

А.Н.Серебряный

*Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, г.Москва
Акустический институт им. акад. Н.Н.Андреева, г.Москва*

**В.А.ИВАНОВ – ИССЛЕДОВАТЕЛЬ ВНУТРЕННИХ ВОЛН
НА МОРСКОМ ШЕЛЬФЕ**

Статья, посвященная памяти академика РАН В.А.Иванова, рассматривает одно из главных направлений его научных интересов – исследования внутренних волн на шельфе, в котором он работал со своих первых шагов в океанологии и в котором он достиг признанных результатов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *внутренние волны, стационарная платформа, распределенный датчик температуры, спектры частотные и пространственные, механизмы генерации внутренних волн, Каспийское и Черное море*

doi: 10.22449/2413-5577-2019-4-6-13

Введение. Мое знакомство с Виталием Александровичем Ивановым произошло в 1977 г. в Акустическом институте (АКИН), куда я был направлен молодым специалистом по распределению после окончания вуза. Виталий Иванов был в то время аспирантом кафедры океанологии Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова (МГУ). Его руководителем был Алексей Нилович Косарев, а научным консультантом по диссертации – Константин Васильевич Коняев из АКИНа. Этим объяснялось частое присутствие В.А.Иванова в океанологическом секторе АКИНа, где работал К.В.Коняев. Океанологический сектор, возглавляемый Константином Дмитриевичем Сабининым, входил в большой отдел акустики океана, руководимый в то время академиком Л.М.Бреховских. Все перечисленные ученые сыграли важную роль в научной биографии В.А.Иванова. Уже в зрелые годы он говорил о К.Д.Сабинине и К.В.Коняеве как о своих учителях, отзываясь о них с большой благодарностью.

Отдел акустики океана АКИНа представлял в то время научный коллектив численностью более 100 человек, в котором работали известные ученые, определяющие ведущее положение страны по акустике океана в мировой науке. Л.М.Бреховских понимал важность исследования внутренних волн в океане, в связи, с чем в его отделе этому направлению уделялось большое внимание [1]. Под руководством К.Д.Сабинина был собран коллектив сотрудников, успешно развивавших новые методы исследования внутренних волн в океане, с достигнутыми результатами, вышедшие на передовой край мировой науки. В начале 70-х гг. XX в. К.В.Коняевым и К.Д.Сабининым было предложено новое средство для измерений внутренних волн – распределенный датчик температуры [2]. На его основе были разработаны пространственные антенны датчиков, позволявшие измерять пространственные спектры внутренних волн, чего раньше никем не делалось. В океа-

© А.Н.Серебряный, 2019

Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. вып.4. С.6-13.



Р и с . 1 . Свайное основание на шельфе Каспийского моря, с которого проводились измерения внутренних волн пространственной антенной распределенных датчиков температуры в 1977 – 1978 гг. Снимок сделан с отходящего от платформы судна. В правом нижнем углу снимка В.А.Иванов бросает прощальный взгляд на платформу. Он закончил исследования на каспийском шельфе и ему предстоял переезд в Крым, связанный с новым этапом научной карьеры – переходить на исследования в Черном море.

нологическом секторе АКИНа усилиями К.В.Коняева было также осуществлено продвижение в математических методах обработки экспериментальных материалов, были развиты методы спектрального анализа [3]. В секторе К.Д.Сабинина развивалось два основных направления – это исследование внутренних волн в Мировом океане, которое возглавлял сам Константин Дмитриевич, и исследования внутренних волн в шельфовых зонах морей, которым руководил К.В.Коняев. Исследования по первому направлению осуществлялись на основе измерений внутренних волн в различных районах Мирового океана, проводимых во время научных рейсов на судах АКИНа и Института океанологии им. П.П.Ширшова (ИО), куда часто приглашали К.Д.Сабинина с его сотрудниками. В качестве основного инструмента исследований внутренних волн применялись разработанные в АКИНе пространственные буксируемые и дрейфовые антенны распределенных датчиков температуры. Второе направление решало задачи исследования внутренних волн на шельфах отечественных морей одновременно с решением методических задач по отработке новых океанских экспериментов.

