт, с течением вдоль него; дипольные вихри размером  $\sim 15$ –30 км; волнообразные структуры с длиной волны  $\sim 12$ –8 км в южном секторе горы; мозаичное поле плотности над горой с масштабом пятен порядка размера банки  $\sim 10$ –12 км, а также скачки температуры над банкой. Предлагается следующая схема гидрофизических процессов, развивающихся в окрестности банки Ампер. В зимний сезон в результате предположительно метеорологического воздействия может образовываться локальный фронт, дающий начало среднему южному течению скоростью  $\sim 30$  см/с. За банкой, вниз по течению, возникают препятственные внутренние волны с предельной длиной, которая близка к масштабу развёртки течением инерционного колебания. Дипольные субсиноптические вихри образуются вследствие фронтальной неустойчивости. Приливные течения вызывают смещения фронтальной границы, что проявляется в виде температурных полусуточных колебаний большой амплитуды. Непосредственно над банкой приливные течения выносят вдоль склонов горы на её вершину холодные глубинные воды. В результате над подводной горой формируется особенное мозаичное поле гидрологических параметров и наблюдаются скачки температуры, за которыми следуют пакеты высокочастотных 20-минутных колебаний.

**Ключевые слова:** подводная гора Ампер, Азорское течение, спутниковые данные, гидрологический фронт, приливные течения, температурные скачки, пакеты 20-минутных колебаний температуры, препятственные внутренние волны

Одобрена к печати: 03.12.2024  
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-221-234

## Введение

После фундаментального открытия в 1970 г. синоптических вихрей, в период 1970–1998 гг., по инициативе руководства Института океанологии им. П. П. Ширшова АН СССР (далее ИОАН) был проведён ряд крупных гидрофизических экспедиций, направленных на исследование закономерностей мезомасштабных возмущений в океане. В частности, выяснялись различия в параметрах вихревого поля в западной и восточной части океанов, в верхнем слое и в глубине океана, а также изучались механизмы генерации мезомасштабных возмущений при обтекании многомасштабными течениями разнообразных видов рельефа дна океана (Иванов и др., 1977). В связи с этим представляли интерес акватории над Срединно-Атлантическим хребтом (САХ) вдали от крупномасштабных течений главной океанической циркуляции, отдельные подводные горы и, для сравнения, фоновая гидрология вод над абиссальными котловинами. В этом отношении привлекала внимание подводная гора Ампер. С одной стороны, эта гора представляет собой изолированную топографическую особенность посреди глубокого океана, возвышаясь почти до поверхности моря, на 4000 м над дном абиссальной равнины Подкова (*англ.* Horseshoe). С другой стороны, гора Ампер находится в восточной части Субтропического круговорота Северной Атлантики, в области Азорского фронта (далее АФ) с повышенной многомасштабной динамикой вод. В таком районе можно было бы ожидать увидеть выраженные гидродинамические эффекты при различного рода обтеканиях разнообразных неоднородностей рельефа дна. Поэтому под идейным руководством проф. Ю. А. Иванова и проф. А. Н. Парамонова в январе – феврале 1985 г. была проведена экспедиция ИОАН на борту научно-исследовательского судна (НИС) «Рифт» (5-й рейс) по измерению гидрофизических полей над подводной горой Ампер (Гамсахурдия и др., 1990). В результате этих работ над горой было обнаружено особенное «мозаичное» поле гидрофизических параметров с характерным масштабом пятен ~6–7 морских миль, что соответствует размеру верхней площадки на вершине горы. Было показано, что гидрологическая структура окружающих гору поверхностных вод обусловлена адвекцией полусуточными приливными течениями среднего поля по нормали к локальному фронтальному разделу над горой и, одновременно, подъёмами глубинных вод по склонам горы. При этом в результате выноса холодных вод на банке Ампер (главная вершина горы Ампер с глубиной 55 м) с периодичностью полусуточного прилива наблюдались скачки температуры типа внутреннего бора.

Однако, вследствие ограничений на дорогое судовое время, остались вопросы в отношении интерпретации обнаруженных локальных гидрологических особенностей и их взаимосвязей с крупномасштабной динамикой вод. В настоящее время с каждым годом возможности изучения многомасштабных гидрофизических процессов существенно расширяются благодаря накоплению спутниковых данных. В связи с этим задача настоящей статьи состоит в воссоздании количественного представления о многомасштабных гидрофизических процессах в области подводной горы Ампер с добавлением доступной в настоящее время спутниковой и другой архивной информации.

## Измерения и данные

Интерпретация гидродинамических процессов над подводной горой Ампер (*рис. 1*, см. с. 223) основана на совместном анализе данных гидрофизических измерений, проведённых в январе – феврале 1985 г. в ходе экспедиции ИОАН на НИС «Рифт» (5-й рейс) (Гамсахурдия и др., 1990), современных спутниковых данных (Melnikov, 2009), а также информации из архива мирового банка гидрологических станций WOD 13 (*англ.* World Ocean Database 2013, <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD13/>).

Удобным и экономичным средством контактных измерений сложных океанологических полей за сравнительно короткое время и на максимально возможной акватории являются системы буксируемых датчиков в сочетании с измерениями по времени в избранных точках поля при помощи заякоренных автономных буйковых станций. Такая методика была применена в 5-м рейсе НИС «Рифт».

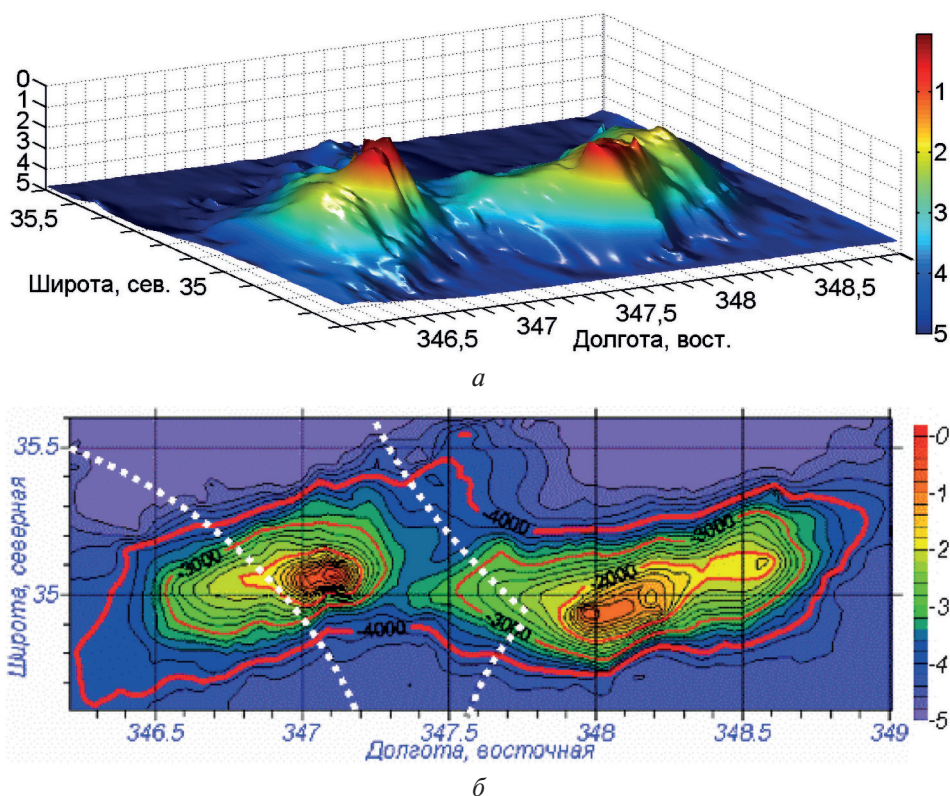


Рис. 1. Топография подводных гор Ампер и Корал-Патч: *а* — изометрический вид; *б* — изолинии глубины океана (в м), красная линия — изобата 4000 м, белые пунктирные линии — границы исключительных экономических зон (англ. Exclusive economic zones — EEZ) Португалии и Марокко. Цветовая шкала глубин (в км). Модель рельефа дна океана ETOPO (англ. Earth TOPOgraphy) (Smith, Sandwell, 1997)

