

Геоинформационная система для анализа скоростей дрейфа буев-профилемеров *Argo* на примере Черного моря

Е. В. Жук ✉, Н. В. Маркова

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
✉ elena.zhuk@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 02.04.2024; одобрена после рецензирования 02.05.2024;
принята к публикации 16.05.2024.

Аннотация

Цель. Цель работы – разработка и реализация геоинформационной системы (ГИС), предоставляющей возможность онлайн-работы с данными буев-профилемеров *Argo* в Черном море и выполнение с ее помощью оценок скоростей дрейфа буев в разных слоях моря.

Методы и результаты. Геоинформационная система разработана на базе клиент-серверной архитектуры с использованием СУБД *PostgreSQL* для хранения данных буев *Argo*, библиотек *jQuery*, *Plotly*, *mapbox gl* – для реализации пользовательского интерфейса и картографического сервиса. Расчет и анализ скорости перемещения буев проводился на основе информации, предоставляемой проектом *Argo* в открытом доступе. Эта информация принимается с автономных дрейфующих буев-профилемеров и включает данные об их спутниковом позиционировании, глубинах дрейфа и профилировании. Скорости на горизонте дрейфа буя рассчитывались на основе данных о его траектории, при этом ГИС предполагает возможность быстрого пересчета скоростей при поступлении новых данных наблюдений, корректировки методики расчета, расширения спектра статистических характеристик, а также подключения ряда дополнительных опций. В действующей версии системы для расчета и анализа скоростей использован массив данных *Argo* за период с начала 2005 г. до середины 2022 г. С помощью ГИС выполнены оценки скорости дрейфа буев в Черном море, уточнены значения средней скорости по сравнению с предыдущими исследованиями и показана ее сезонная изменчивость в разных слоях моря.

Выводы. Разработанная ГИС дополняет онлайн-сервисы проекта *Argo*, существенно упрощая работу с океанографическими данными для Черного моря и их научный анализ без необходимости применения дополнительных скриптов, загрузки данных и внешних систем визуализации. Показаны примеры применения системы для оценки скоростей дрейфа буев-профилемеров на разных глубинах и в отдельных частях моря. В перспективе ГИС может быть дополнена новыми модулями: автоматического скачивания данных *Argo*, работы с аналогичными массивами данных (напр., получаемых с дрейфтеров, с измерителей течений *ADCP*), а также применена для любых других регионов.

Ключевые слова: геоинформационная система, ГИС, буи *Argo*, скорость дрейфа, течения, Черное море, база данных, БД

Благодарности: работы по разработке и внедрению ГИС выполнены в рамках тем госзадания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0012, FNNN-2024-0014. Исследование особенностей поля скорости проводилось в рамках темы госзадания FNNN-2024-0001. Авторы выражают благодарность доктору географических наук В. Н. Белокопытову за полезные консультации в процессе создания и тестирования системы, а также рецензентам за внимание к представленной работе и ее оценку.

Для цитирования: Жук Е. В., Маркова Н. В. Геоинформационная система для анализа скоростей дрейфа буев-профилемеров *Argo* на примере Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 4. С. 611–630. EDN ZWKGTA.

Original article

Geoinformation System for *Argo* Floats Drift Assessment: The Black Sea Case

E. V. Zhuk ✉, N. V. Markova

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

✉ elena.zhuk@mhi-ras.ru

Abstract

Purpose. The work is aimed at developing and implementing a geographic information system (GIS) that provides an opportunity for online work with the *Argo* float data in the Black Sea, and for its application for estimating the float drift velocities in different sea layers.

Methods and Results. The geoinformation system is developed based on a client-server architecture using *PostgreSQL* DBMS to store the *Argo* float data, the *jQuery*, *Plotly*, and *mapbox-gl* libraries and, therefore, to implement a user interface and a cartographic service. The float drift velocities are calculated and analyzed using the information provided by the *Argo* project in the public domain. The information is received from the autonomous drifting profiling floats and includes the data on their satellite positioning, drift depths, and profiling. The velocities at the float drift horizon are calculated using the data on its trajectory, meanwhile GIS assumes the possibility to recalculate fast the velocities when new observation data are received, adjust the calculation methodology, expand the range of statistical characteristics as well as to add a number of additional options. To calculate and analyze the velocities, the *Argo* data array (early 2005 – mid 2022) was included in the system current version. Application of GIS made it possible to estimate the float drift velocities in the Black Sea, to specify the mean velocity values as compared to the previous studies, and to show its seasonal variability in different layers of the sea.

Conclusions. The online services of the *Argo* project is complemented by the developed GIS, that simplifies significantly processing and scientific analysis of the Black Sea oceanographic data; in other words, there is no need to use additional scripts, data downloads and external visualization systems. The examples of applying the system for estimating the float drift velocities at different depths and in certain parts of the sea are shown. In future, GIS can be supplemented with new modules, such as automatic downloading of *Argo* data, operating with similar data arrays obtained, for example, from the drifters or *ADCP* current profilers, besides, it can be applied to any other region.

Keywords: geoinformation system, GIS, *Argo* floats, drift velocity, currents, Black Sea, database, DB

Acknowledgements: the work on development and implementation of GIS was carried out within the framework of the themes of state assignment of FSBSI FRC MHI FNNN-2024-0012 and FNNN-2024-0014. The velocity field features were studied within the framework of the theme of state assignment FNNN-2024-0001. The authors are grateful to Dr. Sci. (Geogr.) V. N. Belokopytov for useful consultations while developing and testing the system, as well as to the reviewers for their attention to the work and its appreciation.

For citation: Zhuk, E.V. and Markova, N.V., 2024. Geoinformation System for *Argo* Floats Drift Assessment: The Black Sea Case. *Physical Oceanography*, 31(4), pp. 562-579.

Введение

В последние два десятилетия источником регулярных данных о профилях основных гидрологических, гидрохимических и других характеристик морской среды стали автономные дрейфующие буи-профилемеры *Argo*¹. В открытом доступе находятся как получаемые с их помощью данные, так и полная информация об основных этапах развития системы наблюдения Мирового океана с использованием дрейфующих буев *Argo*, включая их конструктивные и эксплуатационные особенности. Буй-профилемеры могут оснащаться различными соответствующими поставленным задачам датчиками для проведения наблюдений параметров морской среды, при этом основными наблюдаемыми параметрами являются температура и соленость [1]. Вместе с тем одна из важнейших океанологических характеристик – скорость течений – не может быть напрямую измерена с их помощью. Расчет скоростей на основе траекторий буев, когда буй используется в качестве лагранжевых трассеров, позволяет оценить направление и амплитуды течений, структуру и изменчивость поля скорости.

