

УДК 551.465

© В. Г. Нейман¹, А. Г. Зацепин^{1,2}

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва

²Московский физико-технический институт, Московская область, г. Долгопрудный
vneiman2007@yandex.ru, zatsepin@ocean.ru

К ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ ГИДРОФИЗИКИ ОКЕАНА В РОССИИ

Статья поступила в редакцию 13.12.2018, после доработки 26.01.2019.

В кратком изложении представлено описание основных этапов возникновения и развития в нашей стране гидрофизики океана, одного из разделов комплекса наук, объединяемого общим названием «Океанология». Начало гидрофизики океана в России заложено трудами великого русского ученого Михаила Васильевича Ломоносова, который в конце XVIII в. впервые проанализировал и описал основные черты гидрофизического режима Северного Ледовитого океана. Первые отечественные инструментальные наблюдения над температурой океанской воды на большой глубине были выполнены Иваном Федоровичем. Крузенштерном в 1803—1806 гг. во время его кругосветного плавания на судне «Надежда». Важным событием в развитии гидрофизики уже в XX в. явился выход в свет книги Юлия Михайловича Шокальского «Океанография» (1917 г.) — первой отечественной монографии, давшей развернутое представление о состоянии гидрофизических знаний на тот момент времени. В рамках систематического обзора основных вех в последующем становлении и развитии гидрофизики океана в работе названы имена ведущих деятелей российской науки, создавших ее основы и собственные научные школы, активно функционирующие на протяжении многих десятилетий и имеющие на своем счету немало творческих достижений мирового уровня.

Ключевые слова: Россия, гидрофизика океана, исторические сведения, современное состояние.

V. G. Neyman, A. G. Zatsepin

Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

ON THE HISTORY OF THE DEVELOPMENT OF OCEAN HYDROPHYSICS IN RUSSIA

Received 13.12.2018, in final form 26.01.2019.

The paper in summary presents a description of the history of the emergence and development in Russia of ocean hydrophysics, one of the main parts of the multidisciplinary science — Oceanology. The beginning of hydrophysics in Russia was laid by the works of the great Russian scientist Mikhail Vasilyevich Lomonosov, who in the second half of the 18th century for the first time analyzed and described the main features of the hydrophysical regime of the Arctic Ocean. The first domestic instrumental observations on the temperature of ocean water at great depths were made by Ivan Fedorovich Krusenstern in 1803—1806 during his round-the-world voyage on the ship “Nadezhda”. An important event in the development of hydrophysics in the 20th century was the publication of the book by Yuli Mikhailovich Shokalsky “Oceanography” (1917) — the first national monograph, which gave a detailed idea of the state of hydrophysical knowledge at that time. In the framework of a systematic review of the major milestones in the subsequent formation and development of ocean hydrophysics, the names of the leading figures of Russian science, who created its foundations and their own scientific schools that have been active for many decades and have many world-class achievements in their work, are named in the paper.

Keywords: Ocean Hydrophysics in Russia, history of formation, main achievements, personalities, scientific schools.

Ссылка для цитирования: Нейман В. Г., Зацепин А. Г. К истории развития гидрофизики океана в России // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12, № 1. С. 75—84.

For citation: Neyman V. G., Zatsepin A. G. On the history of the development of ocean hydrophysics in Russia. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2019, 12, 1, 75—84.

doi: 10.7868/S207366731901009X

Широко распространенный термин «Физика океана», применяемый в отношении к одному из разделов Океанологии, относится к числу недостаточно четко определенных понятий в русскоязычной научной терминологии. Хотя, по определению, Мировой океан как объект исследования, условно говоря, состоит из трех основных сущностей — водной массы, земной тверди (дно и берега) и биоты, изначально сложилось так, что понятие «Физика океана» имеет отношение исключительно к его водной толще. В то же время, физические свойства океанского дна и берегов традиционно являются предметами изучения другого комплекса наук — геологии, геоморфологии и геофизики и в состав объектов исследования физики океана не входят. Поэтому применяемое в научном обороте понятие «Физика океана» на самом деле физика не океана, а океанской воды, чему более точно соответствует название «Гидрофизика океана» или «Морская гидрофизика». Различие в содержании двух последних терминов, по-видимому, невелико, если, конечно, реальный пространственный масштаб объекта исследования не является критичным. Вследствие указанной терминологической неопределенности у понятия «Физика океана» в научной литературе имеется несколько фактических синонимов, обладающих разными смысловыми оттенками и, зачастую, используемых не совсем по назначению. Например, в соответствующих научных текстах, можно встретить термины «Физика океана», «Физическая океанография», «Физическая океанология», «Физика моря», «Морская гидрофизика», «Морская гидрология» (гидрологическая станция, съемка и т.д.). Для однозначной терминологической определенности во всех таких случаях, когда речь идет о физических свойствах океанской водной среды, рекомендуем использовать название «Гидрофизика океана» как наиболее адекватно воплощающее содержание рассматриваемого явления. Именно этого термина мы и будем придерживаться в дальнейшем изложении обсуждаемого предмета.

