

А.С.Кузнецов

*Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь***СИСТЕМА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВЕКТОРНЫХ ДАННЫХ
И ВОЗМОЖНОСТИ АНТЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕЧЕНИЙ**

Обсуждается возможность исследования изменчивости вертикальной гидрологической структуры прибрежных вод на базе данных мониторинга течений антенным комплексом эйлеровых векторно-осредняющих измерителей течений. Приведены оценки точности измерений, результаты системной обработки и анализа векторных рядов динамики, полученных измерительной антенной на стационарной океанографической платформе в ходе многолетнего эксперимента по исследованию характеристик прибрежных течений у мыса Кикинейз Южного берега Крыма.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *пограничный слой, технология антенных измерений, точность измерений, мониторинг течений, гидрологическая структура вод*

doi:10.22449/2413-5577-2018-1-50-57

Введение. В прибрежной зоне черноморского шельфа у побережья Крыма и Кавказа доминирует вклад интенсивных средне-, субмезо- и мелкомасштабных движений вод, например, [1 – 3]. На материковой отмели в приповерхностном и придонном пограничных слоях перманентно возникают интенсивные сдвиговые течения, гидрологические вергентные и турбулентные образования. В таких динамически активных зонах неконтролируемо возрастает вклад методических и динамических погрешностей, что кардинально снижает точности и достоверность экспериментальных данных как скалярных, так и векторных традиционных контактных измерителей. Интенсивные мелкомасштабные движений вод затрудняют достоверные исследования структуры крупномасштабной динамики и режимных характеристик прибрежных течений. Получение новых научных знаний о структурных особенностях поля прибрежных течений, оценка вклада разномасштабных гидрофизических процессов и Основного черноморского течения в совокупную динамику прибрежных вод является актуальной задачей.

В Морском гидрофизическом институте создан кластер специальных измерительных комплексов (градиентно-распределенных, векторно-осредняющих и др.), на базе которых реализована технология долгосрочных антенных измерений в интенсивных фронтальных зонах и пограничных слоях. Процедура пространственно-временной фильтрации натуральных данных позволяет просто, надежно и эффективно выделять интегральный вклад энергетически насыщенных гидродинамических образований, локализованных в пределах пространственной апертуры измерительной антенны. Интегральный подход к анализу изменчивости течений, регистрируемых вертикальной антенной эйлеровых векторно-осредняющих измерителей с фиксированной апертурой позволяет синхронно выделять и идентифицировать параметры когерентных гидродинамических структур в присутствии интенсивных мелкомасштабных движений. С целью получения высококачествен-

© А.С.Кузнецов, 2018

ных натуральных данных был выполнен многолетний натуральный эксперимент по исследованию особенностей динамики прибрежных течений на Черноморском гидрофизическом полигоне у Южного берега Крыма [4].

Оценка качества исходных данных и формирование рабочих массивов. В работе использованы экспериментальные данные, полученные со стационарной океанографической платформы на удалении 500 м от берега при глубине места 30 м вертикальной антенной из пяти эйлеровых векторно-осредняющих измерителей типа МГИ-1308 в слое 5 – 25 м с фиксированной апертурой, равной 5 м [4]. Исходный временной интервал векторно-осреднения в измерителях был установлен равным 5 мин при дискретности первичных измерений компонентов вектора течений равной 15 с. Генеральная совокупность полного антенного набора пятиминутных векторных данных за семилетний период наблюдений с 2009 г. по 2015 г. содержит около 3,6 млн. исходных векторно-осредненных значений вектора, вычисленных из 43,4 млн. пар первичных измерений компонентов вектора на каждом из пяти гидрологических горизонтов.

