

АКАДЕМИК
В.В. ШУЛЕЙКИН

Физические исследования океанов и морей



1960
СЕРИЯ IX

ФИЗИКА и ХИМИЯ

18

ВСЕСОЮЗНОЕ ОБЩЕСТВО
ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ ПОЛИТИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ

Академик
В. В. ШУЛЕЙКИН

ФИЗИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ
ОКЕАНОВ И МОРЕЙ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Москва

1960

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	3
Мировой океан, атмосфера, материки—в потоках солнечной энергии	8
Морские течения, созданные работой «солнечных тепловых машин»	16
Ветровые волны и мертвая зыбь	19
Приливы и волны, вызванные землетрясениями	28
Распространение звука в океане	32
Распространение света в океане	34
Магнитные и электрические явления в океане	37
Литература	40

ПОПРАВКА

В брошюре П. И. Попова «Солнечное затмение в 1961 году» (№ 13) на стр. 8, строка шестая снизу вместо «1,5 млн. км от Земли» должно быть «150 млн. км от Земли».

Автор
Василий Владимирович Шулейкин

Редактор **И. Б. Файнбойм**
Техн. редактор **Е. В. Савченко**
Корректор **Н. М. Краснопольская**

А04221. Подписано к печати 28/IX 1960 г. Тираж 26400 экз. Изд. № 237.
Бумага 60×92¹/₁₆ — 1,25 бум. л. = 2,5 печ. л. Учетно-изд. 2,41 л. Заказ 2073.
Цена 75 коп. С 1. 1. 1961 г.—8 коп.

Типография изд-ва «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

ВВЕДЕНИЕ

Никто из историков науки, техники не скажет, когда первый человек научился переплывать реки, заливы на стволах упавших деревьев? Когда он научился вязать плоты из древесных стволов и пользоваться этими плотами для первых выходов в море? Можно поручиться, что еще раньше таких первых морских походов внимание человека привлекали грозные физические явления в море, заставлявшие с опаской скользить по зыбкой поверхности волн и все внимательнее присматриваться к ним, когда человек оказался на воде.

В глубокую древность уходит история морских промыслов, а ведь эти промыслы превращали в моряков все население прибрежных становищ, включая женщин, детей и стариков.

Издавна народы накапливали полезные знания и навыки, помогавшие ловить рыбу, морского зверя. Известно, что древние греки, добывавшие раковины жемчужниц со дна Эгейского моря, умели улучшать видимость на дне, борясь с мелькающими бликами света от ряби на поверхности воды: для этого они перед нырянием брали в рот оливковое масло, а нырнув — заставляли масло всплывать на поверхность моря. Они знали, что масло растечется по поверхности воды и погасит мелкие волны ряби.

Два века отделили нас от гениального архангельского моряка — Михаила Васильевича Ломоносова, но и ныне свежи, интересны его мысли о физических явлениях в море, мысли, подсказанные великой народной мудростью и юношескими плаваниями с отцом на Белом и Баренцевом морях.

8 мая 1759 года М. В. Ломоносов выступил на публичном собрании Академии наук с «Рассуждением о большей точности морского пути» — замечательной работой, в которой даны физические методы повышения безопасности мореплавания. Многие из предложений Ломоносова были только через 100–150 лет повторены западноевропейскими авторами, причем

остается не выясненным: насколько независимыми от первооткрывателя были эти предложения (в ту пору работы академиков печатались одновременно и по-русски и по-латыни; издания Российской Академии наук были широко распространены в европейских академиях и университетах).

Вероятно, не было ни одной страны в Европе или в Азии, где древние мыслители, ученые не уделяли бы внимания решению задач, которые ставит перед пытливым умом человека море. В незапамятные времена в Китае был изобретен компас — главный путеводный прибор мореплавателей. Очень давно стало известно, что в различных областях океана магнитная стрелка может совсем не точно указывать направление меридиана; во всяком случае, это было известно Христофору Колумбу. Полагают, что именно он открыл это явление, называемое магнитным склонением.

Прекрасный синий цвет моря! Происхождение его веками оставалось загадкой, над решением которой думал уже Леонардо да Винчи, многогранный гений, великий художник и великий ученый. Возможно, что та же загадка привела к глубоким исследованиям в области оптики французского моряка-гидрографа Пьера Бугё.

На Атлантическом побережье Франции и у берегов Англии сильно выражены колебания уровня океана, вызванные приливами. Поэтому естественно, что теориям прилива посвятили свои исследования Лаплас и Ньютон.

Обширные исследования физических явлений непосредственно в океане были предприняты моряками русского военного флота на маленьких кораблях «Надежда», «Нева», «Рюрик», «Предприятие». Впервые было исследовано распределение температур воды на различных глубинах, выяснено содержание кислорода в воде океана, определена прозрачность вод, посредством белого диска, опускаемого в глубину. Все это делалось попутно во время кругосветных плаваний, которыми по праву гордился русский флот в начале прошлого века.

Только к концу прошлого века английские исследователи снарядили экспедицию на специальном большом судне «Челленджер». На этом судне в основном велись гидробиологические и гидрохимические работы — делались сборы морских животных, рыб, выяснялись условия жизни в толщах океанических вод. Лишь частично были поставлены исследования по физической океанографии и по физике океана, только еще зарождавшейся в ту пору.

Первым профессиональным физиком, участвовавшим в дальних океанских плаваниях, был петербургский академик Э. Х. Ленц (в период свсих экспедиционных работ он еще только кончал Дерптский университет).

Совершенно новые методы исследований в ледовитых морях предложил другой наш соотечественник — адмирал

С. О. Макаров, создавший небывалый тип экспедиционного судна — первый мощный ледокол «Ермак» и оснастивший его оригинальными исследовательскими приборами собственной системы. До наших дней трудится в море этот великан, помогая проводке судов в тяжелых ледовых условиях и одновременно позволяя проводить исследования наших полярных морей.

Несмотря на всю важность морских исследований, очень долго ни в одной стране не существовало специального научно-исследовательского морского института, — хотя уже М. В. Ломоносов мечтал о создании научного учреждения, которое бы «из людей состояло, в математике, а особливо в астрономии, гидрографии и механике искусных, и о том единственно старалось, чтобы новыми полезными изобретениями безопасность мореплавания умножить». Такое научное учреждение отсутствовало даже в русской гидрографической службе, хотя ее офицеры много потрудились над изучением отечественных морей, открыли много островов и в 1914 году — даже целый архипелаг Северной Земли, описав его восточное побережье.

Первый в мире Морской исследовательский институт был создан по декрету Совета Народных Комиссаров за подписью великого Ленина: Владимир Ильич подписал этот декрет 16 марта 1921 года и тем самым направил морскую науку по новому пути.

Один из первенцев советской стройки, Плавучий морской научный институт, получил в свое распоряжение хорошее экспедиционное судно, способное плавать в суровых условиях Севера, — «Персей». Можно поручиться, что в большинстве наших морских исследовательских учреждений сейчас работают либо старые соплаватели по экспедициям «Персея», либо товарищи, так или иначе связанные с былыми работами на этом первом советском экспедиционном судне.

В частности, на «Персее» получили развитие первые исследования по физике моря в таких новых, еще небывалых условиях. В то же время экспедиционная работа показала, что для полного решения поставленных физических задач совершенно необходима непрерывная круглогодичная работа на постоянной исследовательской морской базе. В 1929 году была основана первая в мире Морская гидрофизическая станция на Черном море, в поселке Качивели близ Симеиза. Впоследствии из нее развился Морской гидрофизический институт Академии наук СССР.

Первые итоги отечественных работ по физике моря были подведены в 1932—1933 годах, во время широкой международной кампании, носившей название второго Международного полярного года. По предложению Советского комитета по проведению этого мероприятия в лице Юлия Михайловича

Шокальского было решено поставить обширные исследования в морских экспедициях. Из иностранцев это предложение горячо поддержал один лишь норвежский геофизик и океанограф Гаральд Свердруп, и только Норвегия фактически провела несколько экспедиций в западных водах.

Советские экспедиционные суда охватили исследованиями обширную область мирового океана: от Гренландского моря и до восточных берегов Берингова моря. «Персей» начал свои работы у берегов Гренландии, обошел вокруг большей части северного побережья Шпицбергена, пересек Баренцево и Карское моря. Маленький экспедиционный бот «Николай Книпович» впервые за историю мореплавания обошел с севера вокруг всего архипелага Франца-Иосифа.

Прославленное гидрографическое ледокольное судно «Таймир» (участник экспедиции 1914 года, открывшей Северную Землю) прошло от Архангельска по Белому, Баренцеву, Карскому морям, впервые прорезало килем пролив Шокальского, по которому дотоле никто еще не плавал, вышло в море Лаптевых и на всем своем длинном пути проделало ценные исследования по физике моря. Впервые были исследованы важные тепловые явления в полярных морях, определяющие собой сроки замерзания зимой и сроки вскрытия летом; было показано, что существующий тепловой режим Карского моря свидетельствует о наличии на глубинах какого-то мощного теплого течения, заходящего в Карское море с севера и несущего в себе остатки атлантического тепла (через три года такое течение действительно было обнаружено); по характеру приливов было высказано предположение о существовании какого-то еще не известного острова в северо-восточной части Карского моря, и впоследствии этот остров был найден.

В 1932 году навигационный рекорд был поставлен ледокольным пароходом «Сибиряк», вышедшим из Архангельска и в один сезон — без зимовки — достигшим Владивостока по Северному морскому пути, Берингову и Охотскому морям. Несколько небольших экспедиционных судов в это время бороздили Берингово море, производя океанографические исследования между берегами Азии и Северной Америки (Аляски).

До этой памятной даты первое место по морским физическим исследованиям нашего столетия принадлежало Скандинавским странам: Норвегии, Швеции, Дании. Во время второго Полярного года первое место занял Советский Союз. Это объясняется тем, что советские ученые выполнили не только перечисленные широкие экспедиционные исследования, но и работы теоретические, сделанные на основе непосредственных наблюдений в море — очень часто в каютах экспедиционных

судов, не отрываясь от палубных и глубинных измерительных приборов. Возник новый стиль исследований, характерный для современной советской морской науки: прежде всего исследователь идет в море не просто для «сбора материалов», какие могут попасть к нему в руки во время плавания, а для работ по заранее намеченному направлению, как бы нанизанных на некий «идейный стержень»; затем решающий этап теоретической работы по возможности должен прокладываться уже в судовой обстановке, когда еще не поздно проделать необходимые контрольные наблюдения, измерения; завершение работ ни в коем случае не должно затягиваться на десятилетия (как затягивалась на десятилетия «обработка материалов» экспедиций «Челленджера» и других — преимущественно гидробиологических — экспедиций прошлого).

Спустя четверть века, в третий раз были произведены большие работы по физике нашей планеты содружеством многих стран. На этот раз международная исследовательская кампания носила название третьего Международного геофизического года. Уже давно стало ясно, что физические явления в полярных областях неотделимы от физических явлений в тропиках. Сейчас еще рано подводить итоги обширным работам по физике океана, проделанным в период с 1957 по 1959 год. Нужно лишь сказать, что при международных научных исследованиях, как и во всяком ином живом деле, решающую роль играют не соглашения профессоров, собравшихся из разных стран на заседания за обширным столом, а непосредственно исследовательская работа на просторах нашей планеты, оживляемая соревнованием между нациями.

Есть все основания полагать, что и на этот раз «мирное многоборье» завершилось со счетом в пользу нашей отечественной геофизической науки. Порукой тому — первый советский спутник, опередивший все прочие, второй и третий спутники — его земляки, космическая ракета, ставшая спутником Солнца, космическая ракета, доставившая вымпел с советским гербом на Луну, космическая ракета, передавшая по радио на Землю первую фотографию «оборотной стороны» Луны, никогда и никем еще не виденной.