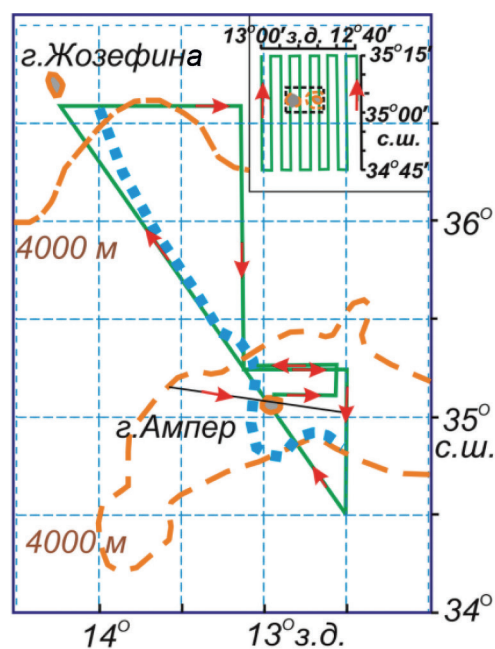
В период с 24 января по 5 февраля 1985 г. в течение десяти суток были выполнены гидрологические буксировки в верхнем однородном слое, вертикальные зондирования в слое 0–500 м, измерения в течение трёх суток на главной вершине двуглавой горы Ампер с борта заякоренного судна, измерения скорости течений на протяжении девяти суток на буйковой станции, установленной в проливе между двумя горами Ампер. Структура гидрологических полей в окрестности горы измерялась при помощи буксируемого зонда STD (англ. Conductivity, Temperature, Depth) с разрешением по горизонтали 200–250 м, с отсчётами через 48 с на полном ходу судна (10 узлов). По вертикали дискретность составила 0,5 м с отсчётами через 1,6 с. Подробно обследована площадка 30×25 морских миль, в центре которой расположена банка Ампер. На этой акватории были выполнены одиннадцать «челночных», параллельных друг другу галсов, ориентированных вдоль меридианов, начиная с 12° 40' з.д. В конце каждого галса судно переходило на 2,5 мили к западу. Зондирования по вертикали были проведены в точках пересечения галсов с 34° 45', 35° 03', 35° 15' с.ш. (рис. 2, врезка, см. с. 224).

С целью определения фоновых гидрологических условий выполнены измерения на нескольких протяжённых галсах: от горы Ампер к югу, до границы исключительной экономической зоны Марокко, и к северу, через абиссальную котловину Подкова к подводной горе Жозефина (см. рис. 2).

На якорной стоянке судна на банке Ампер в течение трёх суток, начиная 27 января 1985 г. с 16:00, в двух близко расположенных точках на банке, а также в дрейфе, вблизи буйковой станции, определялся временной ход гидрологических параметров с дискретностью 48 с. В проливе между вершинами с глубиной ~450 м на двух горизонтах 195 и 350 м на протяжении девяти суток в конце января 1985 г. на заякоренной буйковой станции были выполнены измерения скорости течений с дискретностью 15 мин.



Рис. 2. Схема измерительного полигона. Измерения выполнены STD-зондом с 24 января по 5 февраля 1985 г. вблизи подводной горы Ампер. Зелёные линии — галсы НИС «Рифт», красные стрелки указывают их направление. На врезке — схема «челночных» галсов над банкой Ампер. Положение гидрологического фронта между горами Ампер и Жозефина показано синей пунктирной линией, коричневые штриховые линии — изобаты схематичного рельефа дна



Использовались также материалы некоторых других экспедиций, состоявшихся в районе горы Ампер. Вследствие своей уникальности контактные измерения представляют в настоящее время значительную ценность как для привязки к спутниковой информации, так и для калибровки спутниковых данных.

Измерения *in situ* были дополнены спутниковыми данными температуры поверхности океана (ТПО) Pathfinder v. 5 SST (англ. Pathfinder Version 5 Sea Surface Temperature) (<http://oceanwatch.pfeg.noaa.gov/>) на сетке 4×4 км с дискретностью 5 сут в период с 2 сентября 1981 г. по настоящее время; ежесуточными значениями уровня моря и геострофической скорости на поверхности моря AVISO (англ. Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data) (<http://atoll-aviso.vlandata.cls.fr:41080/thredds/dodsC/>) на сетке 15×15 дуговых минут в период с 1 января 1993 г. по настоящее время; данными мирового банка гидрологических станций WOD 13 (<https://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD13/docwod13.html>). Рельеф дна океана в исследуемом районе строился на сетке с шагом 15 дуговых секунд по данным глобальной модели поверхности Земли ETOPO 2022 (<https://www.ncei.noaa.gov/products/etopo-global-relief-model>), разработанной на основе сочетания спутниковых измерений поверхности геоида и эхолотных промеров (Smith, Sandwell, 1997).

### Влияние подводных гор на гидрологические условия

Подводные горы широко распространены в Мировом океане и оказывают разнообразное влияние на многомасштабные течения в океане (от крупномасштабных до приливных), изменяют вертикальную скорость тока воды и среднюю стратификацию (Roden, 1987). В результате гидродинамических процессов обтекания вокруг подводных гор создаются особенные условия (Vlasenko et al., 2013). По данным немногочисленных экспедиций было установлено, что акватории подводных гор, как правило, отличаются повышенной динамической активностью, биологическим разнообразием и продуктивностью. Вокруг гор создаются так называемые горячие точки (англ. hotspots) динамической интенсивности и морской жизни (Lavelle, Mohn, 2010; Morato et al., 2010). Резкие изменения глубины океана проявляются в толще вод и на поверхности моря по увеличенной дисперсии колебаний гидрофизических параметров. Соответственно, и пространственная структура океанографических полей усложняется (Голубев, Черкесов, 1985). В таких районах обнаруживаются специфические возмущения фоновых течений (Монин и др., 1989), включая вторичную циркуляцию, наподобие колонн Тейлора, разнообразные вихревые системы, апвеллинги и купола холодных вод (Lavelle, Mohn, 2010). Отмечается усиление баротропных и бароклинных приливных колебаний, фона внутренних волн, повышенное перемешивание вод и рост энергии турбулентных пульсаций (Голубев, Черкесов, 1985; Lavelle, Mohn, 2010).