Оценка качества данных антенного комплекса векторно-осредняющих измерителей течений представляет собой совокупность последовательных процедур вероятностно-статистического, спектрального анализа и системной обработки исходных массивов с целью повышения их достоверности. В начале обработки векторных рядов динамики из генеральной совокупности исходных данных были вычислены функции распределения плотности вероятности значений модуля скорости и направления вектора течения для каждого горизонта. По стандартным эмпирическим критериям с учетом вычисленных значений дисперсий векторных компонентов были рассчитаны оценки интервалов достоверности зарегистрированных исходных значений. На основании этих оценок были выявлены и удалены очевидные сбойные значения в векторных рядах динамики. По стандартным алгоритмам были выполнены процедуры замещения и устранения последствий случайных пропусков и сбоев в рядах динамики [5, 6] и сформированы наборы непрерывных последовательностей для каждого двухнедельного цикла антенных измерений. За семилетний период наблюдений было выполнено 140 последовательных во времени двухнедельных циклов измерений антенным набором в совокупности из 684 постановок измерителей течений.

Для обеспечения единства измерений и единообразия средств измерений при таком множестве используемых измерителей в течение непрерывного семилетнего эксперимента эффективным способом достижения максимально возможных точностей измерений является устранение вклада систематических погрешностей в суммарную погрешность измерений путем неукоснительного соблюдения комплекса взаимосвязанных метрологических правил, требований и норм, например, [7]. Для устранения вклада систематических погрешностей в ходе всего многолетнего эксперимента за период с 2009 по 2015 гг. измерители течений МГИ-1308 в установленном порядке проходили метрологическую поверку и аттестацию первичных измерительных преобразователей в лабораторных условиях. Наряду с этим, по экспериментальным данным, полученным в течение каждого двухнедельного цикла измерений, проводилось сличение показаний набора контролируе-

мых измерителей, устанавливаемых дополнительно на промежуточных горизонтах [4]. По всему набору данных оперативно проводился нормативный контроль соответствия сличаемых характеристик. С этой целью для оценки качества натуральных данных дополнительно выполнена оперативная спектральная обработка специально сформированных рядов первых векторных разностей исходных данных. По результатам комплексного анализа изменчивости уровней плотности кинетической энергии таких рядов, с учетом вычисленных доверительных интервалов для двух диапазонов изменчивости для периодов колебаний 10 мин – 5,3 ч и 2 – 64 ч, сформировано заключение о качестве данных и определен алгоритм их последующей обработки.

Благодаря соблюдению установленных норм, требований метрологического единства и условий постоянства измерений в течение всего многолетнего динамического эксперимента в реализациях векторных рядов отсутствует вклад значимых систематических погрешностей. В такой ситуации случайная среднеквадратическая погрешность среднего значения (результата многократных измерений) при увеличении числа исходных измерений (N) снижается пропорционально множителю $1/\sqrt{N}$ [7] и в пределе достигает уровня разрешающей способности измерителя [8]. В рабочих условиях эксплуатации паспортное значение погрешности исходного (интервального) измерения модуля скорости течения измерителей МГИ-1308 составляет 5 % от измеряемой величины и достигает значения $\pm 4,0$ см/с для зарегистрированных в ходе эксперимента максимальных скоростей до 0,8 м/с [4]. Разрешающая способность первичного измерительного преобразователя скорости течения имеет значение 0,10 см/с. При этом случайная погрешность определения средних значений скоростей течения может быть снижена с 4,0 до 0,1 см/с при соблюдении определенных условий измерений и соответствующем увеличении числа исходных измерений в рабочем интервале усреднения. Паспортное значение случайной погрешности исходного измерения направления течения равно $\pm 5^\circ$ и, при усреднении исходных пятиминутных данных за 1 сутки, гарантированно достигает значения разрешения по углу $\pm 3^\circ$.

Из выверенных исходных данных были сформированы наборы корректных, интегральных значений векторных рядов динамики за интервалы пять минут и один час. По этим данным вычислены средние за семилетний период скорости и направления прибрежных течений у м.Кикинейз Южного берега Крыма на горизонтах 5, 10, 15, 20 и 25 м. Среднее течение в приповерхностном слое на горизонте 5 м имеет стабильное направление на запад – юго-запад (252°) при значении модуля скорости около 8,5 см/с. Максимум среднемноголетнего значения модуля скорости вдольберегового течения находится в приповерхностном слое и убывает с глубиной до значений около 6,5 см/с на горизонте 25 м. К придонному слою среднее течение совершает циклонический по глубине разворот в сторону глубокого моря и на горизонте 25 м имеет стабильное направление на юг – юго-запад (194°) согласованно с направлением расположения изобат локального рельефа дна.