Начало научного пути В.А.Иванова. Платформа в Каспийском море. Научная группа из АКИНа в начале 70-х гг. приехала в Баку для проведения экспедиции на Каспийское море. Здесь и пересеклись пути молодого океанолога В.А.Иванова с АКИНОм. Он стал участником совместных экспедиционных работ со стороны бакинских ученых. Эта встреча оказалась поворотной в судьбе В.А.Иванова – он активно подключился к исследова-

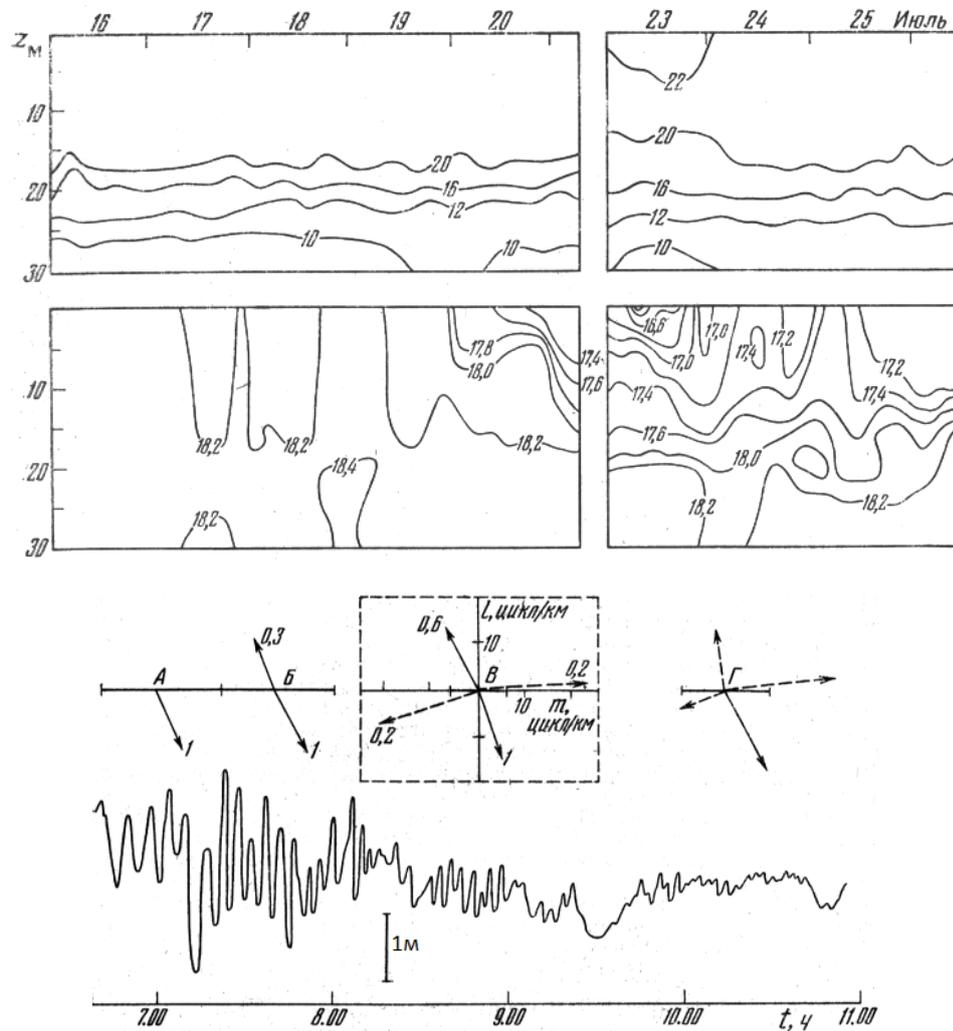
ниям внутренних волн на Каспийском море и стал сотрудничать с К.В.Коняевым. Измерения на шельфе Каспийского моря в течение нескольких лет проводились со стационарной платформы, оборудованной для научных наблюдений московскими академическими институтами Института физики атмосферы и ИО. Платформа располагалась на 20-километровом удалении от берега в месте с глубиной моря 40 м. Платформа была удобна для размещения многоэлементной антенны распределенных датчиков. В течение нескольких лет в летнее время с нее проводились длительные измерения внутренних волн с помощью пространственных антенн. Собранные данные позволили выявить основные закономерности поля внутренних волн на шельфе Каспийского моря. В 1974 г. В.А.Ивановым и К.В.Коняевым был впервые зарегистрирован бор на термоклине, и детально измерены его пространственно-временные характеристики. Появившаяся статья [4] стала первой научной работой В.А.Иванова, опубликованной в ведущем отечественном журнале. Данная работа привлекла большое внимание научной общественности. На примере регистрации этого явления была продемонстрирована успешная применимость новой методики измерения внутренних волн. В 1977 и 1978 гг. были проведены новые измерения внутренних волн с каспийской платформы. В.А.Иванов продолжал принимать активное участие в этих работах. Были получены новые важные результаты об образовании на шельфе внутренних боров и пакетов солитоноподобных внутренних волн, которые нашли отражение в обобщающей работе по внутренним волнам на Каспийском море [5]. В 1978 г. В.А.Иванов защитил кандидатскую диссертацию по исследованиям на Каспии на диссертационном совете в МГУ. После защиты он прошел по конкурсу в Морской гидрофизический институт (МГИ) АН УССР. Начался новый этап его научной карьеры, уже в Севастополе, куда он переехал в 1979 г.