## Фоновые гидрологические условия в регионе цепи подводных гор Подкова

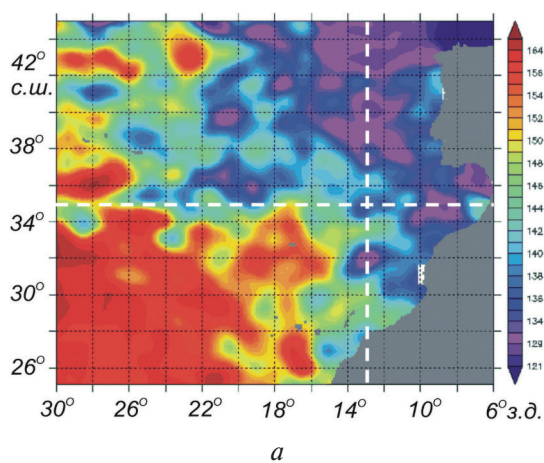
Подводная гора Ампер расположена в 360 морских милях к западу от Гибралтара (примерно на полпути между островом Мадейра и материковой частью Португалии) и представляется одним из девяти недействующих вулканов, составляющих изогнутую в виде подковы цепь подводных гор под названием Подкова. Гора Ампер находится на южном фланге цепи, а подводная гора Жозефина — на северном. Эти вулканы были сформированы вдоль линии соприкосновения Европейско-Азиатской и Африканской литосферных плит ~10–17 млн лет назад (поздне-среднемиоцен) в Азоро-Гибралтарской зоне разломов. Гора Ампер поднимается с глубин абиссальной равнины Подкова (глубина океана ~4800 м) до небольшого плато на вершине с глубиной в среднем ~110 м (см. *рис. 1*). Эту площадку часто называют банкой Ампер, так как здесь минимальная глубина (в открытом океане!) составляет 55 м. В двух милях к западу от банки расположена вторая (малая) вершина горы Ампер с глубиной океана ~320 м. Подножие этой горы имеет в сечении эллиптическую форму и простирается в направлении с юго-запада на северо-восток на расстояние ~170 км, с поперечным масштабом эллипса около 70 км. По размерам гору Ампер можно сравнить с горной вершиной Монблан. Долина с глубиной океана ~3400 м отделяет гору Ампер от подводной горы Корал-Патч, которая расположена в ~60 морских милях к востоку. Обе горы выглядят как типичные вулканы с несколькими жерлами, в верхней части повреждёнными взрывами при извержениях (см. *рис. 1*). Южные, северные и восточные склоны горы Ампер состоят из уступов и террас на глубинах 140, 400, 2000 и 3500 м. Стены уступов очень крутые, почти вертикальные, с перепадом глубин в сотни метров, в то время как западная часть горы имеет более плавные склоны.

Главной крупномасштабной особенностью региональной гидрофизической системы является АФ (Arhan et al., 1994) и связанная с ним восточная ветвь Азорского течения (АТ), которая охватывает регион Подковы. Азорский фронт выступает северной границей Субтропического круговорота — крупномасштабной циркуляционной структуры Северной Атлантики. Азорское течение начинается в промежуточной зоне между Гольфстримом и Северо-Атлантическим течением в юго-восточной части Ньюфаундлендского поднятия. Далее к востоку АТ представляет собой зональное (в среднем вдоль 34–35° с. ш.) струйное и меандрирующее течение. Скорость среднего дрейфа АТ южнее Азорских островов, над Срединно-Атлантическим хребтом, на поверхности моря и в верхнем термоклине достигает 20 см/с. В восточном бассейне Северо-Восточной Атлантики, по мере продвижения на восток, от АТ последовательно отщепляются три ветви течений на юг, которые в конечном счёте впадают в Северное экваториальное течение, замыкающее Субтропический круговорот.

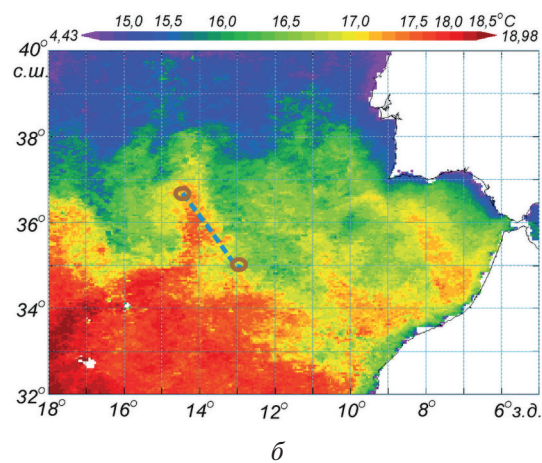
Цепь подводных гор Подкова находится на пути нескольких крупномасштабных медленных дрейфов водных масс, занимающих разные слои по глубине (van Aken, 2000a, b, 2001). В толще 0–500 м, ниже верхнего перемешанного слоя глубиной 50–80 м, лежит наиболее изменчивая Восточная североатлантическая центральная водная масса (*англ.* East North Atlantic Central Water — ENACW) с температурным интервалом от 10 до 20 °С и солёностью от 35,2 до 36,7 psu. Это слой восточной ветви АТ. С глубины ~600 до 1300 м простирается толща Средиземноморской водной массы (*англ.* Mediterranean Overflow Water — MOW). Воды повышенной солёности, с параметрами ~10 °С, ~35,5–36,0 psu, образуются в результате поступления средиземноморских вод в Кадисский залив через Гибралтарский пролив. Вначале эти воды движутся к северу вдоль Иберийского полуострова, а затем охлаждаются и, медленно погружаясь, поворачивают к западу. Подкову воды MOW преодолевают через долины между подводными горами, причём по мере распространения на запад непрерывный слой постепенно истончается и переходит на глубине 1100–1300 м в слой долгоживущих вихрей размером порядка 30–100 км — линз средиземноморской воды. Линзы могут смещаться далеко на запад. Их обнаруживают за Срединно-Атлантическим хребтом и даже в Саргассовом море. Глубже MOW располагается переходная зона смешения, в которой температура и солёность, непрерывно снижаясь с глубиной, достигают значе-

ний 1,5–4,0 °С и 34,8–35,0 psu на глубине около 2000 м. С этой глубины начинается мощный слой Североатлантической глубинной воды (*англ.* North Atlantic Deep Water — NADW), которая формируется около Гренландии. В регионе Подковы эти воды медленно продвигаются к юго-востоку, в сторону побережья Африки. Наконец, нижнее положение занимает Антарктическая донная вода (*англ.* Antarctic Bottom Water — AABW) с температурой 0,8–2,0 °С, солёностью 34,6–34,7 psu. Эти воды движутся в нижнем придонном слое от шельфов Антарктиды к северу (van Aken, 2000a).

Азорский фронт в виде хорошо выраженной полосы шириной порядка 500 км, простирающейся с северо-запада на юго-восток, прослеживается по спутниковым данным как в поле уровня моря (*рис. 3*), так и в поле ТПО (*рис. 4*). В этой области смешения субтропических вод и вод умеренных широт на поверхности океана наблюдаются разнообразные по формам и размерам меандры и вихри с перепадом высоты уровня моря в диапазоне 0–30 см и контрастами в поле ТПО от 15,0 до 18,0 °С в зимний сезон. Масштаб меандров АТ оценивается в несколько сотен километров. С обоих флангов фронта срываются циклонические и антициклонические вихри размером в среднем ~100–300 км и временным масштабом изменений ~3 мес. Для примера, по спутниковым данным AVISO 24 января 2008 г. точно над горой Ампер находился циклонический вихрь правильной эллиптической формы при среднем диаметре 250–300 км. Вихрь перемещался в юго-западном направлении со скоростью 4 мили/сут, причём орбитальные скорости геострофических течений достигали 30 см/с. Из спутниковых альтиметрических продолжительных (с 1993 г. по настоящее время) временных рядов следует, что изменчивость уровня моря складывается в результате сложного сочетания колебаний в широком диапазоне временных масштабов — от суточных до многолетних (*рис. 5*, см. с. 227).



