**РАЗВИТИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ
ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЗО- И МИКРОМАСШТАБНЫХ
ПРОЦЕССОВ В ТЕЧЕНИЕ 30 ЛЕТ ПОСЛЕ УХОДА
К.Н. ФЕДОРОВА (1988–2018 гг.)**

**Пака В.Т., Корж А.О., Кондрашов А.А., Подуфалов А.П.,
Ландер М.Р., Журбас В.М., Голенко М.Н.**

*Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, 117997, г. Москва,
Нахимовский проспект, д. 36.
тел/ факс: +7(906)2386085/+7 (401)2452813; e-mail: vpaka@mail.ru*

The report is devoted to the memory of Konstantin Nikolaevich Fedorov, who had an invaluable influence on the setting of tasks for research of small-scale structure of physical fields of the ocean by experimental methods. The achievements of the team of authors in solving such problems are presented.

Круг научных интересов Константина Николаевича Федорова был весьма широк, и то, чем занималась Лаборатория экспериментальных гидрофизических исследований (ЛЭГФИ) в Калининграде, не могло не привлечь его внимания. Первой совместной работой стал анализ с позиций развиваемой К.Н. Федоровым теории фронтальных зон накопленного нами массива измерений температуры поверхности океана буксируемым датчиком. Однако в арсенале ЛЭГФИ были отнюдь не только буксируемые термометры. В рейсах использовались термотрал, буксируемые турбулиметры, различные зонды для измерений горизонтальной и вертикальной структуры с высоким разрешением, столь нужным для исследования основного детища К.Н. Федорова – тонкой структуры и механизмов ее формирования. Поэтому логичным было приглашение нашей команды в 1978 г. в организованный К.Н. Федоровым рейс на «Курчатове» в район Гольфстрима для исследования его рингов и фронтальных зон. В этом рейсе родился наш первый микроструктурный свободно-падающий зонд (МСПЗ) «Баклан», положивший начало серии постоянно совершенствуемых зондов-турбулиметров, и возникло множество задач по доработке буксируемых устройств. По данным микроструктурного зондирования в течении Кромвелла (ДМ 24, 1980) была написана статья о влиянии термической структуры верхнего слоя океана на развитие турбулентности [1]. Важным результатом доработки буксируемых зондов стало создание сканирующего зонда на базе CTD Марк

3, возможности которого были проверены в исследованиях средиземноморской линзы. Одно из свойств этой линзы – способность оставлять след в океане – было отмечено Константином Николаевичем в нашей совместной работе [2]. Дальнейшее развитие измерительных устройств с высоким пространственным разрешением продолжилось после ухода К.Н. Федорова из жизни, но мотивация новых разработок сохранилась со времен нашего тесного сотрудничества. В этом аспекте заслуживают упоминания следующие разработки.

1. Техника измерений структуры деятельного слоя океана на пространственных разрезах. Мы отдавали приоритет использованию лебедок для перемещения зонда в процессе сканирования, хотя многие фирмы предлагали гидродинамические системы управления заглублением. Использование лебедок облегчает адаптацию буксируемых зондов к решению разнообразных задач – от исследования пакетов короткопериодных внутренних волн на океанском шельфе до исследования структуры обширных фронтальных зон на примере зоны Гольфстрима. Кульминацией возможностей исследования структуры особо сложных фронтальных зон было создание сканирующего термохалотрала. Однако вскоре после его успешного испытания наши регулярные исследования в океанах прекратились, и объектами исследований стали относительно мелководные моря и шельфы России. В результате, особое внимание было уделено проблеме безопасного достижения дна, и эту проблему удалось решить. В ходе этих работ произошел переход от 3-канальных CTD-зондов к мультипараметрическим зондам типа Idronaut 316, предназначенным для комплексных экологических исследований водных объектов.

2. Требование к комплексности измерений привело к созданию буксируемых акустических профилографов скорости течений (ADCP). Нашей находкой было размещение ADCP на носителе с положительной плавучестью, который заглублялся под весом кабель-троса с дополнительно установленными на нем свинцовыми «бусами». В таком варианте буксирная линия имеет провис, а прибор располагается несколько выше провиса и может безопасно приближаться к грунту. Одновременно была решена задача стабилизации положения прибора, буксируемого вблизи взволнованной поверхности моря. Для этого использовался асимметричный бридель, обеспечивающий боковой увод и стабилизацию по крену, которую трудно обеспечить, когда прибор буксируется без увода. Плавающий носитель удобен и тем, что его можно не выбирать и продолжать измерения на дрейфовых станциях.