Не осталась в долгу и советская физика моря: в семью больших экспедиционных судов, работавших преимущественно над географическими проблемами («Витязь», «Обь», «Экватор»), вошло новое первоклассное экспедиционное судно «Михаил Ломоносов», специально предназначенное для исследований по физике океана.

Полностью переключилось на исследовательскую работу — преимущественно по физике моря — бывшее учебное судно военно-морского флота СССР «Седов». Это самый большой парусник, сохранившийся в наше время и успешно используемый на просторах океана. Он обладает рядом важных преи-

муществ: практически неограниченной автономностью плавания в продолжение многих месяцев, удивительной устойчивостью на волне, практически полным отсутствием «рысканья», т. е. резких отклонений курса влево и вправо под действием волн.

В наших научных журналах уже напечатано немало работ, выполненных на этих судах за последние годы. О некоторых из них будет рассказано в этой брошюре.

За 30 с лишним лет со времени основания Черноморской гидрофизической станции исследования по физике моря, мирового океана проводились не только в основном научном центре — Морском гидрофизическом институте, но и в родственных советских научных институтах. Много сделано также иностранными учеными.

МИРОВОЙ ОКЕАН, АТМОСФЕРА, МАТЕРИКИ — В ПОТОКАХ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Многообразны движения вод океана. Еще более многообразны движения воздуха в атмосфере над мировым океаном и над материками и островами, разбросанными в нем. Но как бы ни было велико многообразие всех этих движений, все оно за малыми исключениями объединено общим источником энергии, оживляющим и воды океана, и воздух атмосферы. Этот могучий источник — потоки солнечных лучей.

Каждые сутки замечая различие температур воздуха днем и ночью, каждый год — потепление к лету и похолодание к зиме, мы можем наблюдать, как повышается количество доставляемого солнечного тепла при увеличении крутизны падения лучей на земную поверхность и как уменьшается, когда солнечные лучи косо скользят по ней. Совершенно ясно поэтому, что количество тепла, падающего за сутки в потоке солнечных лучей на единицу земной поверхности, должно уменьшаться с увеличением широты места.

Неожиданным может показаться только то, что на широтах 0° (на экваторе) и 10° максимум притока тепла наступает 2 раза в год — весной и осенью, а среди лета, в июне, суточный приток солнечного тепла на экваторе всего лишь на 100 калорий превышает суточный приток тепла у Северного полюса.

Примечательно также, что в июне солнце особо щедро дарит теплом пояс близ 40° северной широты: суточный приток там на 200 калорий больше, чем на экваторе. Легко понять, что эти интересные подробности объясняются своеобразной «борьбой» между влиянием крутизны падения солнечных лучей и влиянием общего числа часов солнечного сияния за сутки. У полюса лучи падают косо даже в июне, но зато Солнце в эту пору светит круглые сутки; у экватора солнечные лучи

близки к отвесному направлению, но продолжительность дня всегда равна шести часам (немаловажно также, что тропический воздух менее прозрачен для тепловых лучей, чем воздух полярный). В обоих отношениях условия оказываются особо выгодными на широте 40° , где и падение лучей происходит под достаточным углом к горизонтальной плоскости и число часов солнечного сияния летом достаточно велико.

Разумеется, климат того или иного широтного пояса определен не отдельными максимальными значениями суточного притока тепла, о которых сейчас говорилось, а полным количеством тепла, поступающего на единицу горизонтальной площади за год. В свою очередь это полное количество тепла зависит от продолжительности лета на той или иной широте, а продолжительность лета очень резко уменьшается при удалении от экватора к полюсам. В результате полное количество тепла, получаемого за год у полюсов, чрезвычайно мало по сравнению с получаемым на экваторе.

Какова же дальнейшая судьба того тепла, которое поступило от солнечных лучей в толщу морской воды? Этой судьбой непрерывно интересовались советские исследователи на Черноморской гидрофизической станции, изучая с 1929 года не только поступление тепла, но и его расход через каждый квадратный сантиметр поверхности моря.

Так было построено учение о тепловом балансе моря, которое теперь лежит в основе исследований, выполняемых теплофизиками различных стран в различных областях мирового океана.

На рис. 1 изображена одна из многочисленных диаграмм теплового баланса Черного моря, построенных С. Г. Богуславским для срока с марта 1951 года до марта 1952 года. Все элементы теплового баланса здесь выражены в малых калориях, отнесенных к 1 см^2 поверхности моря в сутки. Положительные значения отмечены по вертикальной оси вверх (до 800 калорий), а отрицательные — вниз (до 700 калорий). По горизонтальной оси проставлены римские цифры, отмечающие соответствующие месяцы.

Кривая 1 показывает, как меняется суточное поступление тепла от солнечных лучей. Эта кривая — извилистая, благодаря воздействию облаков, уменьшающих приход тепловой энергии от Солнца. Кривая 2 говорит о потере тепла на обратное излучение с поверхности моря; эта потеря не очень велика — она обычно не достигает здесь 200 калорий в сутки с 1 см^2 . Потеря тепла была бы больше, если бы часть невидимого теплового излучения, исходящего с поверхности моря, не перехватывалась водяным паром в атмосфере и не возвращалась морю. Зато очень велики потери тепла на испарение черноморской воды, о чем свидетельствует кривая 3; особо велики они в конце лета, когда температура поверхностной

воды наивысшая, и осенью, когда велики скорости преобладающих ветров. На рис. 1 видна еще кривая 4, которая описывает теплообмен между поверхностной морской водой и атмосферой. С апреля по конец августа эта кривая слегка поднимается над осью абсцисс: в эту пору воздух в прибрежной полосе теплее, чем поверхностная вода, а потому он отдает

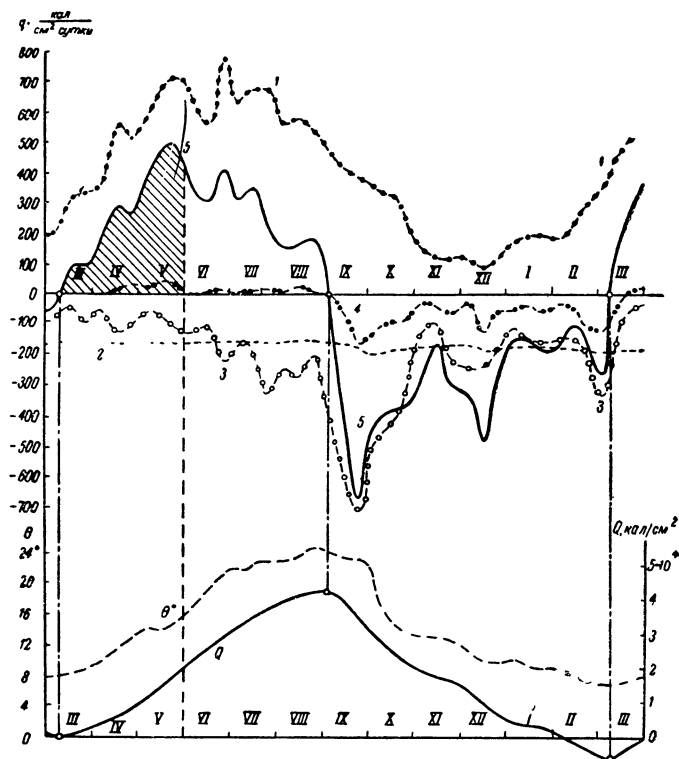


Рис. 1. Тепловой баланс Черного моря.

воде часть своего тепла. Напротив, с сентября по конец марта поверхностная вода оказывается теплее воздуха, и потому море расходует часть накопленного тепла на подогревание воздуха, соприкасающегося с поверхностью воды. Об этом говорит отрезок кривой 4, лежащий ниже оси абсцисс.

Для подведения теплового баланса необходимо алгебраически сложить все статьи прихода и расхода тепла, представленного кривыми 1—4. Тогда получится суммарная кривая 5, характеризующая тепловой баланс Черного моря в исследованном районе. Как видим, кривая 5 трижды пересекает ось абсцисс: в начале марта 1951 года, в начале сентября того

же года и в начале марта 1952 года. В промежутке между первыми двумя точками пересечения кривая 5 поднялась над осью абсцисс; это значит, что здесь приход тепла преобладает над расходом и море в результате нагревается. Напротив, в промежутке между второй и третьей точками пересечения кривая 5 опустилась ниже оси абсцисс; это значит, что здесь преобладает расход тепла и море в результате охлаждается.

Непосредственные измерения температур воды на различных глубинах, в различные времена года показывают, что нагревание и охлаждение сказываются только до некоторой глубины — в деятельном слое моря толщиной в несколько десятков метров. Кривая 5 позволяет узнать, сколько калорий успеет накопиться в этом деятельном слое за период нагревания (в расчете на 1 см^2 поверхности моря). Действительно, примем за нуль для отсчета поступающего тепла то теплосодержание, которое соответствует его минимуму в 1951 году, т. е. моменту первого пересечения кривой 5 с осью абсцисс в верхней части рис. 1. Отметим этот момент на оси абсцисс в нижней части рис. 1 и будем отсюда вести кривую теплосодержания, обозначенную буквой Q .

Можно показать, что прирост теплосодержания деятельного слоя к какому-то дню года (например, к 1 июня 1951 года на рис. 1) выражается площадью между кривой 5, ее осью абсцисс и ординатой, соответствующей заданному дню, в данном случае — заштрихованной площадью. В масштабе диаграммы это составляет $2 \cdot 10^4$ малых калорий на 1 см^2 поверхности моря. В нижней части диаграммы построена точка кривой Q , которая обладает именно такой ординатой (величины теплосодержания деятельного слоя на прежнюю единицу поверхности моря отмечены справа на оси ординат). Так строятся и все другие точки кривой, вплоть до ее максимума, наступающего в момент достижения наибольшей площади кривой 5 наверху рис. 1, т. е. в момент второго пересечения кривой 5 с ее осью абсцисс.

Затем начинается охлаждение моря, и из максимальной ординаты кривой Q приходится вычитать отрезки, которые в прежнем масштабе пропорциональны соответствующим площадям кривой 5 в нижней ее части. Построение нисходящей части кривой Q обнаружило, что к концу годового цикла — в марте 1952 года — теплосодержание деятельного слоя упало ниже того условного нуля, который был принят в самом начале построения кривой Q , во время минимума 1951 года. Это совершенно естественно: теплосодержание деятельного слоя, рассчитанное на единицу поверхности моря, не может сохраняться постоянным не только в продолжение различных сезонов года, но и от года к году в одном и том же сезоне.

Если мы разделим максимальный прирост теплосодержа-

ния «единичного столба» деятельного слоя, как бы подвешенного к 1 см^2 поверхности моря, на массу воды в этом столбе и на теплоемкость, то получим разность между средней температурой деятельного слоя в начале сентября и средней температурой его в начале марта. Рис. 1 показывает, что к 1 сентября 1951 года теплосодержание «единичного столба» возросло на $4,3 \cdot 10^4$ мал. калорий по сравнению с мартом того же года.

Если принять толщину деятельного слоя в исследованном районе равной примерно 60 м, а теплоемкость морской воды приблизительно равной единице, то окажется, что на основании кривой Q средняя температура воды деятельного слоя к 1 сентября повышалась примерно на $7,2^\circ$. Сам ход кривой Q в таком измененном масштабе характеризует изменения средней температуры деятельного слоя.

Для сравнения в нижней части рис. 1 нанесена еще кривая θ° , которая показывает, как менялась здесь температура поверхностной воды. Как видим, ход кривой θ° вполне аналогичен ходу кривой Q . Только поверхностная температура воды 1 сентября превышала поверхностную температуру в марте не на $7,2^\circ$, а на 17° , — чем выше лежат частицы воды, тем больше колебания температур в продолжение года.