*Рис. 3.* Абсолютный динамический уровень моря (в см) 1 февраля 2008 г. Гора Ампер находится на пересечении штриховых линий



*Рис. 4.* Температура поверхности океана в последнюю неделю января 1985 г. Штриховой линией отмечен гидрологический фронт между горами Жозефина и Ампер

В качестве количественной меры наблюдаемой изменчивости удобно взять сумму дисперсий циклических (квазипериодических) составляющих (включая колебания долговременные, годовые (с обертонами) и мезомасштабные) и дисперсию некоторой случайной («хаотической») фоновой компоненты. Предполагается, что хаотические флуктуации возникают вследствие процесса экспоненциальной релаксации возмущений в гидродинамической системе, выведенной из равновесия в результате множественных случайных внешних воздействий. Спектр такого процесса имеет «красный» вид и может объяснить спадающий по частоте  $\omega$  как  $\omega^{-2}$  спектральный фон, который повсеместно наблюдается по измерениям в сплошных средах (Мельников, 2015). На этом фоне спектральные пики и плато указывают на процессы притока энергии в гидродинамическую систему океана. Однако нередко пара-



метры циклических составляющих спектра имеют признаки нестационарности по среднему значению, дисперсии и частоте. Примеры нестационарных колебаний уровня моря и плотности кинетической энергии геострофических течений на поверхности океана можно видеть на рис. 5 и 7 (см. далее на с. 228). Максимумы в спектре расплываются и плохо выражены. В дополнение к релаксационному процессу в хаотическую составляющую добавляются разномасштабные (различной амплитуды и продолжительности) вспышки колебаний, которые возникают в случайные моменты времени. Такая хаотичность известна под названием «перемежаемость». Перемежаемость существенным образом сказывается на средних величинах, которые часто ошибочно используют для характеристики нестационарной системы в среднем.

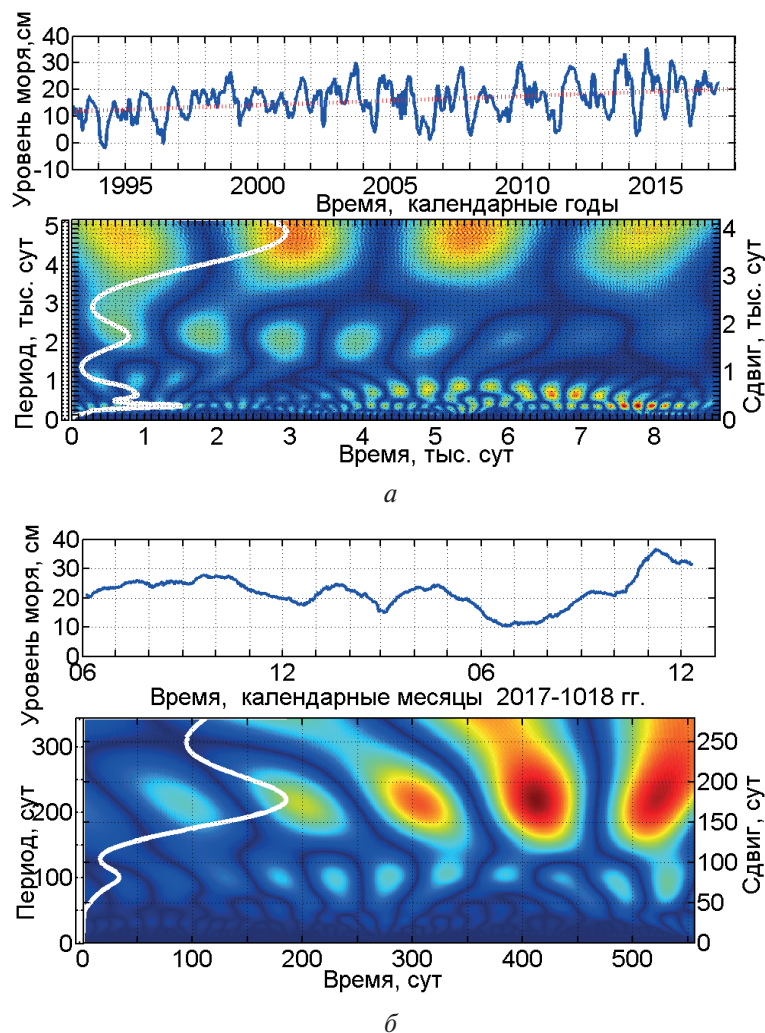


Рис. 5. Многолетние вариации аномалии уровня моря и вейвлет-диаграммы вблизи подводной горы Ампер в точке  $35,1^{\circ}$  с. ш.,  $12,9^{\circ}$  з. д.: а — 1993–2017 гг.; б — 2017–2018 гг. Красная пунктирная линия — линейный тренд уровня моря. Ядро вейвлет-преобразования — функция Морле. Красные участки соответствуют высокой вейвлет-плотности. Светлая кривая — средняя по временному ряду спектральная плотность

Спектральный и вейвлет-анализы многолетних альтиметрических данных показали долговременные циклическости с периодами  $13,6 \pm 3$ ;  $6,0 \pm 3$ ;  $1,6 \pm 0,2$  лет. Годовые колебания на интервале  $1 \pm 0,1$  год отмечены узким и мощным пиком. Внутригодовые колебания доминируют на периодах  $220 \pm 80$  и  $100 \pm 40$  сут. Отмечается увеличение среднего уровня моря на  $4,0 \pm 0,1$  см в 10 лет. Обращают на себя внимание значительные вариации во времени мощности всех перечисленных составляющих (см. рис. 5).

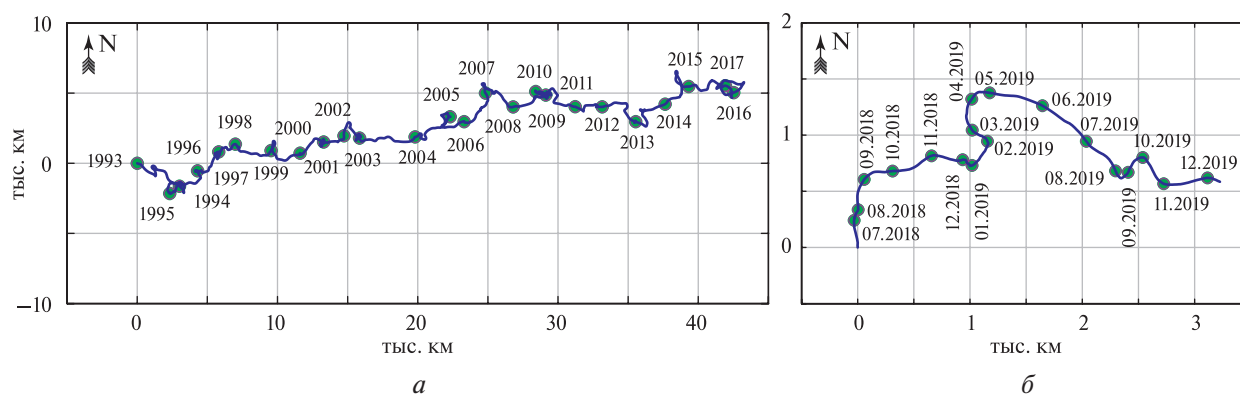


Рис. 6. Прогрессивные векторные диаграммы геострофических течений по спутниковым измерениям уровня моря вблизи горы Ампер в точке  $35,1^{\circ}$  с. ш.,  $12,9^{\circ}$  з. д.: а — 1993–2017 гг.; б — 2017–2018 гг. Зелёными кружками отмечены календарные годы (а) и месяцы (б). По осям отложено расстояние