По данным эквидистантно распределенной по глубине антенны измерителей выделена регулярная структура когерентных по пространству колебаний прибрежных течений, которые использованы для дальнейших исследований динамики вод. Из результатов спектрального анализа векторных дан-

ных выделен каскад максимумов кинетической энергии колебаний в толще вод от поверхностного до придонного слоя. На фоне низкочастотных колебаний среднего течения выделены статистически достоверные спектральные максимумы плотности кинетической энергии колебаний в вихре-волновом диапазоне изменчивости на периодах от трех недель до 2,5 сут, существующие одновременно с перемежаемыми колебаниями в инерционно-гравитационном диапазоне внутреннего волнения. Характерной особенностью исследуемых колебаний являются коллинеарные возвратно-поступательные перемещения прибрежных водных масс вдоль устойчивого направления среднего вдольберегового течения согласовано на всех глубинах. Результаты анализа демонстрируют стационарность во времени и консервативность направления оси коллинеарных движений прибрежных вод при различных масштабах колебаний течений. Основные научные результаты этого эксперимента представлены в работах [3, 4, 9].

Результаты многолетних исследований, полученные с высокой точностью, позволили достоверно выделить ряд специфических закономерностей низкочастотной изменчивости в вертикальной структуре прибрежных течений и сопоставить их с соответствующей изменчивостью вертикальной плотностной стратификации вод.

Способ оценки изменчивости гидрологической структуры вод по данным мониторинга течений. Традиционно при решении прямой задачи косвенных (модельных) исследований циркуляции водных масс используют натурные данные о пространственной структуре поля плотностной стратификации вод, поля ветра и других влияющих факторов. Принципиальная возможность подхода к решению задачи оценки изменчивости вертикальной плотностной структуры вод по данным прямых измерений течений лежит в основе предлагаемого способа. Метод прямых исследований изменчивости вертикальной структуры течений реализован на основе использования технологии антенных полигонных измерений при проведении многолетнего динамического эксперимента.

Результаты специальной обработки и анализа семилетнего набора векторных рядов динамики течений, полученные при антенных измерениях, демонстрируют принципиальные возможности предлагаемого способа мониторинга изменчивости вертикальной гидрологической структуры вод. В спектрах плотности кинетической энергии колебаний течений на всех гидрологических горизонтах присутствуют выраженные спектральные максимумы на полугодовом и сезонном периодах. Для достоверной оценки годовой изменчивости течений в исходных векторных рядах динамики течений методом цифровой фильтрации был удален вклад колебаний с периодами полгода и менее. Результаты такой обработки представлены на рис.1, *a* в виде векторно-усредненных временных реализаций модуля скорости устойчивого вдольберегового течения на пяти гидрологических горизонтах. Представленная на рис.1, *a* структура остаточных низкочастотных колебаний модуля скорости течения в диапазоне 5 – 11 см/с на первый взгляд носит сложный характер на всех горизонтах. К реализациям применена процедура текущей нормировки значений скоростей течений по глубине на соответствующую норму – значение скорости в приповерхностном слое. При такой норми-