Прошлое и настоящее российской гидрофизики океана. В далеком 1761 г. прародитель всей российской науки Михаил Васильевич Ломоносов представил на заседании шведской Академии наук свой доклад, в котором им были систематизированы сведения о течениях и дрейфе льдов в Северном Ледовитом океане по наблюдениям русских промысловиков. Этот труд великого ученого можно считать первым российским исследованием в области океанографии, и, следовательно, зачином гидрофизики океана.

Возникновение в России современной гидрофизики океана, основанной на точных измерениях, относится ко времени первых отечественных инструментальных наблюдений над температурой океанской воды на большой глубине, выполненных И. Ф. Крузенштерном в 1803—1806 гг. во время его кругосветного плавания на судне «Надежда». Эти экспериментальные исследования были продолжены на более совершенной инструментальной основе О. Е. Коцебу в 1815—1818 гг. во время другого российского кругосветного плавания на бриге «Рюрик», а затем в 1823—1826 гг. им вместе с известным физиком Э. Ленцем (рис. 1) на шлюпе «Предприятие». В плавании на «Рюрике» в 1817 г. впервые в истории мировой науки О. Коцебу выполнил физически точные измерения прозрачности океанской воды.

Очередной важный этап развития гидрофизики океана в России относится к концу XIX в. и связан с именем флотоводца и океанографа С. О. Макарова и его корвета «Витязь», на котором были проведены исследования различных гидрофизических характеристик в Мировом океане — температуры, солености, плотности, скорости течения. Полученные С. О. Макаровым данные, дополненные материалами океанографических наблюдений на других русских военных кораблях, были обобщены и опубликованы в 1894 г. в его всемирно известной монографии ««Витязь» и Тихий океан». Большое количество гидрофизических наблюдений в последней четверти XIX в. было выполнено в Японском, Охотском и Беринговом морях под руководством генерала М. Е. Жданко — начальника русской тихоокеанской гидрографической экспедиции.

В 1890—91 гг. по инициативе Русского географического общества, возглавляемого в то время адмиралом Ф. Литке, была организована черноморская океанографическая экспедиция, в которой большое количество гидрофизических данных было получено под руководством И. Б. Шпиндлера и Ф. Ф. Врангеля. На стыке XIX—XX вв. капитальный вклад в изучение физических характеристик водных масс и их динамики в морях России, в том числе, в западном секторе Северного Ледовитого океана, внес Н. М. Книпович. Большие перспективы развития научных исследований в Российской Арктике открывались в связи с появлением в 1899 г. в ту пору самого мощного в мире ледокола «Ермак». Выполненные на нем работы по физике полярных океанских вод детально описаны в другой знаменитой книге С. О. Макарова «Ермак во льдах», изданной в 1901 г.



Рис. 1. Э. Х. Ленц (1804—1865 гг.).

Fig. 1. Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804—1865).



Рис. 2. Ю. М. Шокальский (1856—1940 гг.).

Fig. 2. Yu. M. Shokalsky (1856—1940).

Ранний этап истории становления гидрофизики океана в России завершился в 1917 г. выходом в свет капитальной монографии заслуженного профессора Морской академии Ю. М. Шокальского (рис. 2) «Океанография», которая выдержала несколько изданий и была переведена на многие языки. К этому времени в России и за рубежом накопилось достаточное количество натурных данных для того, чтобы в этой книге автор смог дать их обобщенное научное описание. Оно было дано по таким разделам гидрофизики океана, как трехмерное распределение температуры и солености вод, их суточный и сезонный ход, прозрачность и цвет морской воды, основные крупномасштабные поверхностные течения, приливные явления, короткопериодные ветровые и длинные инерционные волны. Большой заслугой Ю. М. Шокальского перед мировой наукой стала предложенная им схема систематизации и классификации физических процессов в Мировом океане. Введенное ученым в научный обиход разделение этих процессов по естественным пространственно-временным масштабам во многом способствовало последующему успешному развитию всего комплекса океанологических наук.

Еще в предреволюционное время, по мере накопления новых сведений о природе океана, наряду с развитием традиционного комплексного подхода к изучению общих океанологических проблем, постепенно углублялась их специализация, в том числе, в области гидрофизики океана. Этот естественно-исторический процесс развития науки стимулировал появление новых идей и теоретических обобщений в конкретных областях знаний, приводя, в частности, к совершенствованию экспериментальной базы океанологии. На рубеже XIX—XX вв. в России появился первый в мире специализированный для научных исследований пароход «Андрей Первозванный», на котором на протяжении многих лет, начиная с 1899 г., проводились систематические гидрофизические наблюдения в Баренцевом море на разрезе по Кольскому меридиану.