Довольно полный критический обзор информации, получаемой с помощью буев *Argo*, изложен в работе [2], где в том числе говорится о методике вычисления скорости перемещения буев под водой на основе их спутникового позиционирования на поверхности. При этом в числе пионерских работ по расчету скоростей в океане следует отметить исследование², где приводятся основы методики вычисления скоростей буев *Argo* на глубинах их дрейфа (парковочных глубинах), а также оценки ошибок такого расчета вследствие вертикального сдвига скорости. Расчеты средних скоростей буев в Мировом океане также были выполнены в целом ряде работ, напр., в [3, 4] и в исследованиях [5–8] при оценке течений в Черном море. Сейчас в свободном доступе находятся архивы рассчитанных скоростей, полученные различными исследовательскими группами (рис. 1), однако простая и удобная онлайн-система для научного анализа этих данных пока не создана.

В онлайн-сервисах проекта *Argo* процедура расчета лагранжевых скоростей по произвольно выбранным данным и региону отсутствует, хотя массивы с оценками скоростей буев на основе их траекторий для всего Мирового океана периодически предоставляются для открытого доступа, в частности в *Copernicus Marine Service* (рис. 1). И хотя файлы с данными находятся в формате *netCDF*, отсутствие возможности предварительной выборки данных (по идентификатору буя, региону, дате, парковочной глубине и т. д.) делает эти массивы не вполне удобными для анализа динамических процессов.

¹ ARGO Data Management. URL: <http://www.ARGOfdatamgt.org/> (date of access: 18.03.2024).

² YoMaHa'07: Velocity data assessed from trajectories of Argo floats at parking level and at the sea surface / K. V. Lebedev [et al.]. Asia-Pacific Data-Research Center, 2007. 16 p. (IPRC Technical Note ; no. 4(2)). <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.12820.71041>

Velocity products				
Global Velocity Products				
Institution	Documentation & Access	description	Temporal coverage	Update frequency
Univ. Brest, IFREMER, CNRS (SNO Argo France/LOPS)	10.1175/JTECH-D-12-00073.1 data access	ANDRO: a global Argo based deep displacement dataset	2001 – 2020	yearly, but partially
Copernicus Marine Service	quality information pdf data access	Global trajectory product based on v3.1 and higher trajectory files	1997 – present	daily
CSIO	data access	Global trajectory product based on v3.1 and higher trajectory files	2001-2022	twice a year
IFREMER	pdf data access	ANDRO in Argo Trajectory V3 NetCDF files	2001 – 2009	rarely
IPRC	pdf data access	YoMaHa'07: velocity data assessed from trajectories of Argo floats at parking level and at the sea surface	1997 –	monthly
JAMSTEC	10.1007/s10872-010-0046-4 data access	Global gridded ASCII and NetCDF of YoMaHa'07 QC'ed Argo drift trajectories	Average since 2001-01-01	rarely
Scripps Institution of Oceanography	data access	Scripps Argo trajectory-based velocity product	2001 – 2022	twice a year
University of Washington	10.1175/JPO-D-12-0206.1 data access	Absolute Geostrophic Velocities from Argo (AGVA)	2004 – 2010	rarely

Р и с. 1. Массивы данных о скорости дрейфа буев, представленные на сайте <https://argo.ucsd.edu/data/argo-data-products/velocity-products/>
F i g. 1. Data arrays on the float drift velocities presented on the website <https://argo.ucsd.edu/data/argo-data-products/velocity-products/>

В то же время вся остальная прошедшая контроль качества информация, получаемая с буев *Argo*, в настоящее время доступна и регулярно обновляется. Поэтому с учетом постоянного поступления новых данных наблюдений *Argo* насущным является создание гибкой системы для выборки, обработки и первичного анализа скоростей в выбранном бассейне, способной оперативно выдавать самые свежие результаты обработки данных и производить их визуализацию. Реализация ГИС для расчета и обработки лагранжевых скоростей в бассейне Черного моря на данном этапе вполне оправдана и полезна как логичное дополнение существующих сервисов. Ее использование позволит получать информацию о скоростях дрейфа по различным выборкам (по слою, времени, району), а также быстро определять статистические характеристики и пересчитывать результаты в случае усовершенствования методики расчета.

Таким образом, цель данной работы заключается в разработке и реализации ГИС, предоставляющей возможность онлайн-работы с данными буев-профилемеров *Argo* в Черном море, а также – в качестве примера использования – в выполнении с ее помощью оценок скоростей дрейфа буев-профилемеров в разных слоях моря в 2005–2022 гг.

Данные и методы

Данные наблюдений. Основным источником данных для расчета скоростей являются находящиеся в открытом доступе архивы проекта *Argo*¹, в которых содержится информация, полученная как с действующих, так и с завершивших свою работу буев-профилемеров. Она включает метаданные для каждого буя (с техническими характеристиками и настройками), а также данные наблюдений океанографических параметров и спутникового позиционирования. Глубина дрейфа буя-профилемера является заданной, но не обязательно постоянной для всего времени работы буя. Кроме того, эта глубина может не достигаться в реальной обстановке при движении буя (вследствие особенностей рельефа дна). Глубины дрейфа буев можно восстановить по данным встроенного датчика давления, в то же время их точность в отдельные моменты движения зависит в первую очередь от заданной дискретности записи данных. Так, есть массивы данных, когда информация о давлении записывалась только в начальные и конечные моменты этапов рабочего цикла буя (рис. 2), что не гарантировало его дрейф на одной и той же парковочной глубине (напр., при наличии поднятия дна или выхода на мелководье). Этот момент необходимо было учитывать при реализации алгоритма расчета скорости.

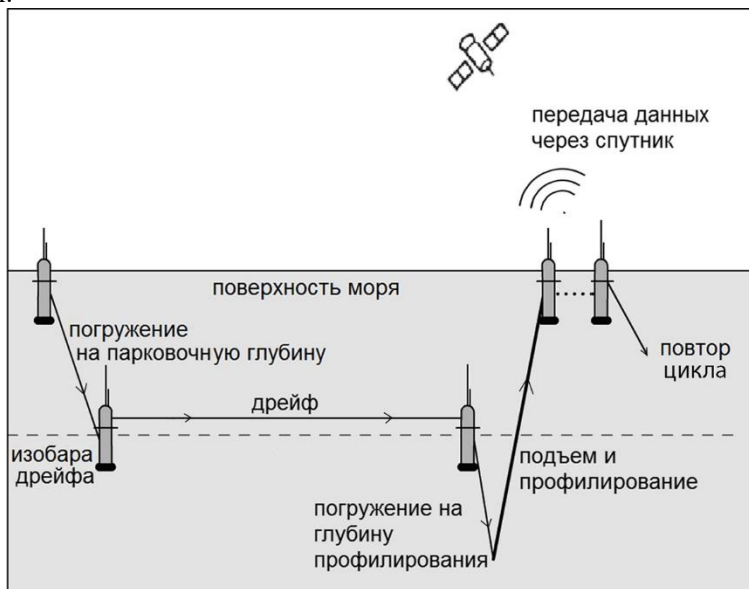


Рис. 2. Схема работы (рабочий цикл) буя-профилемера
Fig. 2. Argo float cycle

В Черном море наиболее часто задается рабочий цикл буя с периодом 120 ч (5 сут), парковочные глубины составляют 200–1500 м, а глубина профилирования достигает 2000 м. В представленном ниже исследовании для анализа скоростей используется массив данных буев *Argo*, включающий информацию за 2005–2022 гг. от всех действующих и завершивших свою работу буев, что превышает по объему используемые в предыдущих аналогичных

публикациях [5–8] данные по Черному морю. Большинство современных буев позиционируется спутниковой системой *Iridium*, что позволяет улучшить точность определения их координат при всплытии на поверхность по сравнению с более распространенной ранее системой коммуникации *Argos*³ [2] и, соответственно, более точно рассчитать значение скорости дрейфа.