В настоящее время А. Г. Колесниковым и А. А. Пивоваровым разработаны методы предвычисления колебаний температуры морской воды в различных частях деятельного слоя по характерным для исследуемого района изменениям теплового баланса. Их методы основаны на теории обмена между слоями (обмена теплом, солями и другими растворенными веществами) под действием турбулентного перемешивания, т. е. перемешивания с участием мелких и крупных вихрей в морской воде. Измерения скоростей в таких вихрях цитируемые авторы производят посредством новой оригинальной аппаратуры, сконструированной ими.

Предвычисление температур морской воды на различных глубинах весьма важно для прогнозирования срока замерзания ледовитых морей и вскрытия их. Как увидим, распределение температур существенно влияет на распространение звука в морской воде, на дальность слышимости сигналов.

Многочисленные измерения температуры воды в океанах на различных глубинах показали, что распределение температур здесь весьма сложное. Деятельный слой простирается в океане значительно глубже, чем во внутренних морях. Как правило, в океане наблюдается понижение температуры в направлении ко дну и притом очень значительное. Так, близ экватора температура поверхностной воды достигает около 27° , а придонная вода обладает температурой всего лишь 2° к северу от Средне-Атлантического поднятия дна и даже менее 1° — к югу от него.

Э. Х. Ленц впервые объяснил наличие холодных придонных вод в тропической области океана поступлением их из арктических и антарктических областей. Первоначальная (очень несовершенная) схема Ленца давно оставлена исследователями океана, но основные черты этой схемы совершенно правильны. под действием нагревания океанических вод в тропиках и охлаждения их в Арктике и Антарктике создается круговорот, простейшая форма которого состояла бы в движении холодных вод понизу — в направлении к экватору и движении теплых вод поверху — от экватора в направлении к полюсам.

В действительности такая элементарно простая картина осложняется воздействием вращения Земли на движущиеся воды и множеством других сил. Однако мы вправе считать, что по законам термодинамики в толще океана должны двигаться громадные массы воды между «нагревателем» (в тропиках) и «холодильниками» (на севере и на юге); именно нагреватель и холодильники создают движение во всякой тепловой машине

Аналогичные тепловые машины работают и в атмосфере, между тропическим нагревателем и холодильниками в Арктике и Антарктике. В этом можно убедиться, внимательно рассмотрев климатологические карты атмосферного давления. Подобные карты изобар дают общее представление о преобладающих движениях в нижнем слое атмосферы. Именно в южном полушарии зимой должна существовать простая схема движения, вызванная очень правильным залеганием изобар примерно вдоль кругов параллелей. Летом в этой области мирового океана также должно происходить такое простое движение, но с меньшими скоростями, поскольку градиенты (перепады) давления в летнее время всюду меньше, чем зимой.

Совсем иная картина наблюдается в северном полушарии в летнее время и особенно в зимнее время. Там и следа нет простых изобар, опоясывающих полюс: изобары всюду оконтуривают либо отдельные области океанов, либо отдельные области материков. Легко понять, что в этом виноваты сами материки, которые в северном полушарии совсем расчленили океан. В этом виноваты большие контрасты, существующие между прогревом атмосферы над океаном и ее прогревом над материками.

Действительно, на диаграмме теплового баланса (рис. 1) мы видели, что в теплое время года море жадно поглощает тепло солнечных лучей и накапливает его в своем деятельном слое — до максимума на кривой Q . Затем при наступлении холодной поры это тепло теряется морской водой на испарение, на контактный теплообмен с атмосферой и на обратное лучеиспускание. Тем самым подогревается воздух над морем.

Иначе ведет себя атмосфера над материком: летом солнечные лучи могут прогреть только сравнительно тонкий слой твердых пород, выстилающих поверхность Земли; очень малая теплопроводность и столь же малая теплоемкость этих пород приводит к тому, что наибольшая часть тепла солнечных лучей здесь передается прямо воздуху, нагревая его до значительно более высокой температуры, чем та, до которой он нагревался летом над морем. Зимой атмосферный воздух не получает тепла от поверхности материка, успевшей очень быстро израсходовать свое скудное теплосодержание. Значит, зимой атмосфера над материком должна быть холодней, чем атмосфера над морем на той же географической широте.

Но в таком случае на Земле должны работать в атмосфере еще «тепловые машины» второго рода, у которых зимой нагревателями служат океаны и холодильниками — материки, а летом нагревателями служат материки, а холодильниками — океаны. Работа этих машин сказалась на виде карт изобар в северном полушарии. Особенно отчетливо она выступает на громадном соединенном материке Европы и Азии: замкнутые изобары здесь оконтуривают нагреватель летом и холодильник зимой.

При работе всякой тепловой машины обязательно переносится тепло в направлении от нагревателя к холодильнику. Так и в наших «тепловых машинах» первого рода движение воздуха создается при обязательном переносе тепла вдоль меридиана: от экватора к полюсам. В тропиках движение воздуха осуществляется в форме пассатов, а в средних широтах — в форме западного переноса воздушных масс, приблизительно вдоль параллелей на больших высотах и под некоторым углом к параллели — в нижних слоях.

Работа «тепловых машин» второго рода сопряжена с обязательным переносом тепла в атмосфере: с океана на материки зимой и с материков на океан летом. Само движение воздуха здесь осуществляется в форме муссонов, дующих в нижнем слое атмосферы с материка на океан зимой и с океана на материк — летом. Зимой с материка понизу уносится холодный воздух, на смену которому поверху приносится теплый воздух с океана. Летом с материка понизу уносится теплый воздух, а поверху поступает охлажденный. Такие встречные потоки называют антимуссоном. На своем пути в атмосфере тепло со стороны экватора или со стороны океана (зимой) вызывает повышение температуры по сравнению с той, какая установилась бы в данном месте, если бы в атмосфере не существовало тепловых потоков с экватора и с океана, а было бы лишь равновесие между теплом, поступающим прямо от Солнца, и теплом, уходящим в межпланетное пространство при обратном излучении.

По приближенной теоретической схеме автор вычислил, сколько тепла отдает тепловой поток с океана столбу воздуха высотой в 4 км, опирающемуся на 1 см² земной поверхности (в Ленинградской области) в различные месяцы. Было вычислено также и количество тепла, которое отдается этому столбу воздуха от теплового потока, идущего в атмосфере вдоль меридиана, с юга на север. Теоретические вычисления удалось проверить достаточно надежным способом, так как район, для которого они произведены, хорошо освещен непосредственными исследованиями теплового баланса атмосферы.

В свое время Главная геофизическая обсерватория занималась такими исследованиями в Павловске, близ Ленинграда. При этом выяснилось, что тепла, поступающего прямо от Солнца, не хватает для уравнивания теплового баланса атмосферы: потери тепла превышают поступление его от солнечных лучей.

В свете изложенных теоретических соображений ясно, что «недостача» тепла, вычисленная павловскими метеорологами и актинометристами, покрывается за счет тепла, поступающего с Атлантического океана, и тепла, поступающего с юга, вдоль меридиана. Экспериментальные точки, полученные для различных месяцев по материалам Павловска, хорошо легли на диаграмму, близ теоретической кривой Шулейкина, учитывающей суммы тепла, выделяемого двумя тепловыми потоками в столбе атмосферного воздуха, в расчете на 1 см² подстилающей поверхности.

Интересно сравнить эти суммы с количеством тепла, которое в различные месяцы поступает непосредственно от солнечных лучей на 1 см² горизонтальной плоскости. Оказывается, что даже в разгар лета — в конце июня — 1 см² подстилающей поверхности получает от Солнца меньше тепла, чем получает зимой, в январе, четырехкилометровый столб воздуха, опирающийся на эту единицу поверхности, от тепловых потоков в атмосфере — с Атлантического океана и с юга.

Так велико значение океана в формировании климата нашей страны. Если бы не было этого влияния, то средняя температура воздуха в Ленинграде в январе достигала бы —52°. Если бы Земля полностью лишилась океана, то средняя месячная температура на полюсах могла бы опуститься до —77°. Мы знаем, что Северный Ледовитый океан, даже не смотря на толстый слой льда, служащего теплоизолятором для воды, значительно повышает эту температуру. Зато близ Южного полюса непосредственные измерения давали температуру воздуха иногда до —80°, в полном согласии со средним месячным значением, которое было вычислено автором еще в 1948 году. Значит, влияние океана практически не ощущается в недрах Антарктического материка.

МОРСКИЕ ТЕЧЕНИЯ, СОЗДАННЫЕ РАБОТОЙ «СОЛНЕЧНЫХ ТЕПЛОВЫХ МАШИН»

В связи с распределением температур в океане мы говорили в предыдущем разделе о возможных потоках океанической воды, созданных неодинаковым прогревом океана на различных широтах, и образованием «нагревателя» в тропиках и «холодильников» в Арктике и Антарктике. Исследования показали, что еще более мощные движения вод океана происходят под воздействием ветра, который создается в атмосфере работой «тепловых машин», оживленных энергией солнечных лучей.

Нам, жителям материка, привычны резкие изменения погоды, резкие изменения скоростей и направлений ветра. Такое непостоянство наблюдается и в некоторых областях океана. Зато в преобладающей части областей мирового океана ветровой режим характеризуется очень большим постоянством. Это относится особенно к областям пассатов: и в Атлантическом, и в Тихом океанах круглый год сохраняется постоянное направление и почти постоянная скорость северо-восточного пассата в северном полушарии и юго-восточного — в южном. Точнее, юго-восточный пассат простирается несколько севернее экватора и соответственно оттесняет к северу область северо-восточного пассата.

Очень устойчивы муссоны в тех областях, где они вызваны наиболее стойкими контрастами между нагревом океана и материка. Когда меняются сезоны года, соответственно меняется и направление муссона, после чего обычно режим сохраняется постоянным в продолжение всего летнего или зимнего сезона.

В самом начале нашего века шведский геофизик Вальфрид Экман предложил теорию морских течений, возникших под действием ветра в различных реальных природных условиях. Он учел и внутреннее трение в воде, играющее очень важную роль в распределении скоростей течения по вертикали, и влияние глубины моря; он рассмотрел сложную задачу о постепенном развитии течения, начиная с того момента, когда возник ветер. За последние полвека эта интересная теория претерпела много изменений, была усовершенствована, дополнена; в ней были устранены некоторые неверные разделы, причем очень много в этой области сделал советский геофизик В. Б. Штокман.

Теория ветровых течений, обычно подтверждающаяся непосредственными измерениями в океане и в больших глубоководных морях, показывает, что на поверхности океана скорость течения должна направляться вправо от ветра, под углом 45° . По мере углубления в толщу вод скорости уменьшаются по величине и все дальше отклоняются от направления

ветра по часовой стрелке. На некоторой глубине течение должно быть направлено в сторону, противоположную скорости поверхностного течения. Эта глубина тем больше, чем больше коэффициент внутреннего трения воды (турбулентного, т. е. вихревого, происхождения). Поэтому такую глубину называют глубиной трения.

Теория показывает, что на глубине трения скорость течения должна составлять $1/23$ от поверхностной скорости. Если погрузиться в океан еще глубже, то найдется такой уровень, на котором скорость течения принимает направление поверхностного течения, — это удвоенная глубина трения, где теоретическое значение скорости течения составляет $1/529$ от поверхностной скорости. Значит, практически можно считать, что ветровое течение (или, как его иначе называют, дрейфовое течение) занимает сравнительно небольшое протяжение по вертикали: до глубины трения, обычно не превосходящей 100—150 м в средних широтах океана. Близ экватора глубина трения может возрастать.