Особое место в истории отечественной науки занимает созданный в 1921 г. Плавучий морской институт (Плавморнин) и его научная шхуна «Персей». Труды этого института создали целую эпоху в российской океанографии предвоенных лет. На протяжении почти двадцатилетней службы «Персей» выполнил более 80 экспедиционных рейсов в акваториях Гренландского и Баренцева морей. Большинство этих экспедиций имело в основном биологическую и гидрохимическую направленность, однако во многих из них проводились и гидрофизические исследования. Особого упоминания заслуживают выполнявшиеся в 1928 г. на «Персее» под руководством Н. Н. Зубова (рис. 3) исследования в Баренцевом море, результаты которых легли в основу его учения о гидрофизическом режиме океана. В трудах этого ученого впервые сформулированы понятия о вертикальной циркуляции вод, о внутренних волнах,



Рис. 3. Н. Н. Zubov (1885—1960 гг.).

Fig. 3. N. N. Zubov (1885—1960).



Рис. 4. В. В. Шулейкин (1895—1979 гг.).

Fig. 4. V. V. Shuleykin (1895—1979).

о климатической изменчивости морских течений и их влиянии на ледовые условия и на многие другие процессы и явления. Введя в научную терминологию наименование «океанология», расширившее прежнее понятие «океанография», Н. Н. Zubov сформулировал задачу изучения закономерностей гидрофизических процессов в океане, которое не ограничивалось, как прежде, описанием океанографических характеристик в различных регионах. Первостепенное значение придавалось теоретическому обоснованию и целенаправленному экспериментальному исследованию пространственно-временных (сезонных, межгодовых, климатических) изменений в распределении свойств морской воды, течений, морских льдов. Ученики и последователи научной школы Н. Н. Zubova (Н. П. Булгаков, А. Д. Добровольский, А. И. Дуванин, А. Н. Косырев, С. С. Лаппо, О. И. Мамаев, К. Д. Сабинин, Б. Н. Филюшкин и другие) удачно развили созданное Н. Н. Zubovым направление в гидрофизике океана. Под его научным и идейным руководством в 1950—1970-е гг. в нашей стране были достигнуты крупные научные успехи в таких разделах гидрофизики, как вертикальная плотностная конвекция, формирование и трансформация водных масс, крупномасштабное взаимодействие в системе океан-атмосфера, внутренние гравитационные волны, физика поверхностного слоя океана.

Огромное влияние на становление и развитие современной гидрофизики океана в первой половине XX в. и в последующем времени оказала еще одна школа отечественных морских гидрофизиков, созданная В. В. Шулейкиным (рис. 4), который впервые в мировой науке сформулировал, теоретически обосновал и исследовал многие ключевые гидрофизические проблемы. Натурный и лабораторный эксперимент, применение современного математического аппарата классической физики для создания теории изучаемых в море явлений — вот отличительные черты школы В. В. Шулейкина. Широкий круг его научных интересов охватывал ряд таких в то время наименее разработанных и наиболее сложных для теоретической интерпретации проблем гидрофизики океана, как распространение света в морской воде, законы развития и затухания ветровых волн, роль океана в генерации электрического и магнитного полей Земли и многое другое. Одной из опередивших свое время плодотворных идей В. В. Шулейкина стало его глубокое убеждение в том, что климат и погода на материках, в конечном счете, определяются процессами глобального взаимодействия в системе океан-атмосфера-суша. Отсюда он делал вывод

о необходимости совместного изучения газовой и водной оболочек Земли с учетом влияния материков, что впоследствии было реализовано в математических моделях общей циркуляции океана и атмосферы (Г. И. Марчук, В. Б. Залесный, А. С. Саркисян, Р. А. Ибраев и другие). Капитальная монография В. В. Шулейкина «Физика моря» (1941 г., 1968 г. — 2-е изд.), получившая мировое признание и высоко оцененная в нашей стране, многие годы была настольной книгой нескольких поколений гидрофизиков и мореведов. Еще в 1929 г. он создал первую в мире экспериментальную базу для изучения океана — Черноморскую гидрофизическую станцию в Кацивели. В 1934 г. в составе Академии наук возник Институт теоретической геофизики, и В. В. Шулейкин стал руководителем его Морского отдела, а когда на базе Черноморской станции в 1948 г. был организован Морской гидрофизический институт АН СССР он возглавил его научный коллектив. После кончины В. В. Шулейкина в 1979 г., ряд ключевых направлений морской гидрофизики успешно развивался в нашей стране благодаря трудам представителей его научной школы, ставших крупными учеными-гидрофизиками (А. В. Беляев, С. С. Войт, А. Г. Колесников, Н. А. Пантелеев и другие).