Алгоритм расчета скорости дрейфа. Средние скорости дрейфа определялись согласно данным спутникового позиционирования буя-профилемера: рассчитывалось частное от деления перемещения буя под водой на соответствующий временной интервал между всплытием буя на поверхность и его предшествующим погружением на парковочную глубину: $v = dr/dt$, где dr – перемещение буя между точками позиционирования в рабочих циклах i и $i-1$; dt – промежуток времени между позиционированием буя в i и $i-1$ рабочих циклах.

Как уже отмечалось, подобная методика расчета лагранжевой скорости для бассейна Черного моря была впервые использована в исследовании [5], а позднее – в работах [6–8]. Понятно, что вышеуказанная формула предполагает погрешность определения скорости на любом парковочном горизонте, поскольку во временной интервал включаются не только периоды дрейфа буя на парковочной глубине: в него также входят периоды дрейфа буя на поверхности моря (между моментами его фактического всплытия/погружения и ближайшего позиционирования спутником) и периоды движения буя на вертикальных участках (во время его подъема на поверхность и обратного погружения) (рис. 2). Для Мирового океана способы устранения погрешностей предлагались, напр., в работах² и [3]. Выполнить точный расчет движения буя на вертикальных участках его траектории в Черном море довольно сложно, ведь основными предположениями для такой коррекции являются не только постоянство скорости погружения/всплытия самого буя (≈ 10 см/с), но и постоянство вертикального сдвига скорости в течение рабочего цикла². Это условие часто нарушается ввиду сильной плотностной стратификации вод (наличия постоянного пикноклина) и пространственно-временной изменчивости течений в бассейне [9, 10]. Поэтому в настоящей работе применяется аналогичная исследованиям [5–8] методика, а получаемое уточнение оценок скорости связано, в первую очередь, с увеличением общего количества накопленных данных буев, а также с более быстрым позиционированием большинства современных буев системой *Iridium* на поверхности моря по сравнению с ранее используемой *Argos*. Пополнение базы данных (БД) новыми данными буев предполагает дальнейшее улучшение оценок скорости.

В настоящей работе использованы данные 42 буев *Argo*, дрейфовавших в Черном море на глубинах 200–1500 м с начала 2005 г. до середины 2022 г. Векторы скорости рассчитывались с учетом всех имеющихся данных и контроля достижения буем запрограммированных глубин. Используемые мета-

³ A Comparison of Iridium vs Argos Technology in Xeos Location Beacons : Tech Note // Xeos Technologies Inc. : site. Dartmouth, 2019. URL: <https://xeostech.com/comparison-iridium-vs-argos-technology-xeos-location-beacons> (date of access: 18.03.2024).

данные о глубине дрейфа для каждого рабочего цикла буя-профилемера являются более точными, чем в работе [8], когда рассматривалась парковочная глубина, заданная в метаданных для всего пути буя. Кроме того, с запуском новых буев, позиционируемых спутниковой системой *Iridium* с применением *GPS* [2, с. 5], увеличивается их процентное соотношение. Использование системы *Iridium* делает более быстрым и точным определение координат буя в моменты всплытия/погружения. В процессе обработки данных *Argo*¹ выяснилось, что, хотя они и проходят контроль качества перед размещением для скачивания пользователями, в них все же остаются ошибки в определении местоположения отдельных станций. Вследствие этого такие станции были отбракованы, а флаги качества данных сохранены в БД ГИС.

Геоинформационная система. Оценка скоростей дрейфа буев *Argo* проводилась на основе анализа расчета их средней скорости с использованием ГИС, доступной на сайте <http://www.bod-mhi.ru/ff/>⁴. Источником данных для ГИС были файлы данных буев *Argo* в форматах *netCDF* и *csv*, содержащие информацию о номере буя, его местоположении, времени начала профилирования, измеренных параметрах, а также отдельные файлы с метаданными, в которых представлена информация о глубине подводного дрейфа до начала профилирования. Реальная глубина дрейфа в течение рабочего цикла известна практически для всех буев, за исключением буев с номерами 7900465, 7900466, 4900540, 4900541, 4900542, 4900489. Для этих буев применялся такой же метод ее проверки, как и в работе [8]. При этом использовались данные из раздела описания буев (циклы профилирования, глубина измерений и глубина дрейфа) на сайте¹, указанная глубина дрейфа проверялась на соответствие фактически проведенным наблюдениям (глубина начала профилирования и глубина места должны быть не меньше заявленной глубины дрейфа). Подобные проверки проводились и в работе [3, с. 769].

На основе анализа структуры данных буев-профилемеров авторами была разработана структура реляционной БД и написаны программные модули для парсинга (разбора) исходных данных и занесения информации в таблицы БД. В качестве СУБД используется *PostgreSQL*⁵. База данных состоит из таблицы, содержащей метаданные (*argo_trajectories*), и связанной с ней по ключевым полям таблицы данных измерений (*argo_profiles*). Первоначальная структура БД была представлена в работе [11]. В настоящей работе таблица *argo_trajectories* была дополнена значениями скоростей дрейфа, обновленная структура таблиц приведена ниже (табл. 1 и 2, названия полей и типов данных приводятся в оригинале). Заполнение таблиц происходило автоматически с помощью разработанного программного модуля на языке *Python*.

⁴ Банк океанографических данных Морского гидрофизического института РАН : база данных. URL: <http://www.bod-mhi.ru/ff/> (дата обращения: 27.03.2024).

⁵ PostgreSQL: The World's Most Advanced Open Source Relational Database : database. 2024. URL: <https://www.postgresql.org/> (date of access: 27.03.2024).