Очень интересно ведут себя ветровые течения в тропиках, в пассатной зоне. Уже в «Океанографии» Ю. М. Шокальского приведены карты этих течений для Атлантического и Тихого океанов, причем на обоих океанах отчетливо видна одна и та же подробность: между Северным и Южным пассатными течениями, направленными на запад, вклинивается противотечение, направленное на восток. Очень долго не удавалось найти причину этого экваториального противотечения. Сравнительно недавно В. Б. Штокман дал теоретическое объяснение всей картины тропических течений, порожденных пассатами. Оказалось, что решающую роль играет нарастание скоростей пассатов от штилевых поясов, лежащих к северу и к югу от экватора, до некоторого максимума и уменьшение скоростей к экватору — снова до штиля.

В поясе максимальных скоростей пассатов и в непосредственном соседстве с ними формируются основные потоки Северного и Южного пассатных течений. В штилевой полосе близ экватора залегают струи экваториального противотечения, в преобладающей ее части; теория показала, что, отступая отсюда к северу и к югу, эти струи должны быть направлены против широтной составляющей ветра, против сил трения, действующих на поверхностные частицы воды.

В этом нет ничего парадоксального: ведь водные массы обладают инерцией, позволяющей им продолжать такое «встречное» движение на некотором протяжении пути. Кроме того, здесь сказывается еще иная причина: некоторый подъем уровня океана близ «рубежей», которые отделяют пояс противотечения от поясов Северного и Южного пассатных течений. О роли такого подъема уровня океана будет речь дальше.

Распределение скоростей течений по вертикали и распре-

деление их на различных расстояниях от экватора находится в хорошем соответствии с существующими материалами непосредственных измерений в Атлантическом и в Тихом океанах. К сожалению, эти материалы еще сравнительно небогаты. Необходимо дополнить их новыми и новыми измерениями в океанах.

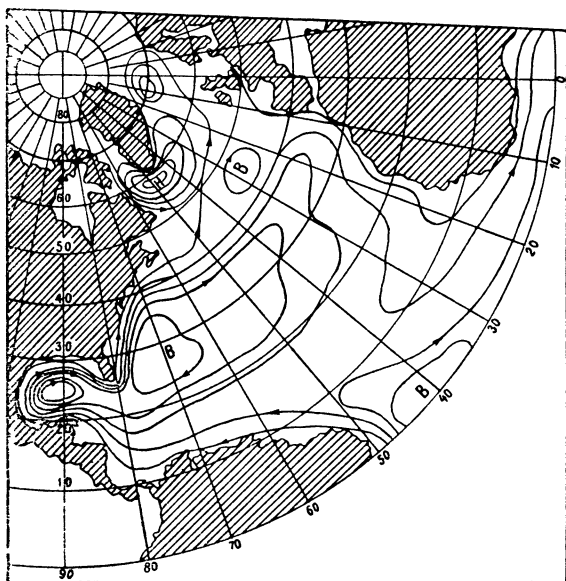


Рис. 2. Теоретическая карта течений в Атлантическом океане.

Современная динамика морских течений позволила разрешить еще более широкую задачу: А. С. Саркисян вычислил линии потоков в северной части Атлантического океана, задавшись распределением скоростей и направлений ветра по климатологическим картам. Результат его вычислений воспроизведен на рис. 2.

Здесь видны и струи Гольфстрима, выходящие в океан из Мексиканского залива, и Северо-Атлантическое течение, и Восточно-Гренландское, и характерные струи, проходящие вдоль берегов Португалии и западных берегов Африки.

По поводу этих струй надо сказать, что в них проявляется отличное совпадение между современной теорией морских течений и результатами непосредственных наблюдений в океане.

Теория показывает, что в океане и в глубоководных морях

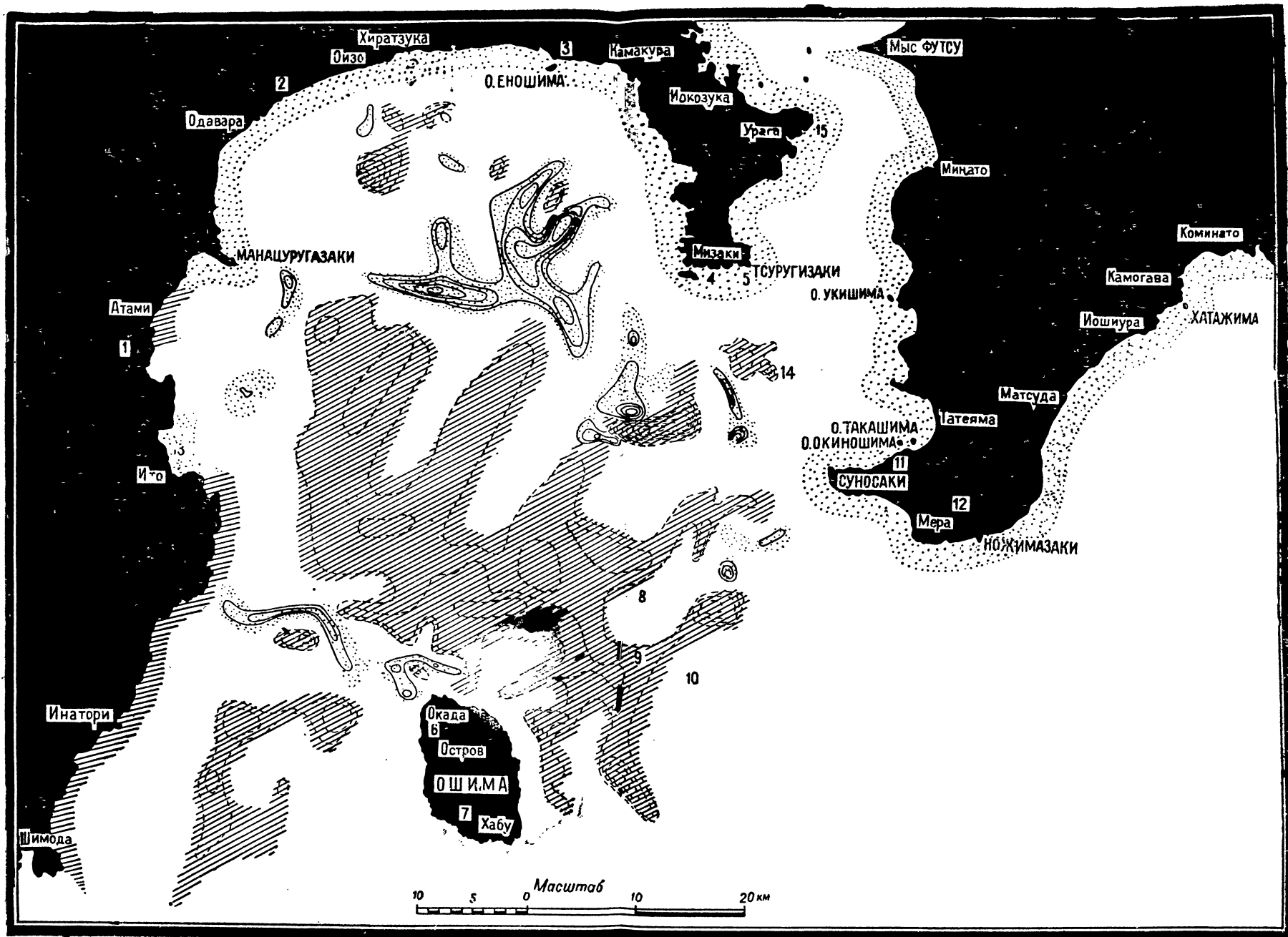
воздействие ветра в прибрежных районах должно проявляться совсем не так, как на мелководных морях: на мелководье нагон вод к берегу происходит под действием ветра, направленного с моря на берег, а сгон — под действием ветра, направленного с берега в море; в глубоком море, в океане, наибольший нагон вод происходит под действием ветра, направленного вдоль берега, когда берег находится справа от ветра; наибольший сгон — под действием ветра вдоль берега, когда берег находится слева от ветра. И нагоном, и сгоном вод тут распоряжается так называемая кориолисова сила, возникающая под действием вращения Земли и вступающая в свои права в океане и в глубоких морях.

В полном соответствии с теорией летний муссон, дующий вдоль западного побережья Африки и оставляющий берег слева, вызывает типичное сгонное — Канарское течение. Наряду с общим продвижением вод вдоль берега, к юго-западу и к югу, здесь резко выражено движение вод поверху — от берега в океан, а понизу — из открытого океана к берегу. Совершенно очевидно, что подобное движение приводит, во-первых, к понижению уровня океана у берегов Африки и, во-вторых, к подсасыванию глубинных вод до самой поверхности океана. В справедливости теории убеждает сильное понижение температуры поверхностной воды у берега знойного африканского материка: с 26° в открытом океане до 16° у берега. Здесь до самой поверхности поднимаются продукты разложения, падающие на дно, и привлекают сюда несметные стаи рыб.

Понижение уровня океана у берега создает тут градиентное течение, т. е. движение вод, вызванное уменьшением давления на глубинах, в направлении к берегу. При нагонном режиме у берега возникает повышение уровня, которое тоже порождает градиентное течение, но в ином направлении. В итоге дрейфовое и градиентное течения всегда налагаются одно на другое и вызывают увеличение суммарной скорости потока. В некоторых случаях местное повышение или понижение уровня возникает и в открытом океане. Это происходит при схождении и расхождении струй в соответствующих районах океана: в «зонах конвергенции» и в «зонах дивергенции».

ВЕТРОВЫЕ ВОЛНЫ И МЕРТВАЯ ЗЫБЬ

В XX веке исследователи завершили построение основной теории поверхностных волн установившегося типа в идеальной жидкости, т. е. жидкости, в которой малы силы внутреннего трения. Особо велик вклад в эту область науки, сделанный А. И. Некрасовым, Н. Е. Кочиным, Л. Н. Сретенским: их работы позволили перейти от динамики волн весьма малой вы-



План поднятия и опускания дна в заливе Сагами.

соты к динамике волн, высота которых сравнима с длиной — составляет несколько сотых от длины волн.

Требования практики заставляют продолжать теоретические исследования дальше, искать решение весьма трудных задач о волнах неустановившегося типа в реальной жидкости, обладающей значительным внутренним трением турбулентного происхождения. Приходится ставить специальные опыты в новых лабораторных условиях, близки к природным условиям зарождения, распространения и гашения морских волн.

Широкие возможности открылись перед советскими исследователями после вступления в строй «штормового бассейна», построенного по идее автора в Черноморском отделении Морского гидрофизического института Академии наук СССР. Это — бассейн в форме кольца, с внешним диаметром 40 м, шириной пространства между стенками 2 м и высотой 5 м. Нижние 2,5—3 м заполняются морской водой, а вдоль кольцевого канала над водой посредством мощных центробежных насосов создается непрерывный воздушный поток. Скорость ветра здесь может достигать 19 м/сек, т. е. по шкале Бофорта 9 баллов. Удобнее всего вести опыты при скоростях ветра до 13 м/сек, когда дольше сохраняются условия, близкие к природным: дольше не сказывается влияние трения о стенки бассейна или сказывается так мало, что его можно исключить путем надежных вычислений.

Сперва на гладкой поверхности воды в кольце появляется мелкая рябь капиллярных волн; затем мелкие волны нарастают в высоту и несколько медленней в длину; на некоторой стадии достигается максимум крутизны волн — максимум отношения высоты волн к их длине (его численное значение составляет 0,143). После этого наступает главный этап развития ветровых волн, на котором увеличение длины волн идет быстрее, чем увеличение их высоты; в результате крутизна волн постепенно уменьшается. За всеми этими явлениями удобно наблюдать сквозь застекленную часть стенок бассейна, занимающую одну шестую его окружности. Столь же удобно фотографировать волны из центра кольца, посредством весьма длиннофокусного аппарата.