В 1946 г. в Академии наук СССР был создан Институт океанологии, получивший впоследствии имя его организатора и первого директора академика П. П. Ширшова. Лидером гидрофизического направления в Институте стал В. Б. Штокман (рис. 5), обладавший большим опытом экспедиционной работы и в совершенстве владевший математическим аппаратом гидрофизики океана. К списку фундаментальных достижений В. Б. Штокмана и его научной школы, прежде всего, относится создание ставшего широко известным в мировой океанологии метода полных потоков для описания морских течений, определившего в свое время на несколько десятилетий вперед продуктивное развитие теории динамики вод океана. Реализация показанной В. Б. Штокманом и его учениками возможности построения замкнутого уравнения для функции полных потоков привела впоследствии к созданию первых доступных для анализа моделей океанической циркуляции, ставших в настоящее время одним из основных инструментов исследования пространственно-временных характеристик океанских течений. Выявление влияния пространственной неоднородности приводного ветрового поля на циркуляцию вод привело В. Б. Штокмана к созданию его знаменитой теории экваториальных противотечений — океанских потоков, идущих против ветра. Его теория объяснила многие другие особенности горизонтальной структуры течений в морях и океанах, в частности вблизи островов и над крупными неоднородностями рельефа дна.



Исключительная научная интуиция В. Б. Штокмана позволила ему еще в 1930-е гг. прошлого столетия, за несколько десятилетий до научного открытия синоптических вихрей в океане, сформулировать и теоретически обосновать представление о мезомасштабном гидрофизическом режиме океана как об ансамбле случайных процессов, к изучению которых применимы методы теории вероятности. Именно такой подход позволил в дальнейшем его последователям экспериментально обнаружить наличие в океане мезомасштабных, синоптических и других типов вихревых структур, играющих огромную роль в энергетическом балансе океанической циркуляции.

Большой вклад в развитие в стране экспериментальной и теоретической гидрофизики океана во второй половине XX в. внесен работой многих высокопрофессиональных коллективов в основном из институтов Академии наук, работавших на мировом уровне в составе

Рис. 5. В. Б. Штокман (1909—1968 гг.).

Fig. 5. V. B. Shtokman (1909—1968).

известных в России и за ее рубежами научных школ, возглавляемых выдающимися учеными. Вопросы теории процессов, протекающих в контактирующих водной и воздушной средах, успешно разрабатывались плеядой талантливых молодых гидрофизиков, представителей научной школы В. Б. Штокмана. Среди них заметный вклад был внесен В. М. Каменковичем (динамика циркуляции океана), С. А. Китайгородским (физика погранслоев), Р. В. Озмидовым (морская турбулентность), К. Н. Федоровым (тонкая гидрофизическая структура океана), М. Н. Кошляковым (синоптические вихри в океане), Л. М. Фоминым (энергетика океанской циркуляции) и некоторыми другими учеными.

В 1949 г. Л. М. Бреховских с коллегами сделали фундаментальное гидрофизическое открытие в океане — обнаружили существование подводного звукового канала. Последующее изучение и теоретическое описание этого явления коренным образом изменили представления о структуре акустических полей в Мировом океане и послужили основанием для создания современных технических средств обеспечения деятельности военно-морского флота. После введения в строй в 1960-х гг. XX в. научно-исследовательских судов «Петр Лебедев» и «Сергей Вавилов» (на смену которым в конце 1980-х гг. пришли два других специальных гидрофизических судна — «Академик Сергей Вавилов» и «Академик Иоффе»), отечественная гидроакустика вышла на передовой мировой уровень. Ключевую роль в разработке ее теоретических основ вместе с академиком Л. М. Бреховских сыграли его ученики и приверженцы его научной школы В. А. Акуличев, А. Г. Воронович, О. А. Годин, Ю. Ю. Житковский, В. И. Ильичев, Б. Ф. Курьянов, Ю. П. Лысанов, И. Е. Михальцев, А. В. Фурдуев, Р. Ф. Швачко и другие.