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Метаданные (*argo_trajectories*)
Metadata (*argo_trajectories*)

Название поля / Field name	Тип данных / Data type	Описание / Description
<i>id</i>	serial	Индекс / Index
<i>argo_platform_id</i>	int	Идентификатор <i>Argo</i> / <i>Argo</i> identifier
<i>cycle</i>	int	Номер цикла профилирования / Profiling cycle number
<i>date_time</i>	timestamp	Дата и время профилирования / Date and time of profiling
<i>latitude</i>	float	Широта / Latitude
<i>longitude</i>	float	Долгота / Longitude
<i>drift_depth</i>	float	Глубина дрейфа / Drift depth
<i>velocity</i>	float	Модуль скорости дрейфа / Drift velocity absolute
<i>degree</i>	int	Направление дрейфа / Drift direction
<i>qc</i>	int	Флаг качества / Quality flag

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Данные профилирования (*argo_profiles*)
Profiling data (*argo_profiles*)

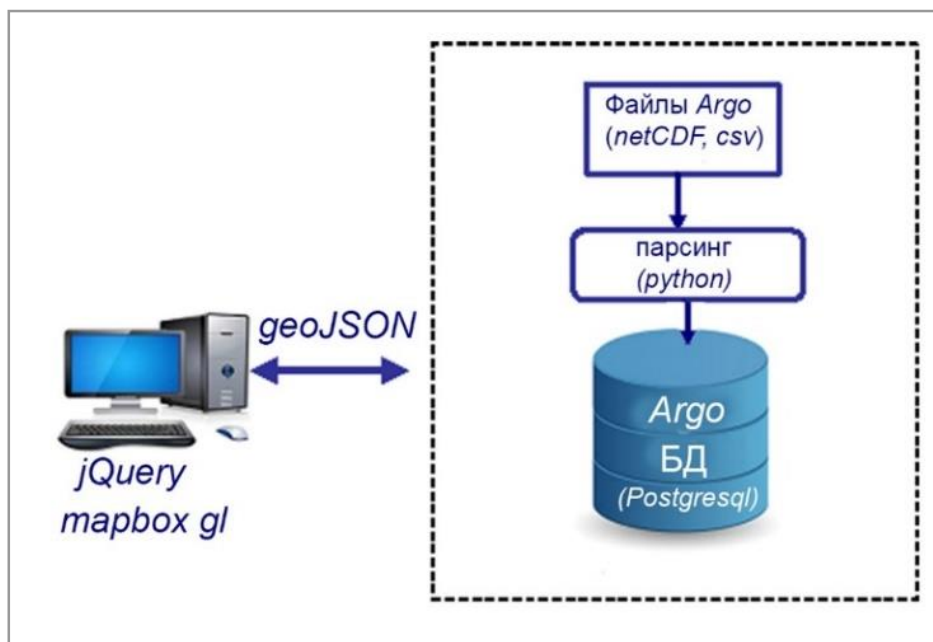
Название поля / Field name	Тип данных / Data type	Описание / Description
<i>id</i>	serial	Индекс / Index
<i>argo_platform_id</i>	int	Идентификатор <i>Argo</i> / <i>Argo</i> identifier
<i>cycle</i>	int	Номер цикла профилирования / Profiling cycle number
<i>pressure</i>	float	Давление / Pressure
<i>temperature</i>	float	Температура / Temperature
<i>salinity</i>	float	Соленость / Salinity
<i>doxy</i>	float	Концентрация кислорода / Oxygen concentration
<i>chlorophyll</i>	float	Концентрация хлорофилла / Chlorophyll concentration

П р и м е ч а н и е. Полу жирным шрифтом в таблицах выделены ключевые поля.
N o t e: Key fields in the tables are highlighted in bold.

Для удобства работы с БД, проведения статистических расчетов, выборки и визуализации данных профилирования и дрейфа был разработан пользовательский веб-интерфейс, обеспечивающий весь необходимый функционал. Структура системы хранения и выборки данных показана на рис. 3.

Разработанная ГИС предоставляет возможность работать в двух основных режимах:

- с **одним** выбранным по идентификатору буюм-профилемером,
- со **всеми** буюми.

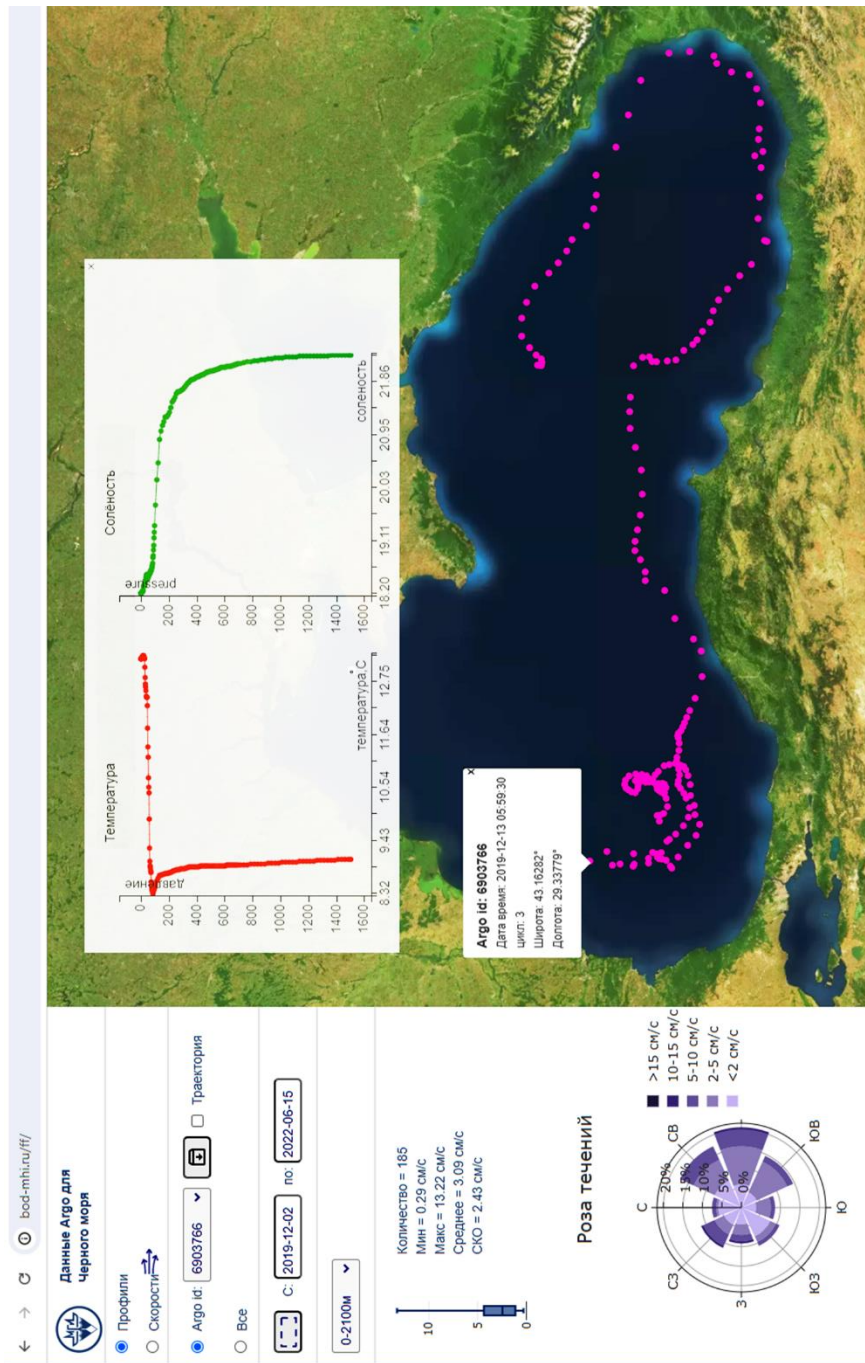


Р и с. 3. Структурная схема системы доступа к данным *Argo* для Черного моря
F i g. 3. Structure scheme of the *Argo* data access system for the Black Sea