Начало работы в МГИ АН УССР. Первые эксперименты на Черном море. В.А.Иванов активно включился в работу МГИ. В первый год работы он организовал и возглавил научный рейс на НИС «Айтодор» (впоследствии переименован в НИС «Профессор Колесников») по Черному морю. В рейсе наряду с другими задачами решались задачи исследования черноморских внутренних волн. Опыт, накопленный на Каспии, он успешно применил для внутриволновых исследований на Черном море. По результатам работ в этом рейсе появились его первые работы об особенностях внутренних волн Черного моря. Эти две короткие, но важные статьи [6, 7], вышедшие в виде кратких сообщений в журнале «Известия АН СССР. Физика океана и атмосферы», несмотря на прошедшее время до сих пор сохраняют научную ценность, потому что содержат фундаментальные результаты. В статье [6] были впервые представлены частотные спектры, измеренные в различных районах бесприливного Черного моря, и проведено сравнение спектров с модельным спектром Гаретта-Манка. Сделано заключение о соответствии спектров черноморских волн модельному по закону спадания, но отмечен их невысокий энергетический уровень по сравнению с волнами океана. Отсюда следовал вывод о роли приливов как основного источника генерации внутренних волн в океане.

В экспедиции были проведены длительные измерения волн со стационарной платформы на мелководном северо-западном шельфе Черного моря. Для измерений применялась пространственная антенна из 12 распределенных датчиков температуры, разнесенных на площади 60×110 м. В этом эксперименте впервые в полевых условиях удалось связать появление цуга интенсивных внутренних волн с источником их генерации [7]. Источником генерации оказался фронт проходящей интрузии поверхностных распределенных вод со стороны прибрежных районов шельфа, обогащенных пресной водой. На рис.2 из работы [7] показан цуги интенсивных внутренних волн от движущейся поверхностной интрузии. По мере прохождения цуга пространственные спектры волн испытывали трансформацию, связанную с увеличением частоты колебаний термоклина к концу цуга. Также обнаружилось появление стоячих волн. Этот механизм генерации внутренних волн, наблюдавшийся впервые в натурном эксперименте, весьма распространенный по всему Мировому океану, был позже продемонстрирован в наблюдениях на орегонском шельфе Тихого океана [8]. Он наиболее часто встречается в прибрежных районах морей, испытывающих влияние впадающих больших рек.