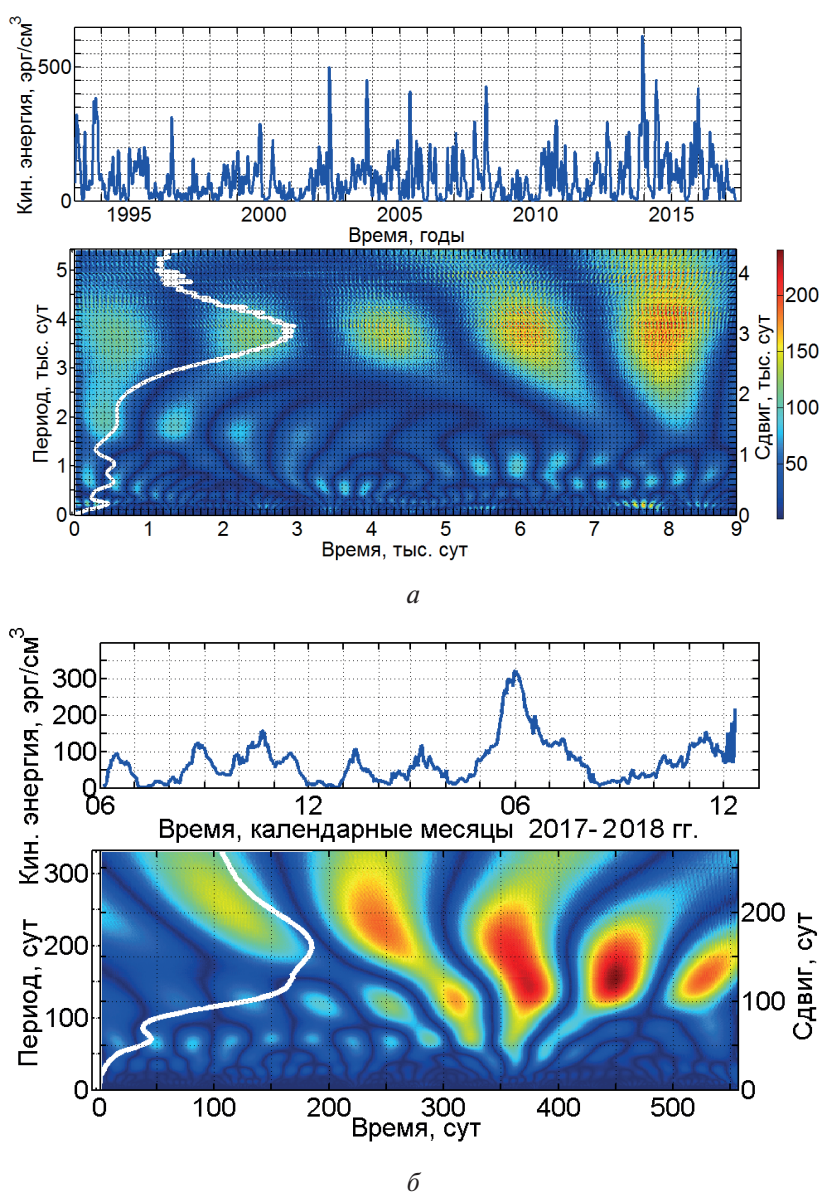


Рис. 7. Многолетний ход плотности кинетической энергии геострофических течений на поверхности океана и вейвлет-диаграммы вблизи горы Ампер в точке  $35,1^{\circ}$  с. ш.,  $12,9^{\circ}$  з. д.: а — 1993–2017 гг.; б — 2017–2018 гг. Светлая кривая — средняя по временному ряду спектральная плотность



Многомасштабные горизонтальные градиенты уровня океана порождают сложные течения в области АФ. По полю уровня моря вычисляются геострофические течения на поверхности моря. Схематично геострофическую циркуляцию вод на поверхности моря в области АФ можно представить в виде суммы среднего дрейфа вод и мезомасштабных течений, которые обусловлены меандрами и вихрями. Мезомасштабные вихревые движения в районе АФ характеризуются повышенной энергией по сравнению с другими акваториями в Северо-Восточной Атлантике. Плотность кинетической энергии геострофических течений (вычисленных по аномалиям уровня моря) на поверхности моря в среднем за период 1993–2017 гг. составляет  $87 \pm 1$  эрг/см<sup>3</sup>. Спорадически, по невыясненной причине, интенсивность этих течений сильно возрастает (по плотности энергии до  $\sim 610$  эрг/см<sup>3</sup>). Меридиональные и зональные скорости изменяются в пределах  $\pm 30$  см/с. Средние (за 24 года) компоненты скорости течений равны  $(U, V) = (5,51, 0,61) \pm 0,05$  см/с, что подтверждает многолетний средний дрейф преимущественно на восток при слабой составляющей к северу (рис. 6, см. с. 228).

По спектрам и вейвлетам плотности кинетической энергии геострофических течений выделяются три группы временных масштабов:

- 1) многолетние, с циклическими колебаниями на периодах  $10 \pm 2$ ,  $5,0 \pm 1$ ,  $3,0 \pm 0,3$ ,  $1,6 \pm 0,2$  лет;
- 2) годовые,  $1,0 \pm 0,1$  год;
- 3) внутригодовые, с периодами  $220 \pm 100$ ,  $140 \pm 40$ ,  $60 \pm 10$  сут.

Отмечается увеличение плотности кинетической энергии течений в среднем со скоростью  $13,352$  эрг/см<sup>3</sup> за 10 лет. Вследствие перемежаемости амплитуда, частота и ширина вейвлет-пигов циклических составляющих колебаний существенно изменяются по времени, как видно из рис. 7 (см. с. 228).

### Субсиноптические гидрофизические процессы в окрестности горы Ампер

Исходя из общего принципа, состоящего в том, что при уменьшении глубины моря пространственная сложность гидродинамических процессов возрастает по сравнению с глубокими котловинами, в окрестности подводной горы следует ожидать усложнения структуры и усиления временных флуктуаций полей в субсиноптической области масштабов по горизонтали 1–100 км. В этой полосе пространственно-временного спектра динамических флуктуаций в океане современные спутниковые продукты не имеют достаточного разрешения ни по времени, ни по расстоянию на поверхности моря. К тому же спутниковые данные не позволяют заглянуть внутрь океана. Поэтому представляет интерес сопоставить спутниковые измерения с контактными измерениями с целью получить новые возможности для интерпретации многомасштабных процессов в окрестности горы Ампер.