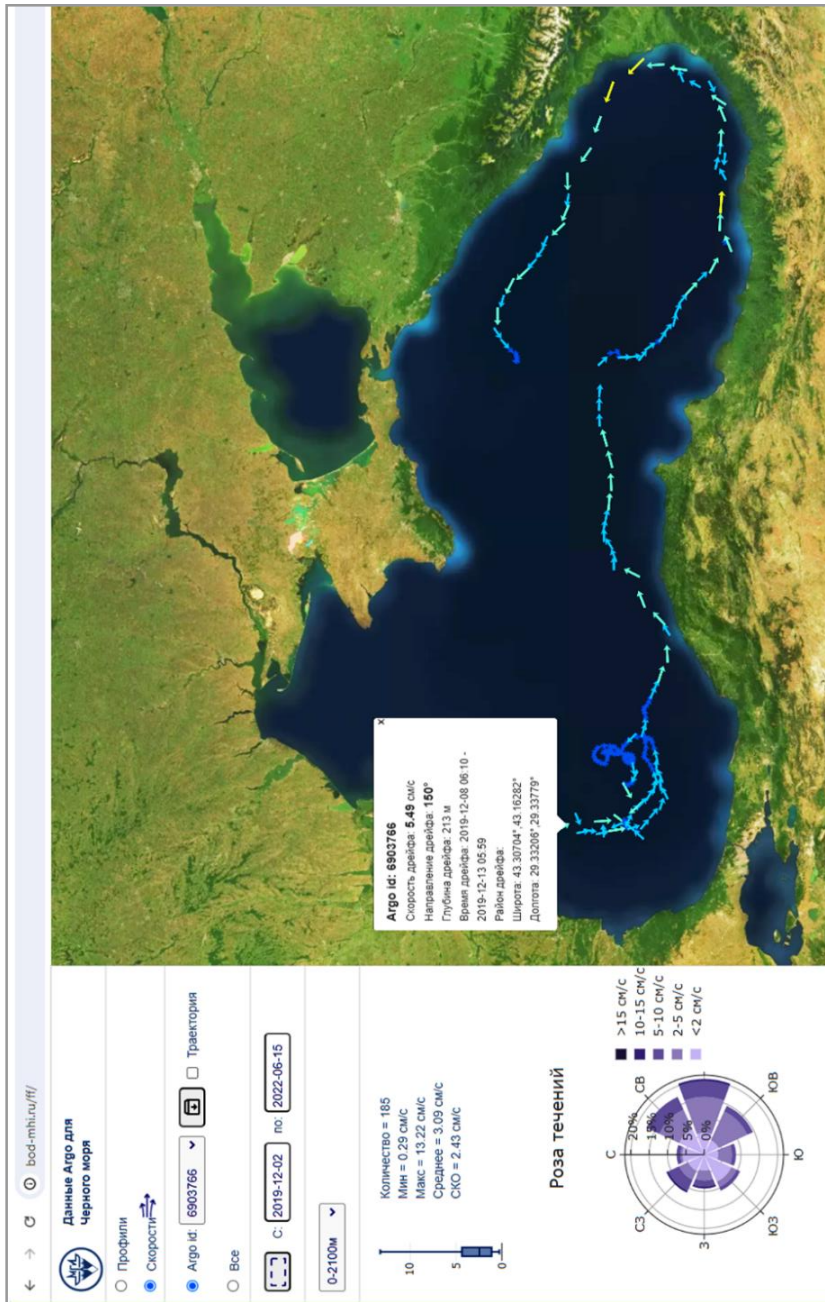
Переключение между режимами происходит с помощью специальной опции пользовательского интерфейса. В каждом из режимов возможно отображение положения буя (бுவ) в виде точек (в случае выбора опции *Профили*) или в виде векторов скоростей дрейфа (при выборе опции *Скорости*). При нажатии на отображаемую точку или вектор появляется всплывающее окно с информацией о номере буя, координатах, дате выполнения станции, строятся профили измеренных при данном зондировании параметров (если выбрана опция *Профили*) или отображается информация о скорости и направлении дрейфа буя (при выборе опции *Скорости*). Для обоих режимов возможна выборка данных по прямоугольной области, задаваемой на карте, и по заданному временному интервалу.

В режиме выбора по всем буям (опция *Все*) доступна еще и выборка по слоям, соответствующим глубинам дрейфа буев. Для каждой новой выборки производится расчет основных статистических характеристик скоростей дрейфа (минимальная и максимальная скорости, среднее значение, СКО), построение розы течений и диаграммы *box and whisker*.

Доступно скачивание данных по идентификатору буя в формате *netCDF*. На рис. 4–6 показаны примеры выборки и визуализации данных. На рисунках рядом с соответствующими картами располагаются диаграммы (розы) течений, демонстрирующие направление и значение рассчитанных скоростей в выбранной области.