На рис. 3 видны три характерных снимка волн. На верхнем представлены волны, сфотографированные через несколько минут после того, как были выключены воздуходувки и прекратился ветер в кольцевом канале. Это — мертвая зыбь, волны которой сохраняются в море очень долго после прекращения шторма и свободно распространяются на большие расстояния. Профиль волн очерчен по трохоиде — кривой, у которой и вершины и подошвы напоминают отрезки синусоид, но подошвы более растянуты по сравнению с вершинами.

Снимок посредине запечатлел волны, находящиеся под

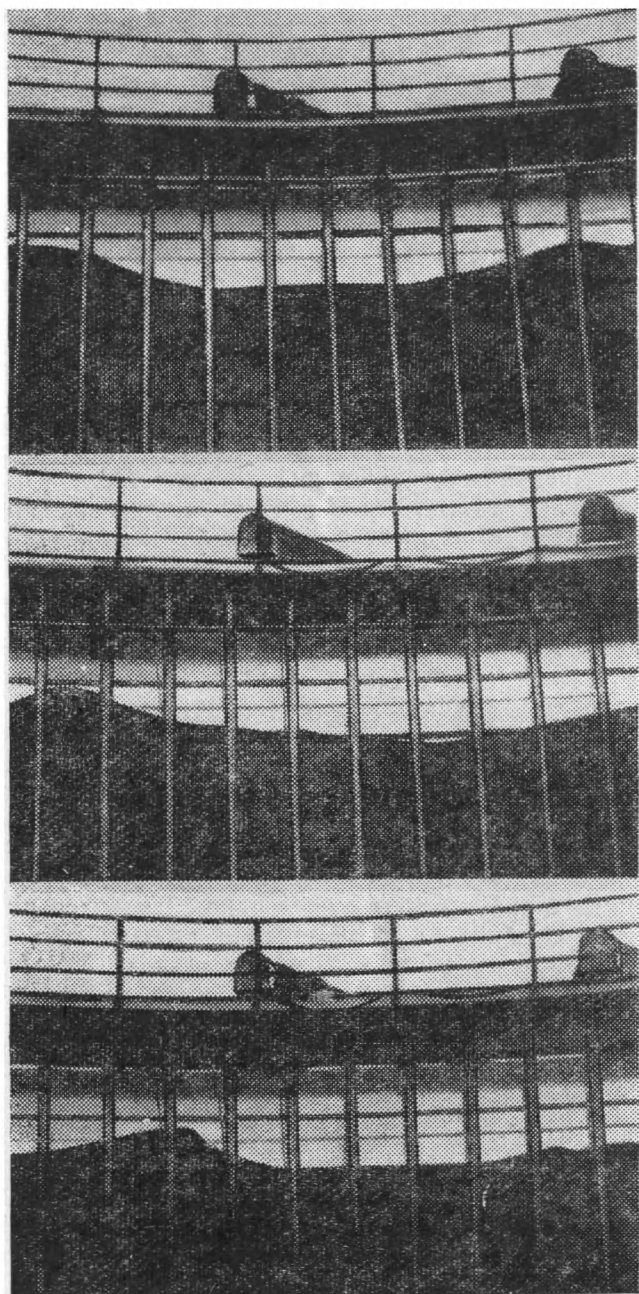


Рис 3. Профили мертвой зыби, ветровой волны и волны, разрушающейся под действием мелководья.

действием ветра (в прямом смысле — ветровые волны). Здесь отчетливо видно отличие от профиля мертвой зыби: подошва еще более растянута, чем у трохиды, а на заострившейся вершине возникло ребро, которое свидетельствует о достижении крутизны, предельной в заданных условиях.

Еще в прошлом веке английский гидродинамик Митчел показал, что даже без воздействия ветра может возникнуть на вершине волн такое ребро, при предельном отношении высоты волн к длине, равном $1/7$. Причина возникновения этого — критического — состояния не рассматривалась в цитированной работе.

Опыты в штормовом бассейне и теоретический анализ их результатов позволили найти физическую причину заострения вершин волн до появления ребра и причину их разрушения после такого критического состояния. Оказалось, что в основе всех этих интересных явлений лежит пульсация скоростей течений, возникающих одновременно с волнением.

Еще английский математик Стокс в прошлом веке показал, что даже при отсутствии ветра частицы воды на волне описывают не замкнутые окружности, как предполагалось прежде, а своеобразные петли: на круговое движение частиц налагается слабое поступательное движение их, направленное в сторону распространения волн. И сам Стокс, и последующие авторы считали скорость такого «волнового течения» постоянной. Однако в действительности скорость стоковского течения пульсирует около средней величины, достигая максимума у подошвы волн и уменьшаясь до нуля на вершинах. Колебания скорости тем значительней, чем больше отношение высоты волн к длине. При действии ветра на стоково течение налагается течение дрейфовое, которое пульсирует по тому же закону, но с еще большей амплитудой. Вот почему при сильном ветре на вершинах волн очень рано (значительно ранее крутизны $1/7$) возникают острые гребни, ежесекундно готовые обрушиться. Именно так создаются на волнах — при больших скоростях ветра — хорошо известные пенистые «барашки».

Столь же подробно удалось исследовать разрушение вершин волн по другой причине — под действием мелководья; было показано, что фазовая скорость волн не остается постоянной, а достигает максимума на вершине волн и минимума — у подошвы. Были вычислены профили мертвой зыби и профили ветровых волн, искаженных при движении на мелководье, и определены условия разрушения вершин волн, потерявших устойчивость вследствие искажения. Нижний снимок дает представление о том, каким становится профиль волн, искаженный под действием мелководья, — перед самым разрушением вершины волны.

Для практических целей мореплавателей и портостроителей очень важно научиться вычислять размеры волн, которые

могут возникнуть через заданный срок действия ветра заданной скорости, на заданном расстоянии от того берега, с которого дует ветер. Вероятно, невозможно — да и не нужно — решать эту задачу, исходя из уравнений движения жидкости. Поэтому еще в 1937 году В. В. Макавеев предложил решать ее на основе закона сохранения энергии.

Энергия волн в каждый момент времени пропорциональна квадрату их высоты. Отсюда следует, что мощность, расходуемая на увеличение высоты волн, пропорциональна скорости нарастания высоты. Эта мощность черпается у ветра, действующего на волны, но, кроме того, ветер обязан покрыть расход мощности на преодоление внутреннего трения в воде, возрастающего при увеличении высоты волн. Постепенно эти потери становятся все значительней и значительней, а потому скорость нарастания высоты волн постепенно уменьшается. Предельная высота волн, возможная при заданной скорости ветра, определяется тем, что мощность, передаваемая волнам от ветра, полностью расходуется на преодоление сил внутреннего трения в воде.

Двадцать три года назад, когда возникла эта первая схема вычисления размеров волн, и в последующие десятилетия оставался неизвестным действительный механизм передачи энергии ветра волнам. Выяснилось, что питание волн энергией ветра безусловно зависит от крутизны волн, т. е. от отношения их высоты к их длине; но не был известен закон, по которому нарастает длина волн, и даже сама причина нарастания их длины.

Лишь в 1954—1955 годах опыты и теоретические исследования, проведенные автором, показали, что ветер как бы «нагнетает» энергию в волны, давая на поверхностные частицы воды с большей силой, когда они опускаются, и с меньшей силой, когда они поднимаются при волновом движении. «Нагнетаемая» мощность пропорциональна квадрату разности между скоростью ветра и фазовой скоростью волн, высоте волн и их крутизне.

Очень просто разрешилась задача о нарастании длины волн, как только к исследованию была привлечена классическая теорема о моменте количества движения (почему-то не применявшаяся прежде в гидродинамике и впервые примененная Н. Е. Жуковским к исследованию движения твердых тел с полостями, содержащими жидкость). По этой теореме прирост момента количества движения в единицу времени равен моменту всех действующих внешних сил. Напомним, что момент количества движения какой-то массы равен произведению этой массы на скорость движения и на длину перпендикуляра, опущенного из «центра моментов» на направление движения в данное время. Моментом силы называется произ-

ведение силы на перпендикуляр, опущенный на ее направление из той же точки.

Обнаружилось, что длина волн нарастает под действием ветра именно потому, что нарастает момент количества движения водных частиц, движущихся по их траекториям. Сам закон нарастания представлен на рис. 4, причем для удобства

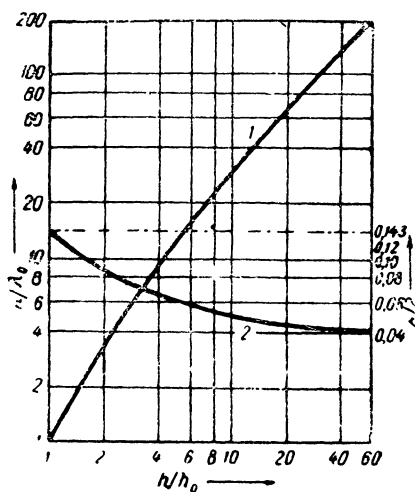


Рис. 4. Нарастание длины волн и уменьшение их крутизны.

применена логарифмическая сетка: по осям фактически отложены не величины, а их логарифмы, и потому диаграмма заняла мало места. Величина h/h_0 представляет собой отношение высоты волн в данный момент времени к высоте волн на той стадии, когда они обладали наибольшей крутизной; величина λ/λ_0 — отношение длины волн в данный момент к длине волн на стадии наибольшей крутизны. Кривая 1 на рисунке показывает, что при увеличении высоты волн в 4 раза длина их возрастает почти в 9 раз; при увеличении высоты волн в 8 раз — длина возрастает

более чем в 20 раз; при увеличении высоты волн в 60 раз — длина возрастает более чем в 200 раз. Именно поэтому непрерывно падает крутизна волн по закону, описанному кривой 2 на том же рисунке: наибольшая крутизна равнялась 0,143; при неограниченном нарастании h/h_0 крутизна стремилась бы к значению 0,04. Последующие работы автора показали, что в действительности крутизна волн стремится к значению $1/23$.

Штормовой бассейн позволил открыть тонкие детали волнового движения и разобраться в энергетике волнообразования, развития волн на тех этапах, на которых практически не сказывалось влияние трения о стены или это влияние могло быть учтено. Для завершения теории ветровых волн были использованы измерения высот и длин волн в условиях океана и глубоких морей, в частности работы автора на экспедиционном судне «Седов» в Атлантическом океане в 1957 году.

На основании исследований многих авторов можно считать, что предельная высота волн в океане, возможная при заданной скорости ветра, пропорциональна квадрату этой скорости. С другой стороны, она должна быть пропорциональна квадра-

ту разности скоростей ветра и волн на конечной стадии. Отсюда следует, что при всякой скорости ветра предельная фазовая скорость волн может составлять только совершенно определенную долю от соответствующей скорости ветра, — именно 0,82.

Все эти соотношения дали возможность построить простые рабочие диаграммы для расчета размеров волн по заданной скорости ветра, времени его действия на волны и заданному расстоянию от той границы штормовой области в океане, со стороны которой дует ветер (в частном случае — расстоянию от берега, с которого дует ветер, — наветренного берега).

На рис. 5 представлена одна из этих диаграмм, построенная применительно к скоростям ветра до 30 м/сек. Через h_{∞} обозначена предельная возможная высота ветровых волн в океане при соответствующем ветре V , на чрезвычайно большом расстоянии от границы шторма; через T_{∞} — предельное значение периода таких волн; величина VT_{∞} также нужна для расчетов.

Сопоставление теоретических расчетов по методу автора с данными непосредственных измерений волн в глубоких морях и в океане дало хорошие результаты.