3. Одной из самых сложных задач экспериментальной гидрофизики является измерение горизонтальной микроструктуры. Мы пытались

решить ее, но постоянно сталкивались с вибрацией датчиков пульсаций скорости, наведенной вибрацией нагруженного буксирного троса. Опыт работ с носителями с положительной плавучестью подсказал решение и этой проблемы: помеха подавляется, если турбулиметр присоединять к буксирной линии с помощью горизонтального поводка, который крепится к массивному телу, не передающему вибраций кабель-троса. Работоспособность буксируемого турбулиметра была проверена в реальных условиях. К сожалению, исследования, в которых такого рода измерения были необходимы, в настоящее время прекращены. Больше повезло измерениям вертикальной микроструктуры, что создало перспективы развития МСПЗ. Возникла потребность исследования вовлечения в глубоководном гравитационном течении на дне Датского пролива, участвующем в формировании глубинных вод Атлантики. Чтобы оперативно доставить МСПЗ на километровые глубины, нами предложена и запатентована оригинальная схема построения зонда с «магазином», в котором размещается запас тонкого фала [3]. Зонд доставляется на стартовую глубину без расхода фала на отдельном носителе. Достигнув стартовой глубины, зонд по команде оператора отсоединяется от носителя и свободно падает до тех пор, пока имеется запас фала в «магазине». В таком режиме был успешно исследован не только слой быстрого придонного течения толщиной до 300 м в Датском проливе, но и интрузионные структуры в зоне проникновения средиземноморских вод в восточной Атлантике. Измерения от поверхности до дна со стартом с палубы судна проводились на Балтике и в других морях.

4. В настоящее время основная потребность в проведении комплексных гидрофизических исследований связана с нашим участием в международных проектах по проблеме воздействия на морскую экосистему Балтики затопленного в ней химического оружия. Оружие утратило герметичность, отравляющие вещества (ОВ) вошли в контакт с морской средой, и для оценки экологических рисков необходимо знать, как ОВ проникают в толщу воды и переносятся на большие расстояния от первичных источников. Учитывая, что источники ОВ находятся ниже перманентного балтийского галоклина и переносятся солеными плотными водами североморского происхождения в придонных слоях, максимум внимания уделяется динамике придонного слоя. В связи с этим пришлось модифицировать систему измерений на протяженных разрезах, отказавшись от сканирования на ходу с использованием лебедки; вместо этого все вертикальные зондирования выполняются свободно-падающим мультипараметрическим зондом, для чего судно на несколько минут ложится в дрейф после коротких переходов. Чтобы из-

бежать частых остановок движения судна, нами испытан новый способ зондирования в режиме свободного падения на ходу судна. Этот способ должен стать основным в наших планируемых исследованиях. В дополнение к измерениям на протяженных разрезах разработаны приборы для исследования горизонтальной структуры придонных скоростей, действующие по принципу инклинометров.

5. Наряду с развитием техники эксперимента постоянно развивалось и совершенствовалось моделирование процессов, в том числе мелкомасштабных, осуществляющих перемешивание. В основе лежит модель РОМ, разработанная в первую очередь для океана, но верификация модельных расчетов по результатам прямых измерений структуры вод Балтики и других шельфовых морей свидетельствует об эффективности ее применения.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (темы № 0149-2018-0012 и 0149-2018-0002) и при частичной поддержке РФФИ (грант № 18-05-80031).

ЛИТЕРАТУРА

1. Пака В.Т., Федоров К.Н. О влиянии термической структуры верхнего слоя океана на развитие турбулентности // Известия АН СССР. Сер. ФАО. 1982. Т. 18. № 2. С. 178–190.
2. Федоров К.Н., Пака В.Т. О термохалинном «шлейфе» внутритермоклинного вихря в океане // Доклады АН СССР. 1988. Т. 301. № 5. С. 1206–1209.
3. Paka V., Zhurbas V., Rudels B., Quadfasel D., Korzh A., and Delisi D. Microstructure measurements and estimates of entrainment in the Denmark Strait overflow plume // Ocean Science. 2013. Vol. 9. P. 1003–1014. www.ocean-sci.net/9/1003/2013/, doi:10.5194/os-9-1003-2013.