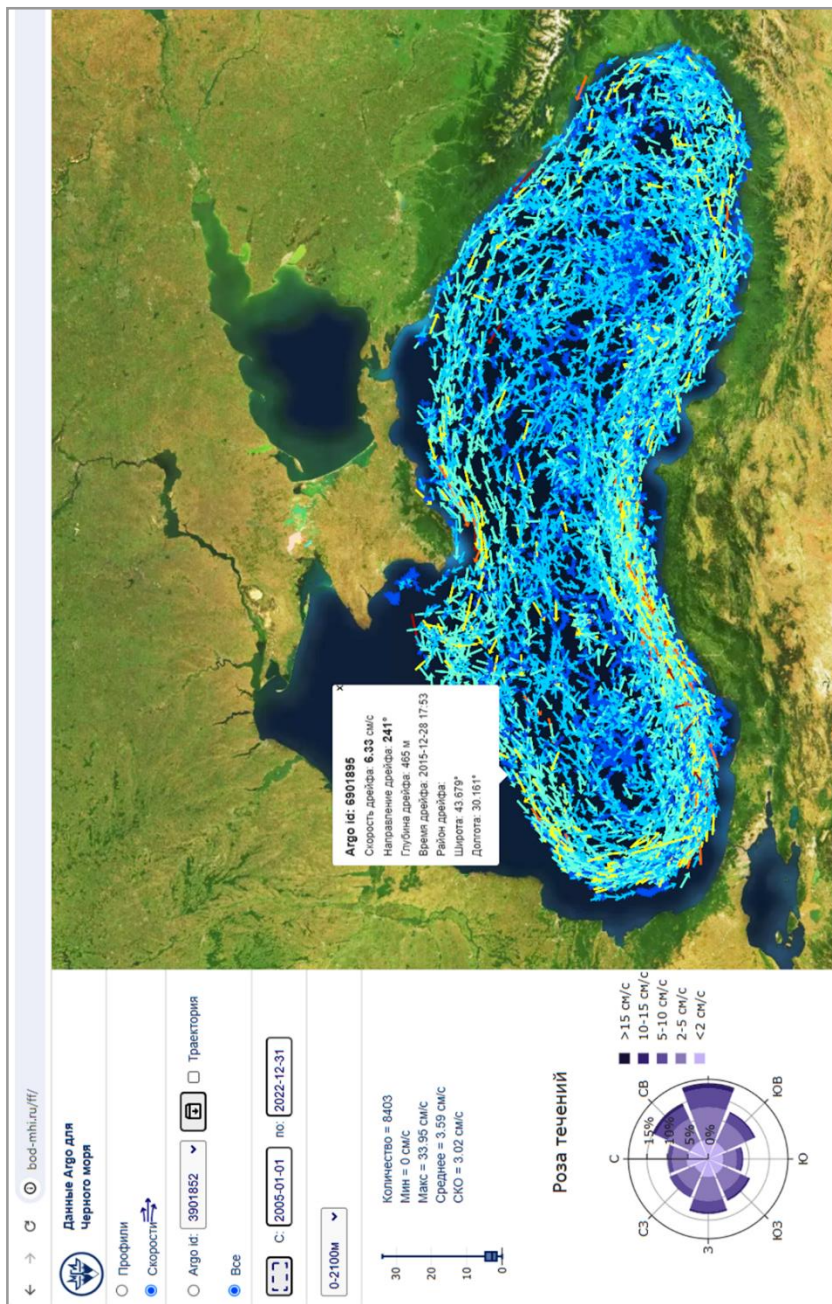
a



b

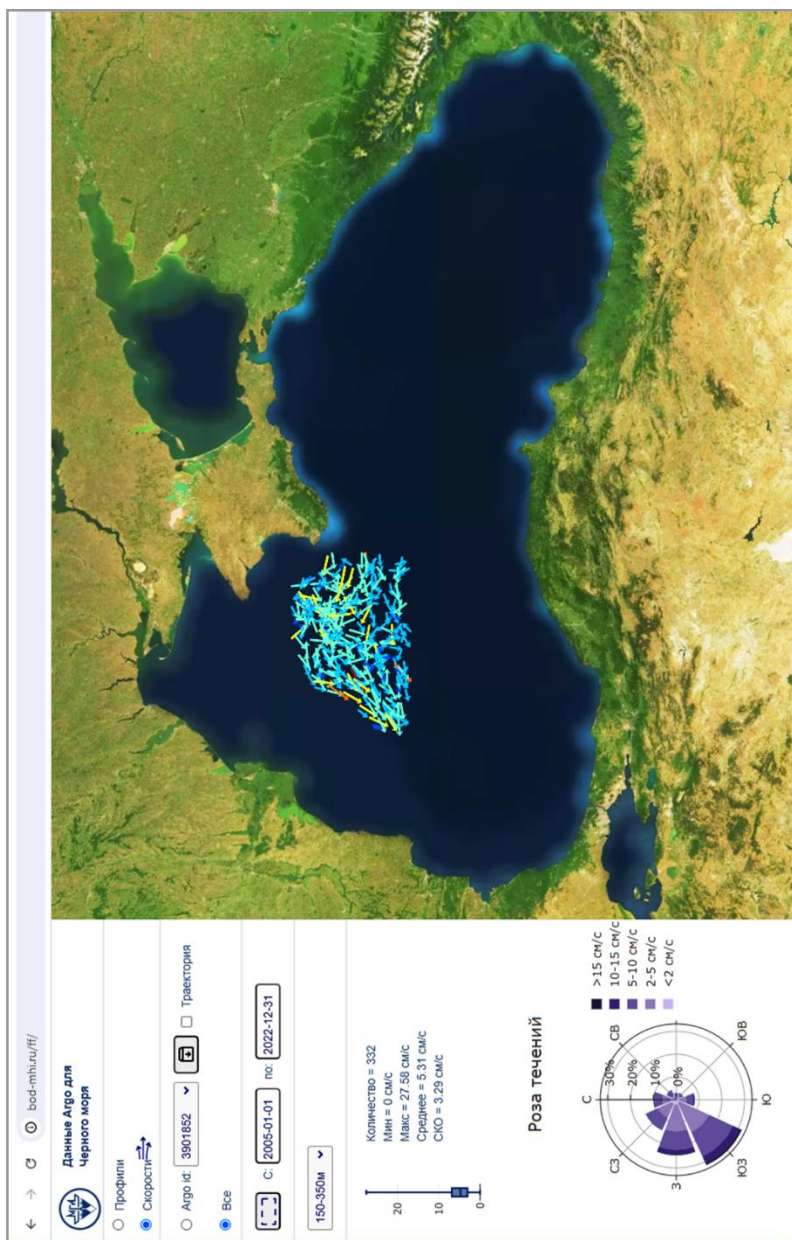
Р и с. 4. Пример использования веб-интерфейса для отображения: *a* – траектории буя *Argo* ID 6903766 и вертикальных профилей температуры и солёности; *b* – его скоростей дрейфа

Fig. 4. An example of using the web interface to display: *a* – trajectory of the *Argo* float ID 6903766 and vertical profiles of temperature and salinity, and *b* – float drift velocities



Р и с. 5. Пример использования веб-интерфейса для отображения скоростей всех буев *Argo*, дрейфовавших в слое 150–350 м

Fig. 5. An example of using the web interface to display velocities of all the *Argo* floats drifting in the 150–350 m layer



Р и с. 6. Пример использования веб-интерфейса для отображения скоростей всех буев *Argo*, дрейфовавших в слое 150–350 м в пределах заданной прямоугольной области
Fig. 6. An example of using the web interface to display velocities of all the *Argo* floats drifting in the 150–350 m layer within the selected rectangular area