В настоящее время необходимо на основе этой физической теории развить статистику элементов волн при сложном и неоднородном волнении, наблюдающемся в природных условиях. При этом надо помнить, что на различных этапах развития волн совсем неодинакова вероятность отклонения волн от средних; совсем неодинакова вероятность перехода от двумерных волн, бегущих правильными параллельными рядами, к трехмерным волнам в форме «холмов» на поверхности моря. Теория показывает, что на первых этапах развития волн быстрее всего нарастает высота их на тех участках первоначально правильного «фронта», на которых возникли случайные возвышения над средним уровнем гребня; нарастание задерживается там, где случайно оказалось понижение гребня по

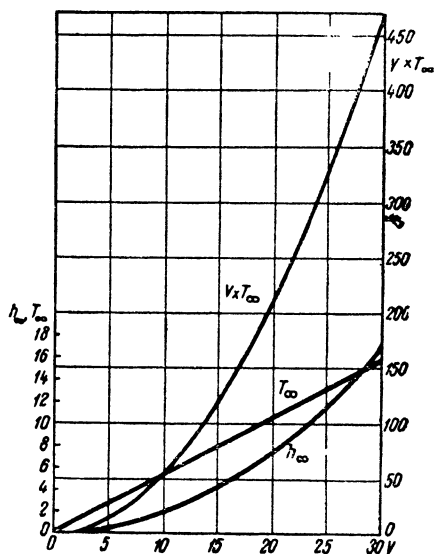


Рис. 5. Основные параметры ветровых волн.

сравнению со средней его высотой. Такая неустойчивость приводит к дроблению рядов волн на отдельные «холмы» и в то же время делает непостоянными высоты волн, бегущих одна вслед за другой.

Иная картина должна возникать на поздних этапах развития волн: теория показывает, что потери энергии на турбулентное внутреннее трение возрастают пропорционально кубу высоты волн. Следовательно, по мере приближения высот волн к установившимся значениям заметнее всего будет замедляться нарастание высот волн там, где они велики, и меньше будет замедляться там, где они малы. В результате будет постепенно сглаживаться неравенство высот в различных частях бывшего «фронта» и неравенство высот между волнами, бегущими одна вслед за другой. По этой причине самые большие штормовые волны в океане снова приобретают правильную двумерную форму: мощная штормовая зыбь бежит правильными рядами, и только на поверхности основных валов этой штормовой зыби громоздятся сложные трехмерные холмы волн — вторичных, третичных и более высоких порядков.

Совсем правильны ряды мертвой зыби, остающейся в океане после прекращения шторма и обладающей весьма большой жизнеспособностью. Иногда такая зыбь распространяется в океане далеко за пределами штормовой области, причем длина ее волн может непрерывно возрастать, достигая громадных размеров, в то время как высота волн постепенно уменьшается.

Теория ветровых волн сейчас разработана не только для условий океана, глубокого моря, но и для совсем иных условий весьма резко выраженного мелководья. Здесь снова сослужил большую службу штормовой бассейн, а выводы из опытов в нем были тщательно проверены А. П. Хваном в настоящей «природной лаборатории» — на озере Белом, почти правильной круглой формы, с диаметром около 40 км и постоянной глубиной около 3—3,5 м.

ПРИЛИВЫ И ВОЛНЫ, ВЫЗВАННЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

В трех предыдущих разделах этой брошюры говорилось о явлениях в океане и в атмосфере над океаном, над материками, связанных с энергией солнечных лучей. Сейчас будет сказано о динамических явлениях в океане, не зависящих от этого источника энергии.

Очень долго жил в народе предрассудок: считалось, что Луна притягивает к себе людей, заставляя их ночью бродить по крышам, с удивительной ловкостью пробираться по карнизам. Таких людей называли «лунатиками». Совсем не винов-

на Луну в поведении этих нервноболезных людей, но совершенно бесспорно, что по законам всемирного тяготения Луна притягивает к себе всю нашу планету (со всем ее населением и со всем прочим, находящимся на Земле, подобно тому, как Земля в свою очередь притягивает к себе Луну). Совершенно бесспорно, что все находящееся на Земле притягивается к Солнцу. Точные приборы позволяют обнаружить, что тяготение к Луне и к Солнцу заставляет непрерывно изгибаться даже твердую оболочку Земли.

Но не нужно никаких приборов, чтобы обнаружить воздействие Луны и Солнца на подвижную, водную оболочку нашей планеты. Эти воздействия заставляют уровень океана то подниматься, то опускаться, заставляют воды океана то заливать громадные отмели, то отступать. С давних пор были известны эти явления и получили название прилива и отлива. Чаше оба названия объединяют в одно, говоря о явлении прилива и подразумевая, что отступление воды (отлив) представляет собой одну из его фаз. Столь же давно, вероятно, человек увидел, что различные фазы прилива — наступление и отступление вод — совсем не просто связаны с положением Луны на небесном своде, и очень долго не знал о силах, управляющих движением вод во время прилива.

Чтобы составить общее представление об этих силах, отметим прежде всего, что в обязательном уточнении нуждается обыденное понятие о движении Луны вокруг Земли: нельзя считать, что Луна движется вокруг центра нашей планеты, — в действительности и Луна, и Земля движутся вокруг общего центра тяжести системы Земля — Луна. В свою очередь этот общий центр тяжести не остается неподвижным, а непрерывно перемещается внутри тела Земли, всегда оказываясь на расстоянии 0,7 ее радиуса от центра, на линии, соединяющей центры Земли и Луны.

Общеизвестно, что сила тяготения, действующая на Луну и приложенная к ее центру тяжести, уравнивается центробежной силой, возникающей благодаря движению по орбите. То же можно сказать о силах, действующих в центре тяжести Земли, вспомнив о его движении вокруг общего центра тяжести системы Земля — Луна.

Совсем иные соотношения между силами возникают в точках, лежащих на поверхности Земли. Особенно интересна точка на линии центров, лежащая «под Луной», и точка на той же линии, лежащая на противоположной («теневой») стороне Земли. Вычисления показывают, что в первой из них сила притяжения к Луне преобладает над центробежной силой, вызванной движением вокруг общего центра тяжести. Значит, результирующая сила, действующая на частицы океанской воды, здесь направлена к Луне. Во второй рассматриваемой точке центробежная сила преобладает над силой притяже-

ния к Луне. Значит, результирующая сила здесь направлена прочь от Луны. Разумеется, ни в первой, ни во второй точке эти результирующие силы не могут вызвать движение вод, они только уменьшают действие силы притяжения к центру Земли.

Но можно показать, что движение вод неминуемо произойдет под действием рассмотренных сил там, где эти силы будут направлены не по радиусу Земли, а наклонно к нему и где они дадут какие-то составляющие, направленные вдоль поверхности океана. По элементарной схеме, наибольшие перемещения вод должны возникать на двух кольцевых поясах океана, плоскости которых перпендикулярны к линии центров Земли — Луна. Один из поясов лежит на «освещенной» половине, а другой на «теневой».

Разумеется, в действительности приливные явления происходят не по такой элементарной схеме уже хотя бы оттого, что воды океана не могут следовать за движением Луны вокруг Земли: перемещения водных масс невозможны со скоростями, которые превышают скорость длинных волн, охватывающих всю толщу океана. Роль сил тяготения к Луне и к Солнцу сводится к воздействию на эти длинные волны, к зарождению этих волн в очень сложных условиях океанов, которые всюду рассеяны материками, архипелагами, подводными хребтами.

Лаплас впервые обнаружил несостоятельность схемы приливных явлений, предложенной Ньютоном (основанной на анализе статического равновесия водных масс под действием упомянутых сил). Но и теория Лапласа, основанная на исследовании длинных приливных волн, не могла описать все многообразие явлений. Для практических целей много ценного дали более глубокие исследования Джорджа Эри, Джорджа Дарвина, Гарриса — в прошлом веке, Проудмена, Дудсона и Л. Н. Сретенского — в наше время.

В отличие от других разделов геофизики физика приливов обладает совершенно точными методами предвычисления на какие угодно длительные сроки. В настоящее время посредством весьма совершенных «прилинопредсказательных машин» составляются таблицы высот прилива и времени его наступления для бесчисленных точек побережья мирового океана. Такая точность объясняется полной определенностью задачи, все стороны которой связаны с давно известными — и очень точно вычисленными — характеристиками движения Земли вокруг Солнца и движения Луны вокруг Земли. Осложнения вносятся лишь физико-географическими условиями исследуемого района океана, но и эти условия поддаются строгому учету, если в районе проделаны систематические и достаточно продолжительные наблюдения за уровнем океана.

В последние годы практика выдвинула задачи, родственные предвычислению приливов: исследователи занялись теорией

волн, возникающих в океане во время подводных землетрясений (или моретрясений, как их иногда называют). Это тоже чрезвычайно длинные волны, охватывающие всю толщу океана, до самого дна и распространяющиеся с громадными скоростями. Иногда они обладают такой высотой и такой силой, что, нахлынув на берега, смывают не только поселки, города, людей, животных, но и растительность вместе с верхним слоем почвы. Эти мощные волны возникают благодаря внезапному подъему значительных площадей дна во время подводного землетрясения.

Совершенно случайно такой подъем дна удалось в точности зафиксировать после катастрофического землетрясения в Японии, недалеко от Токио, 1 сентября 1923 года. За год до землетрясения гидрографы произвели промеры глубин залива Сагами, план которого изображен на стр. 20—21. После землетрясения промеры были произведены заново, причем обнаружилось, что в 18 км к юго-западу от Мизаки произошли сильные изменения рельефа дна на площади около 150 км².

Одна часть этой площади резко поднялась, причем местами поднятие дна достигло 230 м. Другая часть, расположенная совсем близко, опустилась, причем понижение дна местами достигло 400 м. На рисунке покрыты точками площади, на которых произошел подъем дна, и заштрихованы площади, на которых дно опустилось. Сплошными линиями очерчены «ступени» подъема через каждые 50 м. Штрихами очерчены «ступени» опускания. Есть основание полагать, что подъем дна на одних участках и опускание на других произошли не одновременно. Теория показывает, что опасные волны возникают при поднятии дна. В данном случае измерение площадей различных «ступеней» подъема позволило вычислить объем воды, вытесненной при смещении всей поднятой площади. Он оказался равным приблизительно 23 км³. Все это громадное количество вытесненной воды вместились в гребне исполинской волны, которая затем побежала во все стороны в виде расходящегося «кольца». З. К. Григораш вычислила высоту этой волны, нахлынувшей на берега залива Сагами. В среднем получилось 7,1 м. В действительности высота набежавшей волны была у Камакура — около 3,3 м, у Цуругизаки — около 7 м, близ Ножимазаки — около 10 м, в удовлетворительном согласии с теорией.

Сигналы о землетрясениях приходят на сейсмические станции практически мгновенно. Определив по ним положение очага подводного землетрясения, можно рассчитать, когда в то или иное место побережья придут разрушительные океанские волны (волны цунами, как их называют, заимствовав японский термин). Это даст возможность принять меры для спасения населения. Теоретические исследования, сделанные в Морском гидрофизическом институте под руководством Л. Н. Сретен-

ского, уже дали в этом направлении очень ценные результаты: после получения сигнала о катастрофическом землетрясении в Чили в мае 1960 года население на советских берегах Тихого океана было своевременно предупреждено, и поэтому там не было жертв.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ОКЕАНЕ

Гидродинамика морских течений и гидродинамика волн — поверхностных (ветровых) и приливных — удовлетворяется исследованием вод океана, как некой несжимаемой среды. Однако есть область физики моря, настоятельно требующая учитывать свойства воды как сжимаемого, упругого тела. Это — акустика моря, учение о распространении акустических волн в океане. Первоначально полагали, что при сжатии вода следует закону Бойля—Мариотта, выведенному применительно к изотермическому изменению объема газа. Однако при таких условиях в воде возникали бы упругие — звуковые — волны, которые распространялись бы со скоростью меньшей, чем действительно наблюдаемая. В действительности она составляет около 1500 м/сек. Отсюда следует, что благодаря большой частоте колебаний тепло, выделяющееся при сжатии воды, не успевает отводиться в окружающую среду и сжатие происходит по адиабатическому закону (по закону Пуассона).