По контактными измерениям (Гамсахурдия и др., 1990) было обнаружено, что устойчивой фоновой структурой измеряемого поля был локальный гидрологический фронт, охватывающий по направлению изобат гору Ампер с западной и южной стороны. Фронтальный раздел протянулся с севера на юг: от подводной горы Жозефина до горы Ампер (см. рис. 2). Этот фронт наблюдается и в поле спутниковой ТПО в конце января 1985 г. (см. рис. 4). Поле ТПО состоит из вытянутых в направлении с северо-запада на юго-восток примерно однородных по температуре полос, разделённых сравнительно резкими границами. К западу от линии фронта в верхнем однородном слое находилась сравнительно тёплая и более солёная вода. Более плотная вода располагалась к востоку от фронта. Непосредственно над банкой Ампер вода имела промежуточные значения параметров. Горизонтальные буксировки зонда над банкой показали, что «промежуточная» вода имеет сложную мозаичную структуру с характерным масштабом пятен порядка размеров банки, т. е. 10–12 км. Оказалось, что промежуточная вода формируется над банкой не только в результате смешения холодной и тёплой воды из областей по обе стороны фронта, но и с добавлением более глубоких, расположенных под сезонным термоклином вод. Постоянно действующим механизмом смешения указанных вод

на банке являются приливные течения, которые действуют двояко. С одной стороны, они адвективно смещают фронтальный раздел на расстояние 8–10 км над банкой. С другой стороны, на банке происходит апвеллинг и «заплеск» холодных глубинных вод в результате вертикальной скорости, которую приобретают приливные течения над склонами горы.

По инструментальным измерениям (Гамсахурдия и др., 1990) наблюдалось сильное течение вдоль фронта. Над малой вершиной Ампер течение было направлено почти точно на юг. На горизонте 195 м средние декартовы компоненты скорости —  $U = -3,1$  см/с,  $V = -28$  см/с. Около дна, на горизонте 350 м, южная компонента течения ослабевает и вектор течения поворачивает к юго-западу ( $U = -2,8$  см/с,  $V = -7,2$  см/с). Поле вблизи горы имело сложную вихревую структуру с диаметром вихрей  $\sim 15$ – $18$  км, с перепадом температуры в них  $\sim 0,5$ – $1,5$  °С на горизонте 75 м в термоклине. Данные геострофической скорости AVISO (см. рис. 6) показывают, что южное течение формируется над горой Ампер кратковременно и редко, а восточный средний дрейф — обычное явление, в соответствии с крупномасштабной топографией уровня моря в области АФ.

В рассматриваемом районе полусуточные приливы с обертонами создают значительную часть суммарной изменчивости (Гамсахурдия и др., 1990). Так, на верхней границе термоклина, на глубине 50 м, приливные колебания значительно превосходят обычные для открытого океана величины и составляют по с. к. о. амплитуды  $\sim 0,7$  °С. Измерения вблизи буйковой станции в дрейфе показали, что приливный цикл сопровождается большими колебаниями температуры с двойной амплитудой до 2 °С на глубине 180 м в термоклине. Из наблюдаемой над малой вершиной Ампер (горизонт 195 м) суммарной дисперсии компонент скорости 153 и 60 см<sup>2</sup>/с<sup>2</sup> на полусуточные колебания (баротропные + бароклинные в интервале 16:00–10:00) приходится 78 и 16 см<sup>2</sup>/с<sup>2</sup> для декартовых ( $U$ ,  $V$ ) компонент скорости соответственно. Таким образом, главная часть полусуточной дисперсии над малой вершиной Ампер обусловлена баротропной компонентой полусуточного прилива, усиленной при уменьшении глубины, при набегании приливных течений на склоны горы. Непосредственно на банке Ампер процесс смешения вод приливными течениями обнаруживается по резким изменениям температуры типа внутреннего бора (рис. 8). В однородном слое воды, толщина которого  $\sim 60$  м над банкой, перепад температуры достигает 0,20–0,30 °С. Скачок температуры  $\sim 0,10$ – $0,15$  °С заметен и на поверхности океана. За ним с шестичасовой периодичностью следуют цуги колебаний температуры продолжительностью 2–3 ч, составленные из колебаний с периодом 10–20 мин, амплитудой 0,2–0,3 °С в верхнем однородном слое (см. рис. 8).

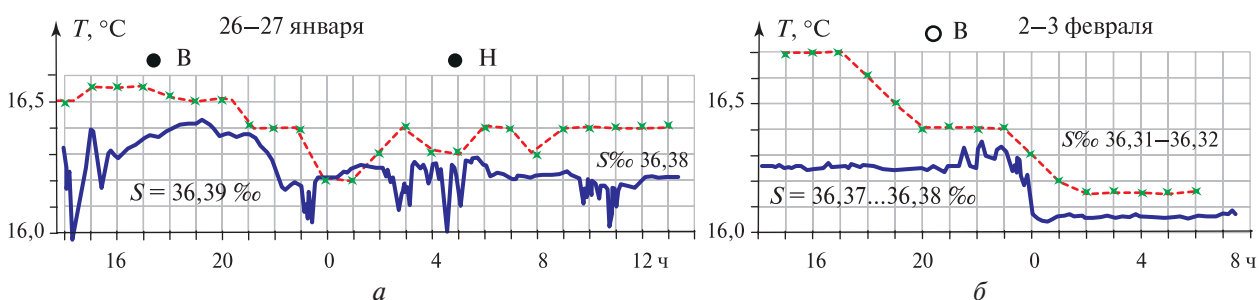


Рис. 8. Временной ход температуры поверхности океана (штриховая линия) и температуры воды на глубине 28 м (сплошная) во время якорной стоянки на банке Ампер в точке  $35^{\circ}03,2'$  с. ш.,  $12^{\circ}52,6'$  з. д. с глубиной океана 58 м: а — 26–27 января 1985 г.; б — 2–3 февраля 1985 г. Дискретность измерений поверхностной температуры воды — 1 ч, температуры воды на глубине 28 м — 3 мин 10 с.  $S$  — солёность воды (в psu). Кружками обозначены моменты кульминации Луны (В — верхняя, Н — нижняя). Время по Гринвичу (англ. Greenwich Mean Time — GMT). Адаптировано из публикации (Гамсахурдия и др., 1990)

Следует упомянуть ещё о двух особенностях субсиноптического поля в окрестности горы Ампер. К северу и к югу от неё были обнаружены специфические структуры размером порядка 30 км в поле температуры в однородном слое. Рисунок распределения температуры

вдоль галса напоминает букву W. Возможной причиной их возникновения может быть неустойчивость среднего течения при обтекании подводной горы. На это указывает сходство горизонтальных перепадов температуры в W-структурах с гидрологическими изменениями поперёк фронта. По мере удаления от горы горизонтальные неоднородности в подобных дипольных субсиноптических вихревых образованиях сглаживаются.