В 1955—1990 гг. профессор В. Г. Корт вместе со своими сотрудниками и коллегами В. А. Бубновым, В. А. Бурковым, В. И. Бышевым, Ю. А. Ивановым, М. В. Козляниновым, Е. Г. Морозовым, К. В. Морошкиным, В. Г. Нейманом, И. М. Овчинниковым, Е. А. Плахиным, В. Н. Степановым, Б. А. Тареевым, В. Б. Титовым и другими организовали и провели ряд крупных океанских натурных исследований в области гидрофизики океана. В результате этих работ были получены уникальные сведения о гидрофизическом режиме Южного океана и структуре Антарктического циркумполярного течения (1955—1960 гг.), обнаружено и впоследствии получило российское название — течение Тареева на экваторе в Индийском океане (1960 г.), открыто Антило-Гвианское противотечение в системе западных пограничных течений Атлантического океана (1969 г.), построены карты гидрофизических характеристик всех океанов и выполнена оценка их изменчивости на различных пространственно-временных масштабах (1970—80 гг.).

В 1965 г. директором Института океанологии им. П. П. Ширшова стал выдающийся российский специалист в области геофизической гидродинамики А. С. Монин (рис. 6). С его приходом к руководству этого крупнейшего научного центра объем экспериментальных исследований в океане, вы-



полнявшихся на научно-исследовательских судах Института, вырос почти на порядок. Из каждой дюжины ежегодных морских экспедиций ИО АН СССР в конце 1960—начале 1980-х гг. не менее половины проводились по гидрофизической проблематике. Преимущество получили наиболее перспективные в то время программы крупномасштабных, в том числе полигонных, исследований с привлечением большого числа обеспечивающих и измерительных средств. В 1970—1980-е гг. в Атлантическом и Тихом океанах силами нескольких ведомств России с ключевым участием институтов Академии наук и Гидрометслужбы СССР было последовательно реализовано несколько крупных проектов, направленных на изучение роли взаимодействия океана и атмосферы в климате Земли и на исследование океанических вихревых структур. Среди этих проектов высоким методическим и организационным уровнем выделялись программы:

Рис 6. А. С. Монин (1921—2007 гг.).

Fig. 6. A. S. Monin (1921—2007).

ПОЛИГОН-70, РАЗРЕЗЫ, ПОЛИМОДЕ, АТЛАНТЭКС-90, МЕЗОПОЛИГОН, МЕГАПОЛИГОН и др. Последняя из названных программ по количеству одновременно примененной в морских полевых условиях измерительной аппаратуры (до 200 заякоренных буйковых станций) и объему одновременно полученных научных данных остается до сих пор беспрецедентной во всей мировой истории развития морской гидрофизики. Крупномасштабные натурные эксперименты на океанских полигонах, проведенные в эти годы, завершились одним из наиболее крупных открытий в области наук о Земле — обнаружением синоптических вихрей открытого океана. В полевых работах по этим программам участвовали многочисленные коллективы научных и технических специалистов нашей страны. Общим научным руководителем всего проекта считался академик-секретарь ООФАГ АН СССР Л. М. Бреховских, который был назван основным автором этого открытия вместе с В. Г. Кортон, М. Н. Кошляковым и Л. М. Фоминым.

Океан и короткопериодная изменчивость климата — по такой проблематике в конце 1970—начале 1980-х гг. проведены крупномасштабные исследования в рамках российской программы РАЗРЕЗЫ под общим научным руководством академиков Г. И. Марчука и А. С. Саркисяна. Вначале эта программа имела только российскую принадлежность, но затем часть ее вошла в состав международной программы по циркуляции Мирового океана (WOCE).

Хотя А. С. Монин не оставил после себя формальной научной школы, по признанию современников он относился к числу наиболее одаренных гидрофизиков мира, оказавшим большое влияние на развитие этой науки во второй половине XX в. Генерация обильного количества идей в области наук о Земле, их разработка и превращение совместно с коллегами и учениками в конечный продукт — научные публикации, имели большое значение в его жизни. Это и не удивительно — его собственного интеллекта и необыкновенного трудолюбия хватило на то, чтобы фактически в единственном лице представлять собой настоящий университет по целому комплексу знаний в области наук о Земле. Десятки книг и сотни научных статей, опубликованные у нас в стране и за рубежом с 1965 по 2005 г составляют его богатое научное наследие. Достойным плодом его творения в области гидрофизики океана явился выход в свет под его редакцией в 1970-х гг. 10-ти томов коллективной монографии «Океанология», два первых тома которой посвящены гидрофизике океана. В этих книгах в оптимальной форме изложен весь свод современных на момент публикации знаний в данной области, сформулированных на основе профессионального опыта А. С. Мониним и его коллегами, наиболее авторитетными российскими гидрофизиками, — Л. М. Бреховских и Ю. П. Лысановым (Акустика океана), В. А. Бурковым, М. Н. Кошляковым и В. Н. Степановым (Общие сведения о Мировом океане), С. С. Войтом (Волны цунами), М. М. Заславским (Ветровые волны), С. С. Зилитинкевичем и Д. В. Чаликовым (Взаимодействие океана и атмосферы), Б. А. Каганом (Приливы), В. М. Каменковичем и Г. М. Резником (Теория океанских течений и волн Россби), Б. А. Нелепо (Ядерная геофизика), Р. В. Озмидовым (Турбулентность в океане), К. Н. Федоровым (Тонкая структура гидрофизических полей), К. С. Шифриным (Оптика океана). Многие из авторов этой монографии в свое время создали свои собственные научные школы практически по всем вышеназванным разделам науки.