Анализ результатов

Анализ рассчитанных на основе данных буев *Argo* скоростей в Черном море проводился с помощью разработанной ГИС при сопоставлении с наиболее полными опубликованными результатами по данной тематике. В работе [5] рассматривались данные только трех буев-профилемеров: средняя скорость первого буя на горизонте 200 м оценена в 7 см/с, на горизонте 750 м – в ~ 4 см/с, на горизонте 1550 м – в диапазоне 1–5 см/с. В работе [6] на основе данных 7 буев, которые работали в 2002–2009 гг., показано, что их средние скорости на глубинах 750–1550 м составили 2,2–2,7 см/с, на горизонте 500 м – 4 см/с. В работе [7], где рассматривались данные буев с парковочными горизонтами 200–1000 м за период 2005–2010 гг., было показано, что скорости течений с глубиной уменьшаются, а в летний период они слабее, чем в остальные сезоны. Рассчитанные скорости на глубине 750 м составляли до 10 см/с, на глубине 1000 м находились в диапазоне 1–5 см/с. В работе [8] для оценки скоростей использовался уже 10-летний массив измерений *Argo* (2005–2015 гг.), что позволило более детально рассмотреть динамику глубоководных течений Черного моря, однако в верхнем слое скорости не оценивались. При этом авторами были определены следующие значения скоростей: $3,6 \pm 0,4$ см/с на глубинах 350–600 м, $4,0 \pm 0,2$ см/с в слое 600–800 м, $5,7 \pm 0,6$ см/с в слое 800–1200 м и $3,5 \pm 0,2$ см/с в нижнем из рассмотренных слоев 1200–1600 м [8, с. 32]. По сравнению с указанной работой количество глубоководных наблюдений *Argo* к середине 2022 г. существенно увеличилось: минимум в 1,3 раза в слое глубже 1200 м и более чем в 5 раз в слое 800–1200 м. Для горизонта 200 м количество наблюдений увеличилось более чем в три раза по сравнению с количеством, используемым в наиболее обеспеченной соответствующими данными работе [7]: примерно от 1500 станций в 2015 г. до 4774 в 2022 г. В табл. 3 приведены результаты расчетов скоростей дрейфа буев-профилемеров *Argo* в разных слоях Черного моря. Количество рассчитанных векторов скорости оказалось меньше, чем количество выполненных станций, в связи с тем, что в ряде случаев не выполнялось условие нахождения буя между соседними станциями в одном слое. Такая ситуация возможна, в частности, при вхождении буя в течение рабочего цикла в зону с глубинами меньше его парковочного горизонта, и тогда полученный вектор скорости не может быть отнесен ни к одному из слоев.

Из табл. 3 видно, что наибольшее количество векторов скорости дрейфа рассчитано для слоя 200 ± 50 м, среднее значение с 95%-ной вероятностью находится в интервале $4,2 \pm 0,1$ см/с. В следующем слое 350–600 м количество рассчитанных векторов на порядок меньше, а средняя скорость составила 2,3 см/с, что ниже значения 4 см/с, указанного в работах [5, 6], и значений $3,6 \pm 0,2$ см/с из работы [8]. В трех более глубоких слоях средние скорости оказались несколько выше (2,9, 3,4 и 2,9 см/с соответственно). Таким образом, в слое 850–1200 м выявляется некоторое увеличение средней скорости, ранее полученное в [8] и в настоящей работе подтвержденное на существенно большем объеме данных. При этом с учетом доверительного интервала значения средней скорости в глубоководных слоях достаточно близкие и составляют ~ 3 см/с.

Статистика рассчитанных векторов скорости по слоям
Statistics of calculated velocity vectors by layers

Слой по глубине, м / Layer by depth, m	Количество станций / Number of stations	Количество векторов / Number of vectors	Средняя скорость, см/с / Mean velocity, cm/s	95%-ный доверительный интервал, см/с / 95% confidence interval, cm/s
150–250	4774	4695	4,2	±0,1
350 – 600	409	345	2,3	±0,2
600 – 850	1419	1348	2,9	±0,1
850 – 1200	820	772	3,4	±0,3
1200 – 1600	636	614	2,9	±0,2

На рис. 7 представлены карты рассчитанных скоростей дрейфа буев-профиломеров *Argo* в отдельных слоях моря. Согласно построенным диаграммам, в северной части моря во всех слоях преобладающее направление течений западное, а в южной – восточное, что согласуется с представлениями об общециклонической циркуляции в бассейне. Кроме основного направления в самом нижнем слое четко определяются также западное, северо-западное и юго-западное направления скоростей дрейфа. Значения скоростей в этом слое составляют преимущественно 2–4 см/с, но могут достигать и 10–12 см/с. В центральной части бассейна преобладает западный перенос (рис. 8) со скоростями 5–10 см/с и максимумом 15 см/с в слое 150–250 м (на основе данных о 1091 рассчитанном векторе скорости), со скоростями 2–5 см/с в слое 350–600 м (93 рассчитанных вектора) и 2–5 см/с в слое 600–800 м (354 вектора скорости). В целом рассчитанные характеристики дрейфа буев свидетельствуют о сложной структуре поля течений во всех слоях, в частности о наличии вихревых образований разного масштаба и знака завихренности.

Из рис. 9, который составлен на основе данных о среднемесячной за весь рассмотренный временной интервал скорости, можно видеть, что скорости дрейфа буев зимой почти на всех горизонтах выше, чем летом. Это является результатом сезонного усиления ветров над морем в зимний период [9, с. 26]. Показательными в этом отношении являются диаграммы для двух верхних слоев (рис. 9, *b, c*), которые вносят наибольший вклад в общее увеличение значений скорости (рис. 9, *a*). При этом максимум средних скоростей в верхнем слое отмечается в феврале (7 см/с), во втором слое (на глубинах 350–600 м) – в марте (6,5 см/с). Летом в двух верхних слоях скорости уменьшаются до 2,5–4 см/с. В слое 600–850 м (рис. 9, *d*) сезонный ход в значениях средних скоростей не выделяется, а средние за все время скорости дрейфа буев составляют ~2,9 см/с. При этом в нижележащих слоях, на глубинах > 850 м, летние значения скоростей (3–4 см/с) ниже, чем в другие сезоны года (до 6 см/с).