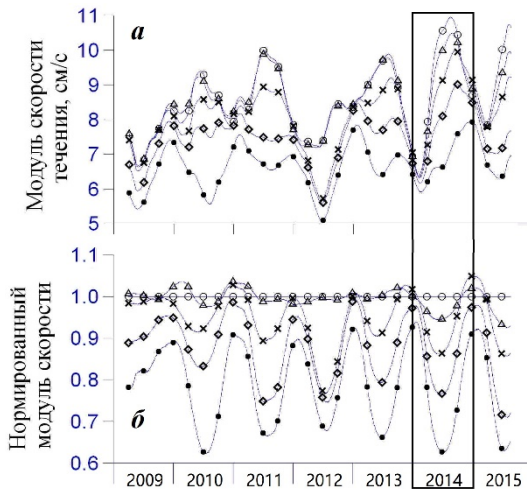


Рис. 1. Семилетние реализации модуля скорости прибрежного течения, усредненные за 183 суток (*a*), и их нормированные значения (*б*) для гидрологических горизонтов 5 м (—○—), 10 м (—△—), 15 м (—×—), 20 м (—◇—) и 25 м (—●—), соответственно, где в прямоугольнике выделен фрагмент для 2014 г.

ровке в семилетних реализациях колебаний скоростей прибрежных течений годовые циклы изменчивости на рис. 1, *б* становятся однозначно и четко выраженными. Временные сечения этих реализаций демонстрируют единую тенденцию, но различные темпы снижения нормированных значений скоростей по глубине. Изменения интервала усреднения исходных векторных рядов динамики течений приводит к изменению частотного состава анализируемых колебаний и рабочего диапазона средних скоростей, а, следовательно, к изменениям погрешностей их определений. На рис. 2, *a – в* изображены нормированные фрагменты одной и той же исходной реализации скоростей течений за 2014 г. при различных интервалах усреднения. На рис. 2, *a* представлен нормированный фрагмент при осреднении за 183 суток при рабочем диапазоне скоростей 5 – 11 см/с (рис. 1, *a*), что соответствует

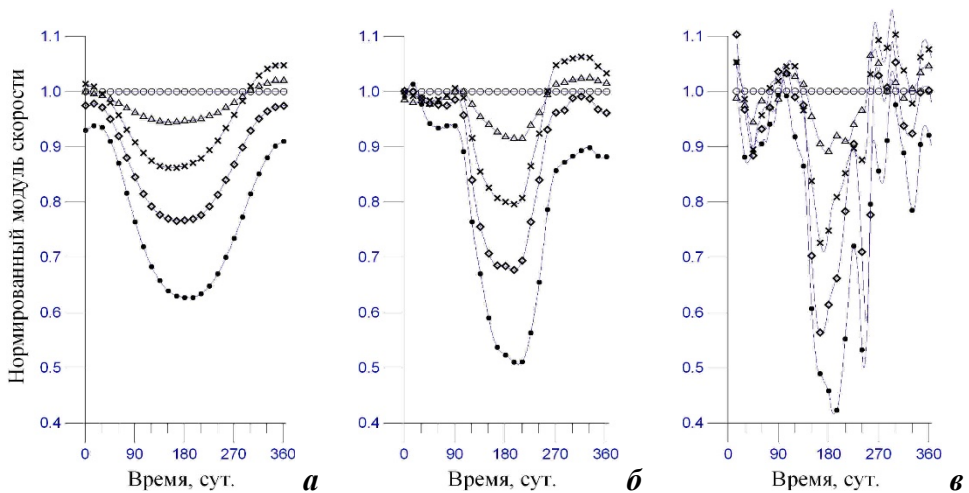


Рис. 2. Фрагменты временной изменчивости нормированных значений скоростей за 2014 г. из семилетних реализаций, выделенный в прямоугольнике на рис. 1, для гидрологических горизонтов 5 м (—○—), 10 м (—△—), 15 м (—×—), 20 м (—◇—) и 25 м (—●—) при усреднении за 183 суток (*a*), за 91 сутки (*б*) и за 21 сутки (*в*).