В настоящее время скорость звука в океанской воде измерена очень точно. Такие измерения понадобились для практических целей — для определения расстояния от источника звука до дна по времени, отделяющему посылку сигнала от прихода эха, и для определения расстояний в горизонтальных направлениях при гидроакустическом пеленговании предметов и при гидролокации. С достаточной надежностью можно считать, что скорость звука c в морской воде связана с температурой θ и соленостью S (грамм на литр) посредством эмпирического соотношения

$$c = 1450 + 4,206\theta - 0,0366\theta^2 + 1,137 (S - 35) \text{ м/сек.}$$

Это соотношение справедливо на поверхности океана, где вода находится под нормальным атмосферным давлением, или на небольших глубинах, где изменением давления можно пренебречь. Но на больших глубинах вода оказывается под такими высокими давлениями, что ее плотность заметно возрастает, а вместе с плотностью возрастает и скорость звука. Допустим, например, что температура воды равна 0°, соленость 35‰, т. е. все поправочные члены в написанном соотношении равны нулю. Тогда окажется, что на поверхности океана скорость звука будет 1450 м/сек. При тех же значениях температуры и солености на глубине 2000 м скорость звука окажется равной 1484 м/сек, на глубине 4000 м — 1529, на глубине 6000 м — 1555 и на глубине 8000 м — около 1600 м/сек.

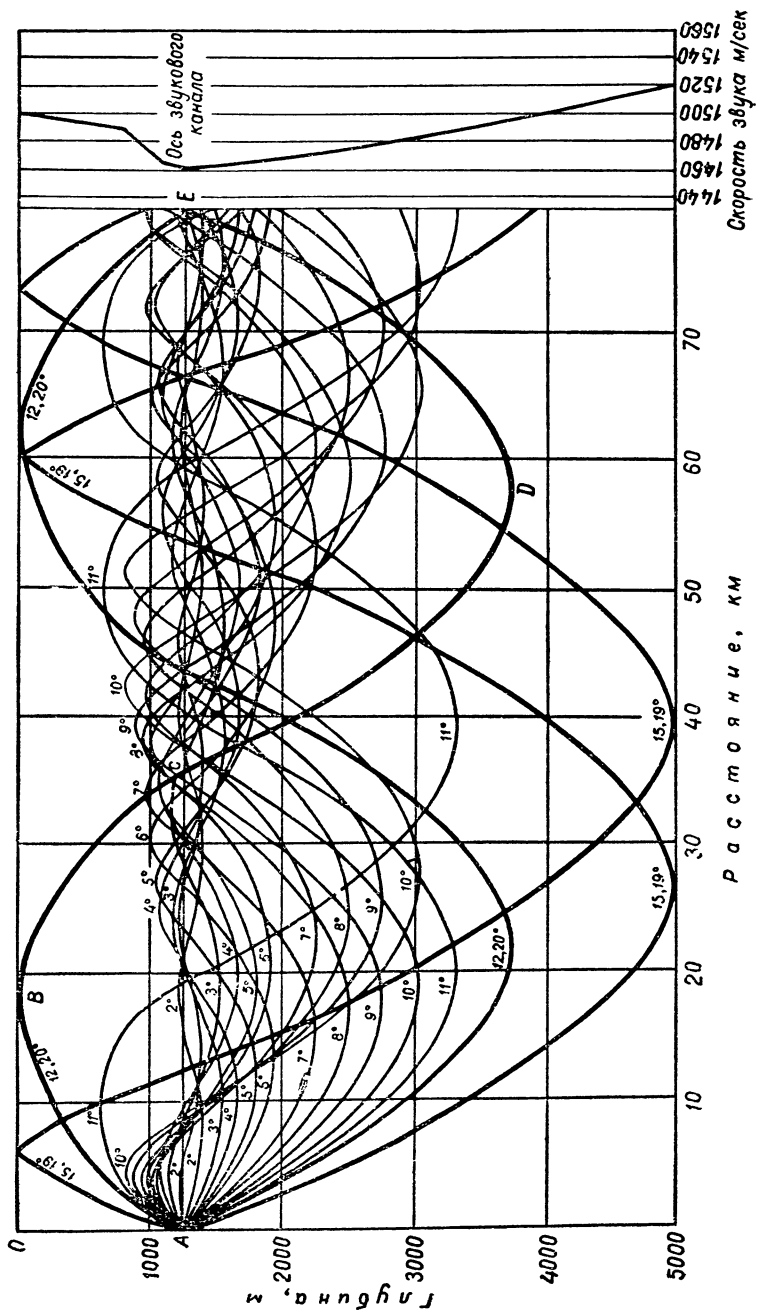


Рис. 6. Звуковой канал в океане.

Такая зависимость скорости звука в воде от давления играет решающую роль в одном очень интересном и важном явлении, которое было одновременно открыто Л. М. Бреховским на глубоком море и иностранными физиками в океане.

Распределение температуры и солености в океане таково, что до глубины около 1200 м, как правило, происходит уменьшение скорости звука под влиянием причин, учитываемых поправочными членами в написанном соотношении. На больших глубинах скорость звука постепенно увеличивается, пройдя через минимум на глубине 1200 м.

Типичное распределение скоростей звука на глубинах представлено на рис. 6, справа от диаграммы «акустических лучей».

На самой диаграмме точка *A* указывает местоположение источника звука, посылающего звуковые «лучи» по различным направлениям. Для наглядности и для компактности диаграммы масштабы расстояний по горизонтальному направлению и по вертикали — не одинаковы: по вертикали масштаб крупнее в 10 раз.

Когда световые лучи распространяются в среде, в которой непостоянна скорость света, то эти лучи испытывают преломление по более или менее сложным законам. В данном случае из точки *A* исходят звуковые волны, распространяющиеся в среде, в которой скорость звука меняется от слоя к слою. Значит, здесь тоже должно наблюдаться искривление путей, по которым распространяются волны: должно происходить преломление «звуковых лучей». На рисунке 6 изображены искривленные пути этих лучей, частично испытывающих отражение от поверхности океана, частично меняющих свое направление по законам преломления. Результат такого поведения лучей отчетливо виден на рисунке: на уровне минимума скорости звука в воде возник своеобразный звуковой канал, в котором сосредоточена преобладающая часть энергии, посылаемой источником звука из точки *A*.

Если где-то в точке *E* на оси этого звукового канала поместить приемник — гидрофон, то он может уловить звуковой сигнал из *A* на весьма больших расстояниях. Например, при первых опытах в Атлантическом океане звук от взрыва 1,8 кг вещества был зарегистрирован приемным устройством на расстоянии 1700 км, а после усовершенствования аппаратуры — на расстоянии 4200 км. Полагают, что при отсутствии поднятия дна на путях звука дальность приема могла бы дойти до 15 тыс. км. Звуковой канал — одно из наиболее интересных открытий последнего времени в области акустики моря.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА В ОКЕАНЕ

Среди всех разделов физики моря оптика моря занимает несколько особое место потому, что все основные этапы в ней были заложены отечественной наукой. Во введении к этой

брошюре уже говорилось о кругосветных плаваниях маленьких кораблей русского военного флота, во время которых фактически были начаты первые измерения прозрачности океанской воды посредством белых и цветных дисков, опускаемых в глубину на линьке до тех пор, пока они не исчезают в своеобразной световой завесе. Глубина исчезновения принималась за характеристику прозрачности воды. Впоследствии такие определения были несправедливо опорочены, как «грубые, не дающие представления о значении оптических констант океанской воды». В настоящее время мы знаем, на основании работ Р. Н. Иванова и других, что глубину исчезновения диска можно связать с величиной коэффициента рассеяния света в морской воде, а, следовательно, этот важный коэффициент можно определять посредством простого приспособления.

Окраска поверхности океанов, морей зависит от двух главных явлений, происходящих в воде: от рассеяния света молекулами воды, а также пузырьками газов и крупными частицами, взвешенными в ней, и от поглощения света в воде. В наиболее чистых областях океана — в Саргассовом море, в Бенгальском заливе — можно считать, что рассеяние света обратно пропорционально четвертой степени длины световой волны. Например, фиолетовые лучи, которым соответствует длина волн 0,44 микрона, рассеиваются приблизительно в 5 раз сильнее, чем красные, которым соответствует длина волн 0,66 микрона.

Поглощение света не может быть описано никакой математической формулой и обычно характеризуется диаграммой, показывающей связь между длиной световой волны и коэффициентом поглощения.

В фиолетовой части спектра отсутствует поглощение — здесь ослабление света происходит только за счет рассеяния. В синей части спектра начинают появляться признаки поглощения, в зеленой оно таково, что волны длиной 0,56 микрона, пройдя через слой воды в 1 м, теряют около 4% своей энергии. Велико поглощение в красной части. Например, волны, длиной около 0,66 микрона, пройдя через тот же метровый слой воды, теряют около 28% энергии. Этим определяется все поведение солнечных лучей, вошедших в воду.

Фиолетовые и синие лучи успевают рассеяться близко к поверхности моря, и часть их отбрасывается вверх, проникает сравнительно тонкий слой воды, выходит в воздух, потеряв совсем немного энергии. Зеленые лучи пройдут в воде более длинные пути, прежде чем выйдут в воздух; к тому же, вода поглощает их сильнее по сравнению с синими лучами. Значит, энергия зеленых лучей, вышедших из воды, будет немного меньше, чем энергия синих и особенно фиолетовых. Еще значительно меньше окажется энергия красных лучей, которые и рассеиваются не скоро и поглощаются на путях в воде

сильнее других. Автор вывел теоретическую формулу, которая выражает распределение энергии в спектре, исходящем из глубин моря. Она применима и к нашим внутренним морям, и к океанам, в которых вода значительно прозрачней. В том же 1921 году индийский физик Чандрасекхара Венката Рамаи вывел аналогичную формулу для частного случая — для идеально прозрачного океана.

Хорошо известно непостоянство окраски одного и того же моря в различных метеорологических условиях. Во время штиля поверхность моря светлая, по цвету напоминающая небо. Объясняется это тем, что, наблюдая поверхность издали, под косыми углами, мы в сущности видим отражение неба от поверхности моря и почти не видим лучей света, исходящих из глубин. Когда по морю бегут волны, луч зрения встречает водную поверхность под более крутыми углами; при этом отраженный свет (от неба) ослабевает, а поток световых лучей из глубин моря усиливается. Именно поэтому море приобретает насыщенную синюю, зеленую или иную свойственную его водам окраску.

Рассеяние света крупными частицами коллоидальных взвесей было впервые исследовано немецким математиком Густавом Ми. Автор применил его математический метод к исследованию рассеяния света частичками грунта, пузырьками газов и другими частицами, взвешенными в морской воде. Он же показал, что при большой концентрации таких частиц или при прохождении световыми лучами больших путей в воде существенно меняется сам закон рассеяния: рассеянные лучи встречают на своих путях другие частицы и снова подвергаются рассеянию; лучи, испытавшие вторичное рассеяние, могут быть рассеяны в третий раз, и т. д. При этом теряет силу закон ослабления света, найденный французским физиком и гидрографом Буге́. На некотором этапе, пройденном световыми лучами, все они оказываются полностью рассеянными по различным направлениям.