Океанографическая платформа в Кацивели. Первая экспедиция 1981 г. и последующие результаты. Полученные результаты в экспедиции 1979 г. показали, что при исследованиях внутренних волн можно не только ограничиваться измерением параметров волн, их частотных и пространственных спектров, но и изучать источники генерации внутренних волн в натуральных экспериментах. Задача, которая раньше казалась недостижимой. Обстоятельства так сложились, что в экспериментальном отделении МГИ в Кацивели в 1980 г. была введена в строй океанографическая стационарная платформа, с которой можно было проводить длительные измерения различных гидрофизических параметров в море. Она была размещена в прибрежной зоне моря на расстоянии 600 м от берега на глубине 30 м. В планах МГИ было также поставить вторую аналогичную платформу в этом же районе на больших глубинах на краю шельфа. Особенность замкнутого Черного моря в практическом отсутствии здесь приливов играла на руку нам в возможности наблюдать разные неприливные механизмы генерации внутренних волн в естественной стратифицированной среде. И проведенные последующие экспериментальные исследования подтвердили это предположение.

Летом 1981 г. В.А.Ивановым была организована первая официальная экспедиция МГИ на океанографической платформе в Кацивели. Основной целью экспедиции было проведение измерений внутренних волн с помощью пространственной антенны распределенных датчиков температуры, а также другими приборами. Виталий Александрович пригласил меня для организации измерений внутренних волн. В качестве помощников была выделена группа молодых сотрудников МГИ во главе с В.П.Ястребом. В эту группу также входил вчерашний студент, новый сотрудник отдела океанографии Ю.Н.Горячкин и еще два студента-практиканта с кафедры океанологии географического факультета МГУ (А.Юланов и А.Иванов). Экспедиция продолжалась с начала июня вплоть до конца сентября. Нами была установлена пространственная антенна распределенных датчиков температуры



Р и с . 2 . Один из наиболее интересных результатов, полученных в экспедиции на НИС «Айтодор» в июле 1979. г в северо-западной части Черного моря: регистрация цуга интенсивных внутренних волн, вызванных одним из широко распространенных непривливых механизмов образования внутренних волн в море [7]. Изменение температуры и солености верхней толщи моря, вызванное приходом теплых распресненных вод в район платформы 22 июля со стороны прибрежной части шельфа (*вверху*). Цуг интенсивных внутренних волн, зарегистрированный распределенным датчиком температуры во время прохода фронта поверхностной интрузии распресненных вод (*внизу*). Стрелками показаны волновые вектора, указывающие юго-восточное направление распространения внутренних волн в цуге.

по углам платформы. Она проработала длительное время, что дало возможность получить материалы не только по характеристикам внутренних волн крымского шельфа, но и выявить два новых механизма генерации внутренних волн в бесприливном море [9]. Был экспериментально доказан механизм образования пакетов интенсивных внутренних волн при выходе на

шельф внутренних инерционных волн. Также была показана генерация внутренних волн проходящими локальными гидрологическими фронтами стонно-нагонного происхождения. Амплитуды зарегистрированных внутренних волн достигали величин 5 – 6 м, при 30-метровой глубине моря, что указывало на их явную нелинейность. Была показана связь полосчатых сликовых структур на поверхности моря с проходящими под платформой пакетами внутренних волн [10].

В последующие годы В.А.Ивановым был проведен еще ряд совместных с его коллегами работ по внутренним волнам на шельфе Черного моря, шельфах Марокко, Гвинеи, Бразилии и открытых районах Атлантического океана, а также с платформы в Кацевели [11].