фрагменту за 2014 г. из семилетней реализации, представленной на рис.1, б (окоптурен прямоугольником). На рис.2, б представлен тот же фрагмент осредненный за 91 сутки при рабочем диапазоне 4 – 15 см/с и на рис.2, в – осредненный за 21 сутки при рабочем диапазоне 2 – 20 см/с. Максимальной для этих трех вариантов является погрешность определения векторно-осредненных за 21 сутки по 6048 исходным пятиминутным значениям вектора течения в рабочем диапазоне 2 – 20 см/с, которая по расчетам в итоге однозначно достигает чувствительности измерений 0,10 см/с. Для двух других указанных интервалов с большим интервалом усреднения погрешность определения скоростей гарантированно равна 0,10 см/с. На рис.3 представлены вертикальные профили нормированных скоростей течений характерные для зимнего (I) и летнего (II) сезонов 2014 г., полученные из реализаций рис.2, в, а также средний за семилетний период наблюдений профиль (Σ). Летнее уменьшение нормированных скоростей от поверхностного к придонному слою для реализации рис.2, в достигает значений 0,4, а для реализаций, представленных на рис.2, а, б, такие уменьшения не превышают значений 0,6 и 0,5 соответственно.

Высокая точность полученных материалов позволяет достоверно сопоставить изменчивость вертикальной структуры скоростей прибрежных течений с изменчивостью плотностной стратификацией вод на годовом, сезонном и синоптическом масштабах. В годовых циклах изменчивости выделены два основных типа вертикальных профилей нормированных скоростей прибрежных течений. Для зимнего гидрологического сезона в условиях слабой вертикальной стратификации квазиоднородных прибрежных вод характерен тип вертикального профиля (кривая I на рис.3), когда максимум модуля скорости может находиться в промежуточных слоях и слабо (в пределах 5 – 15 %) меняется по глубине. В пик летнего гидрологического сезона при сформировавшемся сезонном термоклине и устойчивой вертикальной плотностной стратификации вод характерен другой тип вертикального профиля (кривая II на рис.3), когда нормированный модуль скорости максимален в приповерхностном слое и значительно (в 2 – 3 раза) уменьшается к придонному слою. В переходные весенний и осенний сезоны происходит перестройка и модификация основных типов вертикальной структуры поля скоростей при общей тенденции убывания скоростей течения к придонному слою. На рис.3 кривая Σ является интегральной за семилетний период наблюдений характеристикой, которая демонстрирует снижение нормированных скоростей по глубине в среднем за год до значения 0,8.

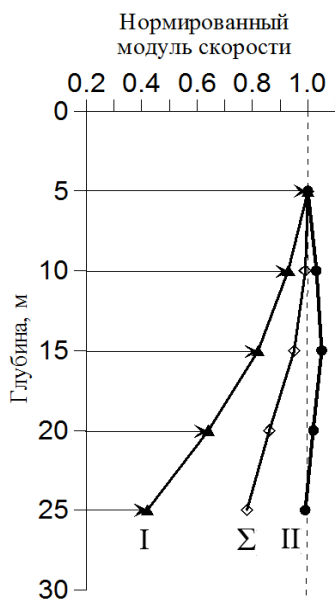


Рис. 3. Характерные типы вертикальных профилей нормированных скоростей прибрежных течений для зимнего (I) и летнего (II) гидрологических сезонов 2014 г. и интегральный за семилетний период профиль (Σ).

Особенности изменчивости гидрологической структуры и гидродинамики вод шельфовой зоны Черного моря [1] могут вызывать в прибрежной зоне на синоптическом и меньших масштабах колебания разнотипных вертикальных структур горизонтальных течений даже в пик летнего гидрологического сезона, например, [9]. Для достоверных оценок динамики подобных адвективных и вергентных возмущений прибрежных вод в диапазоне средне-, субмезо- и мелкомасштабной изменчивости требуется отдельное рассмотрение принципиальных физических факторов, влияющих на достоверность и точность определения характеристик горизонтальных компонентов течения на этих масштабах при мониторинге вертикальных движений прибрежных вод антенным комплексом автономных градиентно-распределенных измерителей.

Выводы. При проведении многолетнего натурного эксперимента на Черноморском гидрофизическом полигоне в шельфовой зоне у побережья Южного берега Крыма реализована новая информационная технология обработки данных антенного комплекса векторно-осредняющих измерителей течений, что позволило эффективно исследовать динамический режим и изменчивость характеристик прибрежных течений.