Важную роль в постановке и решении прикладных гидрофизических задач, в частности, в интересах Военно-морского флота на протяжении нескольких десятилетий играл «Научный совет по комплексной проблеме «Гидрофизика» при Президиуме АН СССР, который возглавлялся крупными учеными, такими как президент АН СССР А. П. Александров и академик А. В. Гапонов-Грехов. Этот совет существует и поныне.

К концу XX в. окончательно сформировалась структура ключевых направлений в гидрофизике океана. Их оптимальный набор определился в зависимости от естественных особенностей физической природы и пространственно-временных масштабов явлений и процессов, объединяемых этим общим понятием. Современную гидрофизику океана можно условно представить в виде двух основных разделов: скалярного и векторного. Первый раздел связан с измерением и анализом скалярных характеристик океана, таких как температура воды, ее соленость, плотность и их производные. В этот же раздел обычно входят исследования оптических и акустических характеристик водных масс. Вместе с тем, распределение скалярных характеристик в океанской и морской воде подчиняется закономерностям, определяемым динамическими факторами.

В состав динамического раздела гидрофизики океана включаются исследования таких явлений и процессов, как течения, волны, конвекция, перемешивание и обмен веществом и энергией на границах

различных сред и внутри массы неоднородной океанской воды. В системе каждого из двух названных разделов структурное подразделение конкретных научных программ исследований строится в соответствии с пространственно-временными масштабами изучаемых объектов. Диапазон этих масштабов весьма широк и лежит в пределах от микроструктурных явлений, начинающихся от молекулярной диффузии, до климатически значимого глобального океанского конвейера.

В 1990-е гг. из-за социально-экономических проблем развитие гидрофизики, как и других разделов океанологии и науки в целом, в России затормозилось. Тем не менее, за последние два десятилетия отечественная экспериментальная гидрофизика существенно пополнилась уникальными результатами измерений динамических характеристик и трассировкой путей распространения придонной антарктической воды в системе глубоководных геоморфологических разломов в Атлантическом океане (Морозов Е. Г. и др.). Важный вклад в организацию мониторинга климатической изменчивости гидрофизического режима Северной Атлантики вносят гидрологические судовые наблюдения, систематически выполняемые на судах Института океанологии им. П. П. Ширшова на трансокеанском разрезе по 60° с.ш. (С. А. Добролюбов, А. В. Соков и др.). Существенно продвинуто развитие теоретических представлений о структуре и кинематике Глобального океанского конвейера (С. С. Лаппо, Ю. А. Иванов, М. Н. Кошляков, Р. Ю. Тараканов и др.).

Наряду с этим надо отметить, что в передовых странах мира в это время происходил переход от доминирования судовых методов мониторинга гидрофизических параметров морской среды к преобладанию автоматических, основанных на дрейфтерных технологиях, обеспеченных спутниковой связью для определения координат дрейфтера и оперативной передачи данных потребителю. Сначала была создана развернутая по всему Мировому океану (за исключением покрытых льдом акваторий) сеть поверхностных дрейфующих буйев с подводным парусом, а к началу 21 в. стала создаваться сеть зондирующих буйев с изменяемой плавучестью - поплавков Арго. С 2005 г. по настоящее время эта сеть составляет 3,5—4 тысячи буйев, регулярно зондирующих верхний 2000-м слой океана и измеряющих при этом не только профили гидрофизических параметров (температура, соленость и плотность), но и биооптических, и гидрохимических (опционально) характеристик морской воды. Оперативно передаваемые этими буями данные используются для изучения современных климатических трендов в океанах и морях, ассимилируются в численных гидродинамических моделях.

Усваиваемые в моделях данные буйев Арго совместно со спутниковыми данными (температура и уровень океана) позволили приступить к решению практически важной задачи — созданию оперативной океанологии, являющейся аналогом оперативной метеорологии, или службы погоды на Земле. Ее задачей является текущий диагноз состояния морской среды и краткосрочный (в пределах нескольких недель) его прогноз. Глобальному решению этой задачи препятствует наличие ледяного покрова в приполярных районах океана, для которых разрабатываются специализированные методы и средства мониторинга.