В 2001 г., после затишья в науке в 90-е гг., объяснявшееся тяжелым экономическим положением в странах СНГ в это время, отдел гидрофизики шельфа МГИ возобновил экспедиционные работы в Кацевели с океанографической платформы. Виталий Александрович снова пригласил меня участвовать в них. Ежегодно в летнее время в течение ряда лет стали проводиться экспедиционные исследования. Руководил экспедициями А.Д.Лисиченок, ученик В.А.Иванова. В это же время также велись долговременные приборные исследования течений А.С.Кузнецовым. Район моря около платформы стал функционировать как наблюдательный полигон за гидрологическими, гидрохимическими и гидрооптическими характеристиками вод прибрежных вод [12]. Характерной особенностью этого периода стало применение в морских экспериментах новой океанологической техники, что позволило продвинуться дальше в изучении процессов на шельфе Черного моря, включая исследования внутренних волн. С 2003 г. начались измерения с платформы с помощью доплеровского акустического профилометра течений (ADCP) – прибора, который давал не только полезную информацию о течениях, но и колебаниях термоклина, т.е. о внутренних волнах. С его помощью были получены новые данные о внутренних борах на крымском шельфе и другие важные результаты о внутриволновом климате прибрежной зоны [13 – 16]. Обзор результатов исследований внутренних волн с океанографической платформы МГИ за 30 лет ее существования был дан в [17, 18].

Заключение. Эта статья посвящена исследованиям Виталия Александровича Иванова, касающихся внутренних волн на шельфе морей, теме, которой он на протяжении всей жизни уделял большое внимание, и достиг в ней значительных результатов, но его интересы как океанолога и гидрофизика не ограничивались только этим, они были очень широкими. Научное наследие В.А.Иванова включает книги и статьи по многим направлениям океанологии, но объем статьи не позволяет рассмотреть все эти вопросы. В заключении я хочу привести ссылки на другие важные работы В.А.Иванова по внутриволновой тематике [19 – 23].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бреховских Л.М.* О некоторых проблемах акустики океана // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.– 1968.– т.4, № 12.– С.1291-1304.
2. *Коняев К.В., Сабинин К.Д.* Новые данные о внутренних волнах в море, полученные с помощью распределенных датчиков температуры // Докл. АН СССР.– 1973.– т.209, № 1.– С.86-89.