На основании выполненных исследований получены новые научные знания о структурных особенностях поля прибрежных течений и достоверные количественные оценки вклада Основного черноморского течения и разномасштабных гидрофизических процессов в совокупную динамику прибрежных вод.

Предложена новая перспективная системы анализа и оценки качества массивов исходных векторных рядов динамики течений, что позволяет на новом качественном уровне сформировать специализированную многолетнюю базу репрезентативных данных характеристик поля прибрежного течения. На этой основе получены и систематизированы новые научные знания о динамике прибрежных вод у Южного побережья Крыма, что позволило обосновать новый подход к оперативным и ретроспективным оценкам изменчивости гидрологической структуры прибрежных вод по данным мониторинга прибрежных течений антенным комплексом измерителей.

Многолетний опыт полигонных исследований Морского гидрофизического института, наличие кластера современных автономных векторно-осредняющих измерителей течений, градиентно-распределенных измерителей и гидрологических зондирующих комплексов позволяет оперативно на современном уровне использовать возможности технологии стационарных антенных измерений для верификации и развития перспективных дистанционных аэрокосмических и гидролого-акустических технологий исследования динамики морской среды.

Работа выполнена в рамках НИР № 0827-2018-0004 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» (шифр «Прибрежные исследования»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блатов А.С., Иванов В.А. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря.– Киев: Наукова думка, 1992.– 242 с.

2. *Зацепин А.Г., Баранов В.И., Кондрашов А.А., Корж А.О., Кременецкий В.В., Островский А.Г., Соловьев Д.М.* Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // *Океанология*.– 2011.– т.51, № 4.– С.592-605.
3. *Кузнецов А.С., Иванов В.А., Зима В.В.* Особенности мезомасштабной динамики вод у Южного побережья Крыма в 2008 – 2016 гг. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*.– Севастополь, 2017.– вып.1.– С.32-39.
4. *Кузнецов А.С., Иванов В.А., Зима В.В.* Особенности динамики течений у южного берега Крыма и перспективы использования информационной технологии полигонных исследований // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*.– Севастополь, 2014.– вып.28.– С.42-50.
5. *Иванов В.А., Кузнецов А.С.* Перспективы информационной технологии обработки и анализа данных традиционных измерителей течений // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*.– Севастополь, 2001.– вып.2.– С.250-261.
6. *Иванов В.А., Кузнецов А.С.* Технология контроля динамики прибрежных вод // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*.– Севастополь, 2003.– вып.2.– С.41-48.
7. *Алиев Т.М., Тер-Хачатуров А.А.* Измерительная техника.– М.: Высшая школа, 1991.– 384 с.
8. *Видуев Н.Г., Кондра Г.С.* Вероятностно-статистический анализ погрешностей измерений.– М.: Недра, 1969.– 320 с.
9. *Кузнецов А.С.* Перспективы совместных натуральных исследований динамики прибрежных течений и региональных анемобарических условий у Южного берега Крыма // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*.– Севастополь, 2016.– вып.2.– С.23-32.

Материал поступил в редакцию 19.02.2018 г.
После доработки 05.03.2018 г.

A. S. Kuznetsov

SYSTEM OF ASSESSMENT OF THE VECTOR DATA QUALITY AND OPPORTUNITY OF ANTENNA MEASUREMENTS OF CURRENTS

The variability of the vertical hydrological structure of coastal waters is investigated using data of the current monitoring by the antenna complex of Euler vector-averaging current meters. The measurement accuracy is estimated, the results of system processing are given, and the vector series of dynamics is obtained by a measuring antenna located on a stationary oceanographic platform during a long-term experiment on the study of coastal currents at the Kikineis Cape on the Southern coast of the Crimea.

KEYWORDS: boundary layer, antenna measurement technology, measurement accuracy, current monitoring, hydrological structure of water