Вторая особенность — волнообразная структура температуры воды (которая была зафиксирована при измерениях на галсе по направлению к банке на глубине 50 м в однородном слое) с постепенно увеличивающейся длиной волны, по мере приближения к банке, от 6 до 18 км. Такие пространственные колебания могут быть обусловлены препятственными внутренними волнами, которые могут возникать во время наибольшего возмущения среднего течения при набегании на подводную гору, т.е. при смещении области фронта к банке. Как было показано в работе (Иванов и др., 1977), при обтекании препятствия течением, с учётом вращения Земли, длина волны в критическом случае ограничена и приближается к предельному инерционному горизонтальному масштабу по мере роста номеров мод. Из этого следует, что наблюдаемые к югу от банки периодические возмущения температуры определяются высокими модами с длиной, близкой к предельной инерционной длине волны. По мере удаления от вершины подводной горы горизонтальный масштаб возмущений уменьшается вследствие уменьшения средней скорости течения, что и наблюдается на галсе (Гамсахурдия и др., 1990). Длины волн определяются высокими модами с масштабом, близким к предельному инерционному, что соответствует развёртке по горизонтали инерционного колебания средним течением.

## Выводы

1. Сложные гидрологические поля в окрестности подводной горы Ампер образуются в результате многомасштабных гидродинамических процессов в области Азорского фронта и восточной ветви Азорского течения. На поверхности океана наблюдается средний дрейф со скоростью  $\sim 5,54 \pm 0,05$  см/с, преимущественно на восток. В области смещения субтропических вод и вод умеренных широт развиваются разнообразные по формам и размерам меандры и вихри. Плотность кинетической энергии геострофических течений составляет в среднем  $87 \pm 1$  эрг/см<sup>3</sup>. В случайные моменты времени, по невыясненной причине, возникают вспышки течений, в которых энергия сильно возрастает (до 610 эрг/см<sup>3</sup>). Выделяются три группы циклических колебаний течений: многолетние, годовые и внутригодовые. Течения вдоль локального фронта и полусуточные приливные течения существенно влияют на гидрологические характеристики вод, окружающих подводную гору. В результате процессов обтекания над банкой формируется особенное мозаичное поле с характерным масштабом пятен порядка размеров верхней площадки горы (6–7 морских миль).
2. В зимний сезон в области цепи подводных гор Подкова и вблизи банки Ампер обнаружен локальный фронт, который отмечает границу холодных (к востоку) и тёплых (к западу) океанских вод. Этот фронт заметен в поле спутниковой ТПО. По измерениям над малой вершиной Ампер вдоль фронта на юг направлено течение со средней скоростью 30 см/с в верхнем 200-метровом слое океана. В окрестности банки встречаются холодные дипольные вихревые образования, проявляющиеся на рисунках распределения температуры вдоль галсов в характерном виде буквы W.
3. Под действием приливных течений, имеющих над горой кинетическую энергию на порядок большую, чем на глубокой воде, фронт смещается на 6–7 морских миль. Движение фронтального раздела над малой вершиной горы Ампер вызывает аномально высокие для открытого океана колебания температуры: до 2 °С в термоклине. Над банкой Ампер при этом с частотой полусуточного прилива появляются скачки температуры типа внутреннего бора.
4. Колебания температуры над малой вершиной Ампер обусловлены адвекцией среднего поля (фронта) и глубинных вод приливными течениями.



5. Волнообразные по горизонтали изменения температуры, обнаруженные к югу от банки, интерпретируются как проявление запрятственных квазиинерционных внутренних волн. Длина волны постепенно уменьшается от 10 до 3 морских миль вниз по течению, к югу от банки. Длины волн определяются высокими модами с масштабом, близким к предельному инерционному, что соответствует развёртке (по горизонтали) инерционного колебания средним течением.

Работа выполнена в рамках госзадания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН по теме FMWE-2024-0016 «Разномасштабные гидрофизические процессы в Мировом океане и его пограничных слоях: их исследование методами оперативной океанографии, судовых наблюдений, дистанционного зондирования, теоретического, численного и лабораторного моделирования», а также при выполнении темы 4.6.11 Государственного океанографического института им. Н. Н. Зубова Росгидромета.

## Литература

1. Гамсахурдия Г. Р., Мельников В. А., Парамонов А. Н. Пространственные особенности и временные изменения гидрологических полей в районе банки Ампер // *Океанолог. исслед.* 1990. № 43. С. 73–82.
2. Голубев Ю. Н., Черкесов Л. В. Экспериментальные исследования внутренних волн над банкой Ампер: препринт. Севастополь: МГИ АН УССР, 1985. 33 с.
3. Иванов Ю. А., Мельников В. А., Новицкий А. Г. Обтекание неровностей дна стратифицированным потоком // *Изв. АН СССР. Сер.: Физика атмосферы и океана.* 1977. Т. 13. № 12. С. 1278–1286.
4. Мельников В. А. Особенности разномасштабных вариаций в геофизических сплошных средах // *Процессы в геосредах.* 2015. Т. 3. № 3. С. 41–49.
5. Монин А. С., Озмидов Р. В., Пака В. Т. О мезоструктуре обтекания подводных гор // *Докл. АН СССР.* 1989. Т. 308. № 1. С. 192–196.
6. Arhan M., Colin de Verdière A., Mémerly L. The eastern boundary of the subtropical North Atlantic // *J. Physical Oceanography.* 1994. V. 24. P. 1295–1316. DOI: 10.1175/1520-0485(1994)024<1295:TEBOTS>2.0.CO;2.
7. Lavelle J. W., Mohn C. Motion, commotion, and biophysical connections at deep ocean seamounts // *Oceanography.* 2010. V. 23. No. 1. P. 90–103.
8. Melnikov V. A. Hydrophysical processes in the vicinity of Ampere Seamount // *Geophysical Research Abstracts.* Vienna: EGU General Assembly, 2009. V. 11. Article EGU2009-9869.
9. Morato T., Hoyle S. D., Allain V., Nicol S. J. Seamounts are hotspots of pelagic biodiversity in the open ocean // *Proc. National Academy of Sciences.* 2010. V. 107. No. 21. P. 9707–9711. DOI: 10.1073/pnas.0910290107.
10. Roden G. I. Effects of seamounts and seamount chains on ocean circulation and thermohaline structure // *Seamounts, Islands, and Atolls* / eds. Keating B. H., Fryer P., Batzia R., Boehlert G. W. *Geophysical Monograph Ser.* V. 43. AGU, Washington, 1987. P. 335–354. DOI: 10.1029/GM043p0335.
11. Smith W. H. F., Sandwell D. T. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings // *Science.* 1997. V. 277. P. 1957–1962. <http://dx.doi.org/10.1126/science.277.5334.1956>.
12. van Aken H. M. (2000a) The hydrography of the mid-latitude northeast Atlantic Ocean. I. The deep water masses // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers.* 2000. V. 47. Iss. 5. P. 757–788. DOI: 10.1016/S0967-0637(99)00092-8.
13. van Aken H. M. (2000b) The hydrography of the mid-latitude northeast Atlantic Ocean. II. The intermediate water masses // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers.* 2000. V. 47. Iss. 5. P. 789–824. DOI: 10.1016/S0967-0637(99)00112-0.
14. van Aken H. M. The hydrography of the mid-latitude northeast Atlantic Ocean — Part III: The subducted thermocline water mass // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers.* 2001. V. 48. Iss. 1. P. 237–267. DOI: 10.1016/S0967-0637(00)00059-5.
15. Vlasenko V., Stashchuk N., Palmer M. R., Inall M. E. Generation of baroclinic tides over an isolated underwater bank // *J. Geophysical Research: Oceans.* 2013. V. 118. Iss. 9. P. 4395–4408. DOI: 10.1002/jgrc.20304.