3. *Коняев К.В.* Спектральный анализ случайных океанологических полей.– Л.: Гидрометеиздат, 1981.– 208 с.
4. *Иванов В.А., Коняев К.В.* Бор на термоклине // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.– 1976.– т.12, № 4.– С.416-423.
5. *Иванов В.А., Коняев К.В., Серебряный А.Н.* Группы интенсивных внутренних волн в шельфовой зоне моря // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.– 1981.– т.17, № 12.– С.1302-1309.
6. *Иванов В.А., Серебряный А.Н.* Частотные спектры короткопериодных внутренних волн в бесприливном море // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.– 1982.– т.18, № 6.– С.683-685.
7. *Иванов В.А., Серебряный А.Н.* Внутренние волны на мелководном шельфе бесприливного моря // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.– 1983.– т.19, № 6.– С.661-664.
8. *Nash J.D., Mout J.N.* River plumes as a source of large-amplitude internal waves in the coastal ocean // Nature.– 2005.– v.437, № 7057.– P.400-403.
9. *Иванов В.А., Серебряный А.Н.* Короткопериодные внутренние волны в прибрежной зоне бесприливного моря // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.– 1985.– т.21, № 6.– С.648-656.
10. *Иванов В.А., Серебряный А.Н.* Проявление внутренних волн малых амплитуд на поверхности моря // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.– 1985.– т.21, № 7.– С.795-799.
11. *Власенко В.И., Иванов В.А., Лисиченко А.Д., Красин И.Г.* Генерация интенсивных короткопериодных внутренних волн во фронтальной зоне прибрежного апвеллинга // Морской гидрофизический журнал.– 1997.– № 3.– С.3-16.
12. *Зима В.В., Иванов В.А., Кондратьев С.И., Кузнецов А.С., Лисиченко А.Д., Серебряный А.Н., Чепыженко А.И.* Наблюдательный полигон за гидрологическими, гидрохимическими и гидрооптическими характеристиками вод в прибрежной зоне Южного берега Крыма в 2001 – 2002 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– 2003.– вып.2(7).– С.49-59.
13. *Иванов В.А., Лисиченко А.Д., Серебряный А.Н., Тарасов Л.Л.* Внутренние боры в прибрежной зоне Черного моря // Акустика океана. Доклады 11-ой школы-семинара акад. Л.М.Бреховских.– М.: ГЕОС, 2006.– С.330-335.
14. *Серебряный А.Н., Иванов В.А., Кузнецов А.С.* Исследования внутренних волн с океанографической платформы на крымском шельфе Черного моря // Акустика океана. Доклады 14-ой школы-семинара акад. Л.М.Бреховских.– М.: ГЕОС, 2013.– С.237-243.
15. *Серебряный А.Н., Иванов В.А., Кузнецов А.С., Химченко Е.Е., Лаврова О.Ю., Симонова Ю.В.* Исследования внутренних волн и течений в Черном море с платформы Морского гидрофизического института летом 2014 г. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– 2014.– вып.28.– С.62-70.
16. *Иванов В.А., Кузнецов А.С., Серебряный А.Н., Химченко Е.Е.* Исследования внутренних волн / Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне / Под ред. Иванова В.А. и Дулова В.А.– 2014.–вып.28.– С.401-424.
17. *Серебряный А.Н., Иванов В.А.* Тридцать лет исследований внутренних волн с океанографической платформы Морского гидрофизического института НАН

- Украины // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– 2010.– вып.21.– С.146-156.
18. *Серебряный А.Н., Иванов В.А.* Исследования внутренних волн в Черном море с океанографической платформы МГИ // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика.*– 2013.– вып.3.– С.34-45.
 19. *Иванов В.А., Леонтьева Е.А., Серебряный А.Н.* Пространственная структура внутренних волн в Эгейском море // *Морской гидрофизический журнал.*– 1986.– № 6.– С.61-64.
 20. *Горячкин Ю.Н., Гродский С.А., Иванов В.А., Кудрявцев В.Н., Лисиченок А.Д., Пелиновский Е.Н.* Многосуточные наблюдения за эволюцией пакета внутренних волн // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.*– 1991.– т.27, № 3.– С.326-334.
 21. *Горячкин Ю.Н., Иванов В.А., Пелиновский Е.Н.* Трансформация приливных внутренних волн на шельфе Гвинеи // *Морской гидрофизический журнал.*– 1991.– № 4.– С.53-59.
 22. *Иванов В.А., Пелиновский Е.Н., Талипова Т.Г., Троицкая Ю.И.* Статистические оценки параметров нелинейных длинных внутренних волн на полигоне Южного берега Крыма в Черном море // *Морской гидрофизический журнал.*– 1994.– № 4.– С.9-17.
 23. *Власенко В.И., Иванов В.А., Лисиченок А.Д., Красин И.Г.* Исследование интенсивных внутренних волн в шельфовой зоне Марокко // *Морской гидрофизический журнал.*– 1995.– № 4.– С.44-62.

Материал поступил в редакцию 04.11.2019 г.

A.N.Serebryany

V.A.IVANOV AS RESEARCHER OF INTERNAL WAVES ON THE MARINE SHELF

The article is dedicated to the memory of Academician of RAS V.A.Ivanov and elucidates one of his main scientific interests, namely, the study of internal waves on the shelf, in which he worked from his first steps in oceanology and where he achieved important results.

KEYWORDS: internal waves, stationary platform, distributed temperature sensor, frequency and spatial spectra, mechanisms of internal wave generation, the Caspian Sea, the Black Sea