К сожалению, участие российской гидрофизики в развитии и внедрении новых технических средств изучения океана и в оперативной океанологии в силу ряда причин оказалось весьма ограниченным. Тем не менее, определенным достижением можно считать создание и постоянное пополнение базы данных поплавков Арго в ИО РАН и функционирующей на ее основе модели АМИГО, позволяющей достоверно воспроизводить климатические параметры вод океана и оценивать характеристики горизонтального тепло- и массопереноса (К. В. Лебедев). Имеется и хороший задел в области оперативной океанологии в МГИ РАН, где под научным руководством Г. К. Коротаева в сотрудничестве с европейскими коллегами была создана и действует система оперативного диагноза и прогноза гидрофизического режима Черного моря.

В условиях отсутствия адекватного финансирования крупных морских экспедиций вплоть до последних нескольких лет российские океанологи два десятилетия занимались, в основном региональными исследованиями в морях России. Следует отметить, что обзорные монографии по основным морям России с обширными разделами по морской гидрофизике были опубликованы еще в 1970—1980 гг. А. Д. Добровольским и Б. В. Залогиним, В. И. Куксой, А. К. Леоновым, Е. А. Плахиным и др. В 2006—2015 гг. А. Г. Костяной и И. С. Зонн опубликовали обзоры современных знаний по всем российским морским бассейнам. В изданной под редакторством В. А. Акуличева в 2015 г. многотомной монографии по Дальневосточным морям России значительное место отведено результатам современных исследований гидрофизических характеристик этого региона.

В настоящее время среди морей России наибольший интерес проявляется к изучению ее арктических акваторий. Во многом это связано со стратегическими интересами страны в этих морях, с потенциальной возможностью круглогодичной эксплуатации Северного морского пути в условиях потепления регионального климата. В частности, ИО РАН проводит ежегодные комплексные экспедиции на НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Карское море, море Лаптевых и Восточно-Сибирское море. И хотя основные задачи этих экспедиций связаны с исследованием биогеохимических процессов, гидрофизические исследования в них также хорошо представлены, ибо без обстоятельного знания гидрофизической обстановки, невозможно правильно интерпретировать результаты морских биогеохимических исследований.

При проведении исследований в морях России, в последнее десятилетие особое внимание отечественных морских гидрофизиков привлечено к изучению процессов малых масштабов, которые, однако, могут оказывать существенное влияние на крупномасштабные явления. В результате проведения систематических исследований шельфовой зоны Черного моря в 2007—2018 гг. А. Г. Зацепин с коллегами обнаружили и описали новый энергетически значимый элемент стохастической циркуляционной структуры вод — субмезомасштабные вихри. Широкая распространенность субмезомасштабных вихрей установлена и для Белого, Баренцева и Карского морей, благодаря комплексным гидрофизическим исследованиям, выполненным в последние годы под руководством А. А. Родионова и А. В. Зимина в Санкт-Петербургском филиале ИО РАН. Применение разработанной В. Т. Пакой измерительной техники, позволяющей производить частые зондирования на ходу судна, дополненное результатами численного моделирования с субмезомасштабным пространственным разрешением, выполненного В. М. Журбасом, впервые позволило количественно оценить характеристики глубинных течений Балтийского моря и рассчитать его водообмен с прилегающими морскими акваториями. На основе использования данных многократных гидрофизических съемок, проведенных в первой декаде текущего столетия, Е. В. Семеновым выполнено репрезентативное численное моделирование динамики вод Белого моря. Не остались без внимания и водоемы суши: обширный комплекс гидрофизических исследований выполнен в 2003—2018 гг. П. О. Завьяловым с коллегами по международным и российским программам мониторинга состояния деградирующего Аральского моря, а также озера Иссык-Куль.

Определенные успехи у российских морских гидрофизиков имеются в области спутниковой океанологии (О. В. Копелевич, С. В. Станичный, А. А. Кубряков, А. Г. Костяной, О. Ю. Лаврова, М. М. Митягина и др.), в том числе по части изучения основных элементов гидрофизического режима морских водоемов (оптика, волны, уровень, контроль загрязняющих примесей и т. д.).

В последние несколько десятилетий трудами Д. А. Лайтхмана, П. С. Линейкина, Г. С. Голицина, С. К. Гулева, В. Е. Захарова (рис. 7), С. И. Бадулина, С. С. Зилитинкевича, В. Н. Зырянова, Г. И. Баренблатта, Б. А. Кагана, В. Ф. Козлова, Е. Г. Морозова, Е. Н. Пелиновского, И. А. Репиной, Ю. И. Троицкой, Д. В. Чаликова, Ю. Д. Чашечкина и других существенно продвинуты отечественные исследования в области теоретических и экспериментальных исследований волн и пограничных слоев, а также ряда других нелинейных гидрофизических процессов в океанской среде. В частности, группой сотрудников во главе с Ю. И. Троицкой на волно-ветровом канале ИПФ РАН проведены уникальные лабораторные эксперименты с ветро-волновыми взаимодействиями, открыты и описаны механизмы срыва капель и дана оценка их вклада в тепло и массообмен между водной и воздушной средами. К числу высококлассных современных российских достижений в области нелинейной гидрофизики океана относятся также работы Н. Б. Масловой по исследованию автоколебаний в сложных нелинейных природных системах. Оригинальные результаты, имеющие большое теоретическое и прикладное значение, получены В. А. Рябченко по моделированию морских экосистем в совокупности с трехмерными моделями океанической циркуляции.