## Hydrophysical processes in the vicinity of Ampère Seamount based on *in situ* measurements and satellite data

V. A. Melnikov

*P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia*

*E-mail: vmelnikov@ocean.ru*

A description of multiscale hydrodynamic processes developing in the waters near of the Ampère Seamount in the Northeastern Atlantic is given. Interpretations are based on the joint analysis of hydrophysical measurements carried out in January–February, 1985, during the Shirshov Institute of Oceanology RAS expedition on board the research vessel *Rift* (5<sup>th</sup> cruise) and up-to-date satellite data. During the expedition, hydrological sections using a towed CTD (Conductivity, Temperature, Depth) probe, hydrological measurements at the vessel's anchorage at the Ampère Bank, and measurements of currents at a buoy station were made. Materials of some other expeditions that took place in the Ampère Bank aquatorium were also considered. Satellite data arrays on sea surface temperature (Pathfinder Sea Surface Temperature (SST)); long term sea-level and geostrophic velocity series of Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data (AVISO), Sea Surface Height (SSH) Products; World bank of hydrological stations World Ocean Database 2013 (WOD 13) data; and Earth TOPOgraphy (ETOPO) 2022 global bottom relief model dataset with 15 arcseconds resolution were used in the analysis of hydrophysical processes. It is shown that complex hydrological fields in the vicinity of the Ampère Seamount are caused by multiscale hydrophysical processes in the region of the eastern branch of the Azores Current. On the ocean surface, a large-scale drift with a speed of  $\sim 5.54 \pm 0.05$  cm/s, mostly eastward, is observed. In the field of mixing of subtropical waters and waters of temperate latitudes, meanders and eddies of various shapes and sizes develop. The kinetic energy density of geostrophic flows averages  $87 \pm 1$  erg/cm<sup>3</sup>. Sporadically, for an unexplained reason, there are “flashes” of currents in which the energy increases by almost an order of magnitude (to 610 erg/cm<sup>3</sup>). Three groups of cyclic fluctuations of currents are distinguished: perennial, annual, and intra-annual, as well as the chaotic background component of the oscillations. There is a significant intermittency in power and frequency of all of these components. According to contact measurements, the following phenomena have been observed in the subsynoptic interval of scales: a local front with a flow along it; dipole eddies  $\sim 15$ – $30$  km in size; wave-like structures with a wavelength of  $\sim 12$ – $8$  km in the southern sector of the mountain; a mosaic density over the mountain with a spot scale of the order of the size of the bank ( $\sim 10$ – $12$  km); as well as temperature jumps over the bank. The following scheme of hydrophysical processes in the vicinity of the Ampère Seamount is proposed. In winter season, as a result of supposedly meteorological influence, a local front can (rarely) form, giving rise to an average current of  $\sim 30$  cm/s to the south. Downstream the bank, lee internal waves with a limited length that is close to the scale of inertial oscillation swept away by the flow arise. Dipole subsynoptic vortices occur due to frontal instability. Tidal currents cause frontal boundary displacements, which manifest themselves as large temperature semi-diurnal fluctuations. Directly over the bank, colder deep waters are transported by tidal currents along the mount slopes to its top. As a result, a specific mosaic field is formed and temperature jumps followed by high-frequency ( $\sim 20$  min) oscillations are observed.

**Keywords:** Ampère Seamount, Azores Current, satellite data, hydrological front, tidal currents, temperature jumps, 20-minute oscillation packets, internal lee waves

Accepted: 03.12.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-221-234

### References

1. Gamsakhurdiya G. R., Mel'nikov V. A., Paramonov A. N., Spatial features and temporary changes in hydrological fields in the Ampere Bank area, *Okeanologicheskie issledovaniya*, 1990, No. 43, pp. 73–82 (in Russian).
2. Golubev Yu. N., Cherkesov L. V., *Ehksperimental'nye issledovaniya vnutrennikh voln nad bankoi Amper: preprint* (Experimental studies of internal waves over the Ampere bank: Preprint), Sevastopol': MGI AN USSR, 1985, 33 p. (in Russian).
3. Ivanov Yu. A., Mel'nikov V. A., Novitskii A. G., Stratified flow over the bottom irregularities, *Izvestiya AN SSSR. Ser. Fizika atmosfery i okeana*, 1977, V. 13, No. 12, pp. 1278–1286 (in Russian).

4. Mel'nikov V. A., Features of multiscale variations in geophysical continuous media, *Process in GeoMedia*, 2015, V. 2, No. 3, pp. 41–49 (in Russian).
5. Monin A. S., Ozmidov R. V., Paka V. T., On the mesostructure of the flow around seamounts, *Doklady AN SSSR*, 1989, V. 308, No. 1, pp. 192–196 (in Russian).
6. Arhan M., Colin de Verdière A., Mémery L., The eastern boundary of the subtropical North Atlantic, *J. Physical Oceanography*, 1994, V. 24, pp. 1295–1316, DOI: 10.1175/1520-0485(1994)024<1295:TEBOTS>2.0.CO;2.
7. Lavelle J. W., Mohn C., Motion, commotion, and biophysical connections at deep ocean seamounts, *Oceanography*, 2010, V. 23, No. 1, pp. 90–103.
8. Melnikov V. A., Hydrophysical processes in the vicinity of Ampere Seamount, *Geophysical Research Abstracts*, Vienna: EGU General Assembly, 2009, V. 11, Article EGU2009-9869.
9. Morato T., Hoyle S. D., Allain V., Nicol S. J., Seamounts are hotspots of pelagic biodiversity in the open ocean, *Proc. National Academy of Sciences*, 2010, V. 107, No. 21, pp. 9707–9711, DOI: 10.1073/pnas.0910290107.
10. Roden G. I., Effects of seamounts and seamount chains on ocean circulation and thermohaline structure, In: *Seamounts, Islands, and Atolls*, Keating B. H., Fryer P., Batzia R., Boehlert G. W. (eds.), Geophysical Monograph Ser., V. 43, AGU, Washington, 1987, pp. 335–354, DOI: 10.1029/GM043p0335.
11. Smith W. H. F., Sandwell D. T., Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings, *Science*, 1997, V. 277, pp. 1957–1962, <http://dx.doi.org/10.1126/science.277.5334.1956>.
12. van Aken H. M. (2000a), The hydrography of the mid-latitude northeast Atlantic Ocean. I. The deep water masses, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2000, V. 47, Iss. 5, pp. 757–788, DOI: 10.1016/S0967-0637(99)00092-8.
13. van Aken H. M. (2000b), The hydrography of the mid-latitude northeast Atlantic Ocean. II. The intermediate water masses, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2000, V. 47, Iss. 5, pp. 789–824, DOI: 10.1016/S0967-0637(99)00112-0.
14. van Aken H. M., The hydrography of the mid-latitude northeast Atlantic Ocean — Part III: The subducted thermocline water mass, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2001, V. 48, Iss. 1, pp. 237–267, DOI: 10.1016/S0967-0637(00)00059-5.
15. Vlasenko V., Stashchuk N., Palmer M. R., Inall M. E., Generation of baroclinic tides over an isolated underwater bank, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2013, V. 118, Iss. 9, pp. 4395–4408, DOI: 10.1002/jgrc.20304.