Основные выводы теории автора подтвердила В. А. Тимофеева на опытах, позволивших уточнить важнейшие параметры явлений. В. А. Тимофеева обнаружила, что полностью рассеянный свет снова начинает подчиняться закону Буге́, но только с иным коэффициентом ослабления энергии, меньшим, чем тот, который характеризовал простое рассеяние света на первых его этапах. Так были установлены три этапа ослабления света в сильно рассеивающей среде: 1) этап простого рассеяния, по Буге́; 2) этап «гиперболического» закона ослабления света, по Шулейкину, 3) этап ослабления света, по Тимофеевой, с уменьшенным коэффициентом по сравнению с Буге́.

Интересно, что по работам В. А. Амбарцумяна, рассеяние

света в космическом пространстве, производимое частицами пыли, следует такому «измененному» закону Бугё (примененному к полностью рассеянному потоку).

МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ОКЕАНЕ

В наше время имеются очень совершенные навигационные приборы, позволяющие осуществлять мечту М. В. Ломоносова: «увеличивать точность морского пути». В частности, добросовестно работают гирокомпасы, основанные на интересных механических свойствах волчка и дающие точное направление меридиана. Но, несмотря на это, на всех кораблях бережно хранят магнитные компасы, помня народную мудрость: «Старый друг лучше новых двух». Самым выносливым, самым простым и полностью автономным указателем курса корабля остается и, вероятно, надолго останется магнитный компас.

Но поскольку это так, то не теряется практический интерес к происхождению магнитного склонения и к разработке наиболее простых и надежных путей для предвычисления магнитного склонения на будущее время. Еще больший интерес это загадочное явление вызывает у теоретика: пока еще приходится признать, что для него совсем не известна природа магнитного склонения, не известна причина отклонений магнитной стрелки на различные углы от географических меридианов и непрерывного изменения этих отклонений из года в год.

Есть серьезные основания считать, что основное намагничивание Земли связано с ее вращением вокруг оси, как об этом писали еще в начале нашего века Н. А. Умов и П. Н. Лебедев. При таком простом намагничивании во всех точках мирового океана показания магнитного компаса были бы совершенно точны, не существовало бы никакого склонения — ни к востоку, ни к западу. Однако склонение существует во всех областях океана. На первый взгляд может показаться, что оно вызвано какими-то магнитными массами, залегающими на дне океана: ведь вызываются же очень большие осложнения магнитного поля в районе знаменитой Курской магнитной аномалии благодаря наличию богатейших железных руд. Такое объяснение не выдерживает критики в применении к мировому океану за исключением каких-нибудь отдельных мелких районов. Если бы большое магнитное склонение вызывалось «рудами», то существовала бы увеличенная вертикальная составляющая напряженности магнитного поля над этими «рудами». В действительности там не только не наблюдается этого, но иногда полностью отсутствует вертикальная составляющая напряженности земного магнитного поля (например, в районе между Африкой и Южной Америкой, близ экватора, где магнитное склонение превышает 22° , а вертикальная составляющая обращается в нуль).

Есть иная причина, которая способна создать магнитное склонение. Это электрический ток соответствующей силы и соответствующего направления. В 1934 году А. Т. Миронов обнаружил электрический ток в водах Баренцева моря, а вслед за тем и в водах Черного моря. До настоящего времени еще не выяснено происхождение этих токов — вполне аналогичных теллурическим токам в земной коре, известным уже давно. По-видимому, они связаны с потоками заряженных частиц (корпускул), летящих от Солнца и достигающих нашей планеты.

В связи с открытием А. Т. Миронова можно было предположить, что теллурические токи в океане по крайней мере частично повинны в возникновении магнитного склонения. По существующим значениям склонения Л. А. Корнева определила силу и направление электрических токов, которые могли создать это склонение. Оказалось, что, например, в Атлантическом океане близ экватора, между Африкой и Южной Америкой, существующее склонение может быть вызвано током, сила которого равна 15 а на каждый погонный метр прямой, перпендикулярной к его направлению (а направлен он вдоль меридиана).

Где же текут эти токи?

Они могут течь в недрах Земли (как предполагает большинство магнитологов), но тогда мало понятно, почему склонение меняется «молниеносно» с точки зрения масштабов времени, принятых в геологии? Они могут течь в океанах и в очень высоких слоях атмосферы — в ионосфере, обладающей большой электропроводностью.

Первые измерения токов в поверхностных слоях моря представляли отводить им довольно скромную роль. Но в 1956 году Ю. Г. Рыжков и Ф. А. Губин обнаружили, что в Индийском океане плотность электрических токов возрастает с глубиной. В 1957 году автор на борту корабля «Седов» впервые зарегистрировал в Атлантическом океане (посредством электронно-лампового потенциометра) еще более резкое возрастание плотности тока с глубиной. С носа и с кормы корабля на расстоянии по палубе 100 м опускались в воду два свинцовых электрода, обработанных по способу А. Т. Миронова. Они были подвешены на изолированных проводах, присоединенных к регистрирующему прибору. На поверхности океана разность потенциалов между электродами, зарегистрированная прибором, составляла только около 20—30 милливольт на километр. На глубинах она непрерывно росла по мере увеличения глубины погружения обоих электродов и на глубинах в несколько сот метров превышала 150 милливольт на километр.

Обычными способами определялись температура и соленость океанской воды на глубинах, а по этим данным (посред-

ством таблиц) были получены значения электропроводности воды на глубинах погружения электродов. По зарегистрированной разности потенциалов и по найденной электропроводности вычислялась плотность токов. Оказалось, что при существующих плотностях токов на различных глубинах токи в океанах действительно могут активно участвовать в создании магнитного склонения.

Окончательно определить, в какой мере и какую роль играют эти токи, можно только посредством прямого измерения магнитного склонения на глубинах. Действительно, ведь токи, пронизывающие толщу океанской воды, находятся под корабельным компасом и отклоняют его магниты в одну определенную сторону от географического меридиана. Если компас опустить на какую-то глубину, то часть токов окажется по-прежнему под ним и будет действовать на его магниты в прежнем направлении; но появится другая часть токов, которые окажутся над компасом и будут воздействовать на его магниты в противоположную сторону. Следовательно, магниты компаса отклонятся от географического меридиана меньше, чем они отклонялись на палубе корабля; склонение на глубинах будет меньше, чем то, которое наблюдалось на уровне океана.

Для регистрации показаний компаса на глубинах автор сконструировал автоматическую аппаратуру, которая устанавливалась внутри прочного водонепроницаемого бронзового (немагнитного) контейнера. С борта корабля «Седов», специально пришедшего в 1959 году в наиболее интересный район Атлантического океана (немного к югу от экватора), контейнер с прибором опускался до глубины 2100 м и буксировался на этой глубине. К контейнеру были прикреплены две лопасти надежного рулевого устройства, позволявшего быть уверенным в том, что направление буксировки точно параллельно направлению хода корабля. На самом корабле в это время работал гирокомпас, основанный на свойствах быстро вращающегося волчка с пишущим приспособлением — курсографом, по которому непрерывно следили за истинным курсом корабля. После извлечения контейнера с глубин и проявления фотопленки, на которой зафиксировались сотни снимков компаса и маленьких часов, показания компаса сравнивались с показаниями курсографа. Несложные вычисления обнаружили, что примерно треть существующего магнитного склонения создается электрическими токами в океане. Намечены дальнейшие исследования, которые, вероятно, позволят выяснить происхождение остальных двух третей.

Исследование теллурических токов в океане представляет не только теоретический интерес, но и интерес чисто практический. Дело в том, что еще Фарадей предсказал наличие в океане токов иного происхождения, не связанных с солнечной

корпускулярной деятельностью, а вызванных простой индукцией, при движении морской воды в течениях поперек магнитных силовых линий земного магнитного поля. Самому Фарадею не удалось обнаружить такие токи в реке Темзе, где он их искал: в ту пору измерительные приборы были еще недостаточно чувствительны.

В настоящее время фарадеев эффект использовали американские гидрологи, которые впервые измерили таким образом скорости движения вод в мощном течении Гольфстрим. При существовавших там скоростях течения до 280 см/сек в таком районе не возникают опасения о возможности грубых погрешностей. Напротив, в районах с небольшими скоростями течений фарадеев эффект может дать электродвижущую силу, настолько малую, что ее будут до неузнаваемости искажать разности потенциалов, возникающие за счет теллурических токов в океане.

Еще большие относительные погрешности при измерении скоростей течения электромагнитным методом должны возникать в тропиках, близ экватора, где очень малы вертикальные составляющие напряженности земного магнитного поля, а следовательно, очень мал и фарадеев эффект. Между тем теллурические токи играют заметную роль в Атлантическом и в Индийском океанах (вероятно, и в Тихом океане). Для электромагнитного метода измерений скоростей течений могут оказаться неблагоприятными также и условия, возникающие близ полярных кругов, ввиду соседства поясов с повышенной деятельностью полярных сияний и связанных с ними магнитных бурь.

ЛИТЕРАТУРА

Научная

- Вс. А. Березкин. Динамика моря. Гидрометиздат. Л. 1947. Изд. 2-е.
Ю. М. Шокальский. Океанография. Гидрометиздат. Л. 1959. Изд. 2-е.
В. В. Шулейкин. Физика моря. Изд-во АН СССР. М. 1953. Изд. 3-е.
В. В. Шулейкин. Краткий курс физики моря. Гидрометиздат. Л. 1959.
В. А. Снежинский. Практическая океанография. Гидрометиздат. Л. 1954. Изд. 2-е.

Научно-популярная

- С. С. Войт. Что такое приливы? Изд-во АН СССР. М. 1956.
В. В. Шулейкин. Очерки по физике моря. Изд-во АН СССР. М. 1947. Изд. 3-е.
-

75 коп.

С 1.1.1961 г. — 8 коп.

ДОРОГИЕ ТОВАРИЩИ!

Сообщаем Вам, что органами «Союзпечати» начата подписка на 1961 год.

В 1961 году издательство «Знание» продолжает выпускать брошюры-лекции, рассчитанные на лекторов, пропагандистов, агитаторов, специалистов различных отраслей народного хозяйства, а также рабочих и колхозников, имеющих образовательную подготовку примерно в объеме средней школы.

С 1961 года все выпускаемые 12 серий будут состоять из 24 брошюр-лекций в год, со средним объемом одной брошюры в 2,5 печ. листа.

Брошюры-лекции будут иллюстрироваться и содержать рекомендательные списки литературы, краткие методические советы лекторам, цифры и факты и другой справочный материал.

УСЛОВИЯ ПОДПИСКИ

Серии

- I — историческая
- II — философская
- III — экономическая
- IV — техническая
- V — сельскохозяйственная
- VI — по вопросам литературы и искусства
- VII — международная
- VIII — по вопросам биологии и медицины
- IX — по вопросам физики и химии
- X — молодежная
- XI — педагогическая
- XII — по вопросам геологии и географии

Для всех серий

установлена единая цена:

на год 18 руб.,
на 6 месяцев — 9 руб.,
на 3 месяца — 4 р. 50 к.,
на 1 месяц — 1 р. 50 к.

С 1 января 1961 года:

на год — 1 р. 80 к.,
на полугодие — 90 коп.,
на 3 месяца — 45 коп.,
на 1 месяц — 15 коп.

Кроме брошюр-лекций, с 1961 года начинается выпуск новой массовой серии «Народный университет».

Подписывайтесь на брошюры-лекции и серию «Народный университет» издательства «Знание»! Привлекайте новых подписчиков!

Подписка принимается с любого месяца до конца года всеми городскими и районными отделениями «Союзпечати», конторами, отделениями и агентствами связи, почтальонами, а также общественными уполномоченными по подписке на фабриках, заводах, в колхозах и совхозах, в учебных заведениях и учреждениях.

*Издательство «Знание»
Всесоюзного общества по распростра-
нению политических и научных знаний*