Существенное продвижение в XXI в. достигнуто трудами Е. А. Куликова, А. Б. Рабиновича, Б. В. Левина и др. в создании концептуальных основ гидрофизического прогноза цунами и моделирования этого опасного явления. В развитие фундаментальных результатов, полученных в прошлом веке К. С. Шифриным, И. И. Гительзоном, О. В. Копелевичем, Г. С. Карабашевым в области гидрооптики океана, И. М. Левин выдвинулся в число мировых лидеров в области теоретических и экспериментальных исследований распространения света в воде, разработки теории и практики подводного видения.

Ученики и последователи корифея российской науки о морских берегах В. П. Зенковича получили весомые результаты в изучении гидродинамических условий переноса взвешенного вещества в



Рис. 7. В. Е. Захаров (1939).

Fig. 7. V. E. Zakharov (1939).

прибрежной зона океана (Н. А. Айбулатов, Ю. С. Долотов, Р. Д. Косьян, В. В. Лонгинов, Е. Н. Невесский и др.). Наряду с участием в традиционных судовых исследованиях морей России и отдельных районов Мирового океана, таких как, Северная и Южная Атлантика, а также пролив Дрейка в Южном океане (А. В. Соков, С. В. Гладышев, Р. Ю. Тараканов и др.) российские океанологи- гидрофизики в последние годы активно включились в разработку и внедрение в практику исследования автоматических средств измерения. В развитии оригинальных инженерно-измерительных разработок под руководством академика Г. В. Смирнова и его коллег (Н. А. Римский-Корсаков и др.) серьезное внимание уделяется созданию научно-технологической базы российской системы регионального оперативного мониторинга морской среды. Эта система включает спутниковое оптическое (В. Г. Бондур и др.) и радиолокационное зондирование (С. В. Переслегин и др.), пространственную сеть контактных измерений и математическое прогностическое моделирование с усвоением данных (Н. А. Дианский, В. Б.

Залесный, Р. А. Ибраев, Ю. А. Иванов, К. А. Коротенко, Е. В. Семенов и др.). Наряду с ее использованием для фундаментальных научных исследований система будет иметь практическое применение, в том числе для экологического мониторинга морских акваторий, в которых производится добыча полезных ископаемых, в частности, разработка месторождений нефти и газа. Серия новых приборов — Аквазонд, Аквалог, предназначенных для автоматического зондирования водной толщи на заякоренных буйковых станциях, разработана в ИО РАН группой инженеров под руководством А. Г. Островского в 2005—2013 гг. Эти приборы успешно внедрены в практику и работают не только в морях России, но и за рубежом.

Новые расширенные возможности для дальнейшего развития экспериментальных гидрофизических исследований Мирового океана и морей России предоставляются отечественным ученым в связи с созданием Центра коллективного пользования научно-исследовательским флотом Российской академии наук при Институте океанологии им. П. П. Ширшова РАН. Эта деятельность постепенно расширяется и продолжает активно поддерживаться также Российским научным фондом и Российским фондом фундаментальных исследований.

Гидрофизика океана является и самостоятельным, и связующим разделом в системе наук о природной среде планеты Земля. Рациональное, экологически безопасное взаимодействие с этой средой в интересах человека невозможно без реальных знаний о физических свойствах и закономерностях природных процессов, протекающих на нашей планете. Эти знания приобретаются в первую очередь за счет комплексной реализации современных теоретических и экспериментальных исследований. Трудно переоценить вклад отечественных деятелей науки в создание современного уровня развития этой научной дисциплины. Имена российских ученых Ю. М. Шокальского, Н. Н. Зубова, В. В. Шулейкина, В. Б. Штокмана, А. С. Моница, Л. М. Бреховских, В. Г. Корта и многих других навсегда останутся в списке наиболее выдающихся гидрофизиков, посвятивших свою научную жизнь познанию природы Мирового океана. Вместе с тем, авторы статьи сохраняют уверенность в том, что достижения российской гидрофизики мирового уровня останутся не только в прошлом, но и явятся уделом новых поколений отечественных океанологов XXI в.

Работа выполнена по теме госзадания № 0149-2019-0004.