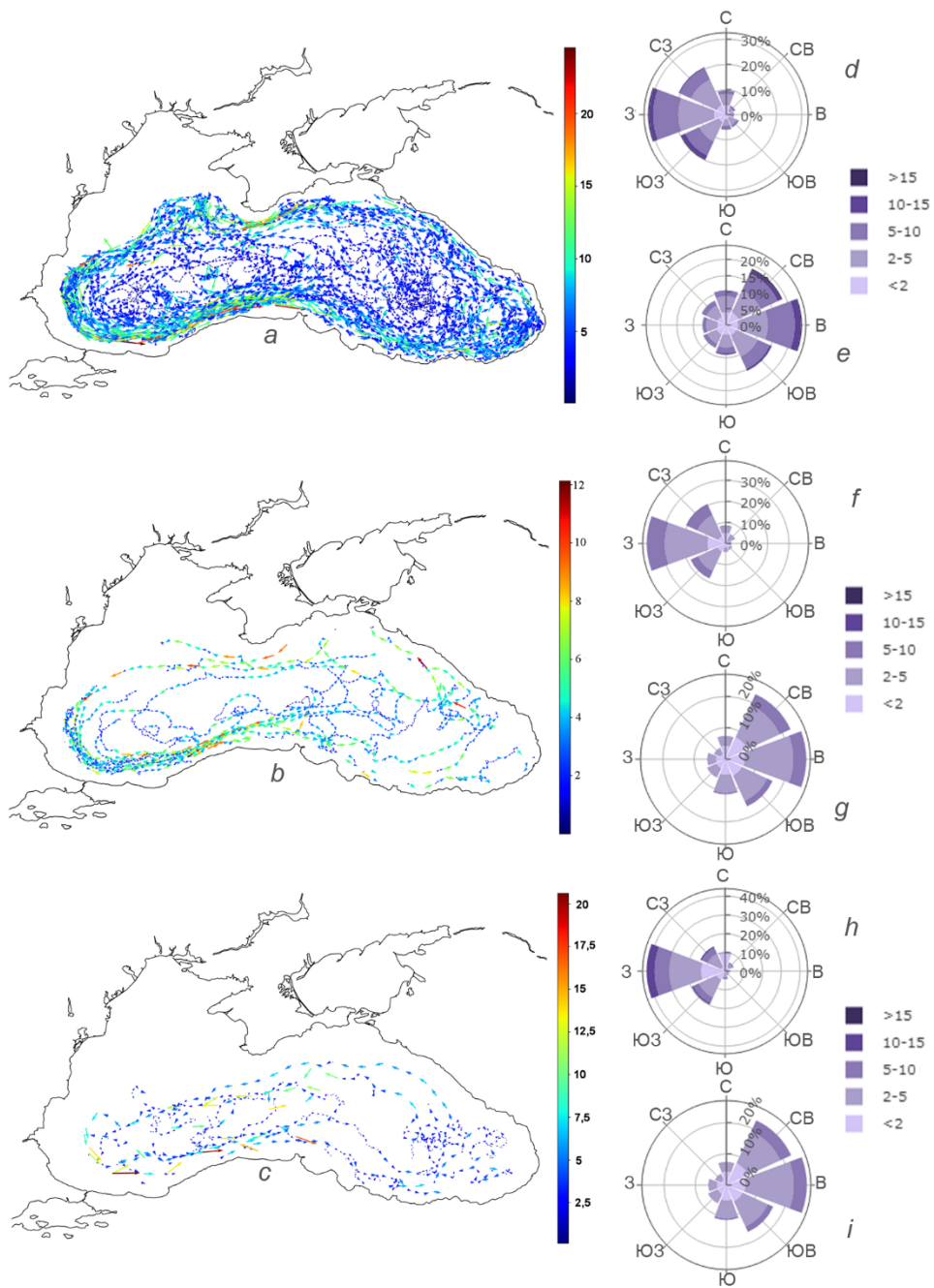


Рис. 7. Рассчитанные векторы скорости буев *Argo* (см/с) и соответствующие розы течений в слое 150–250 м (*a*), 600–850 м (*b*), 1200–1600 м (*c*) в северной (*d, f, h*) и южной (*e, g, i*) частях моря
Fig. 7. Calculated vectors of the *Argo* float velocities (cm/s) and the corresponding current roses in the 150–250 m (*a*), 600–850 m (*b*) and 1200–1600 m (*c*) layers in the northern (*d, f, h*) and southern (*e, g, i*) parts of the sea

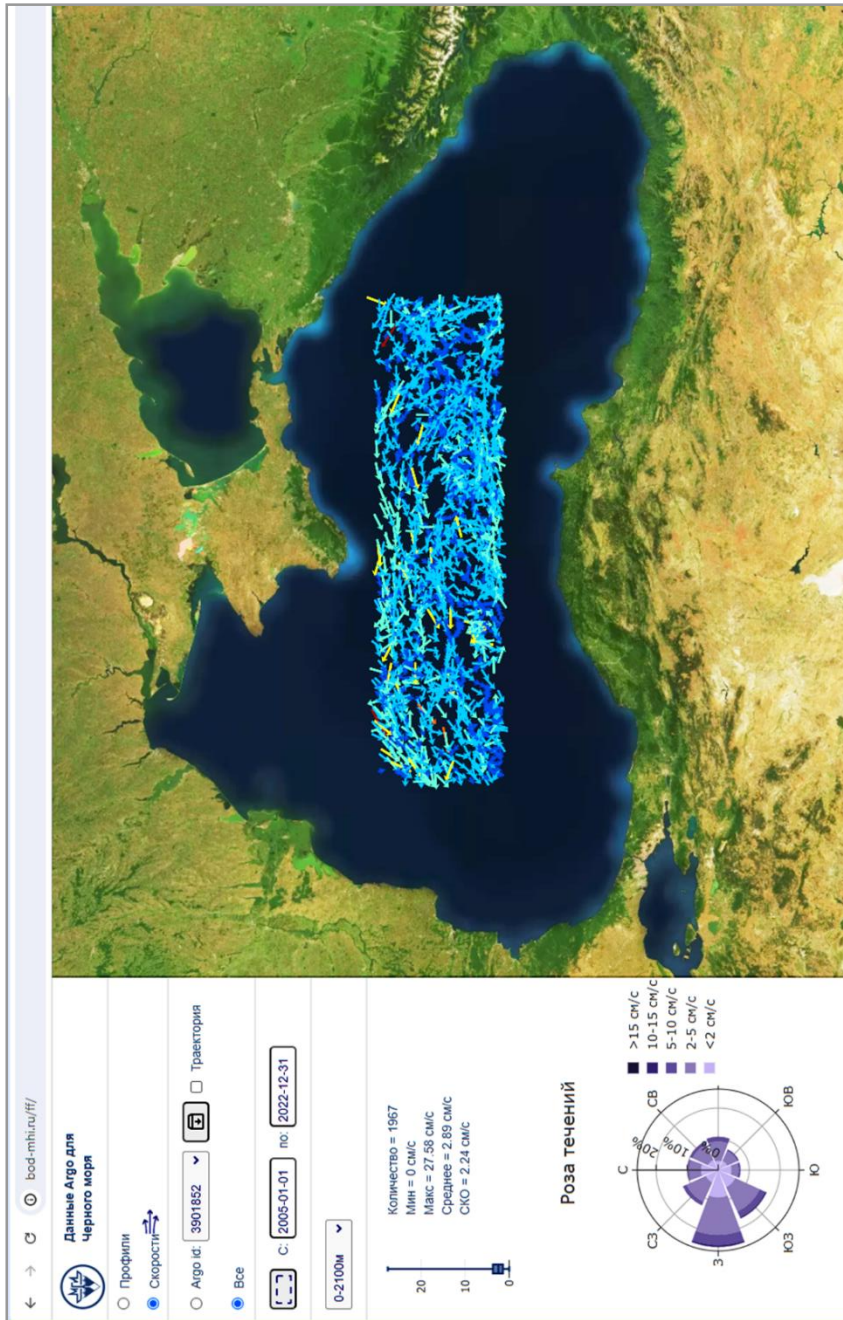
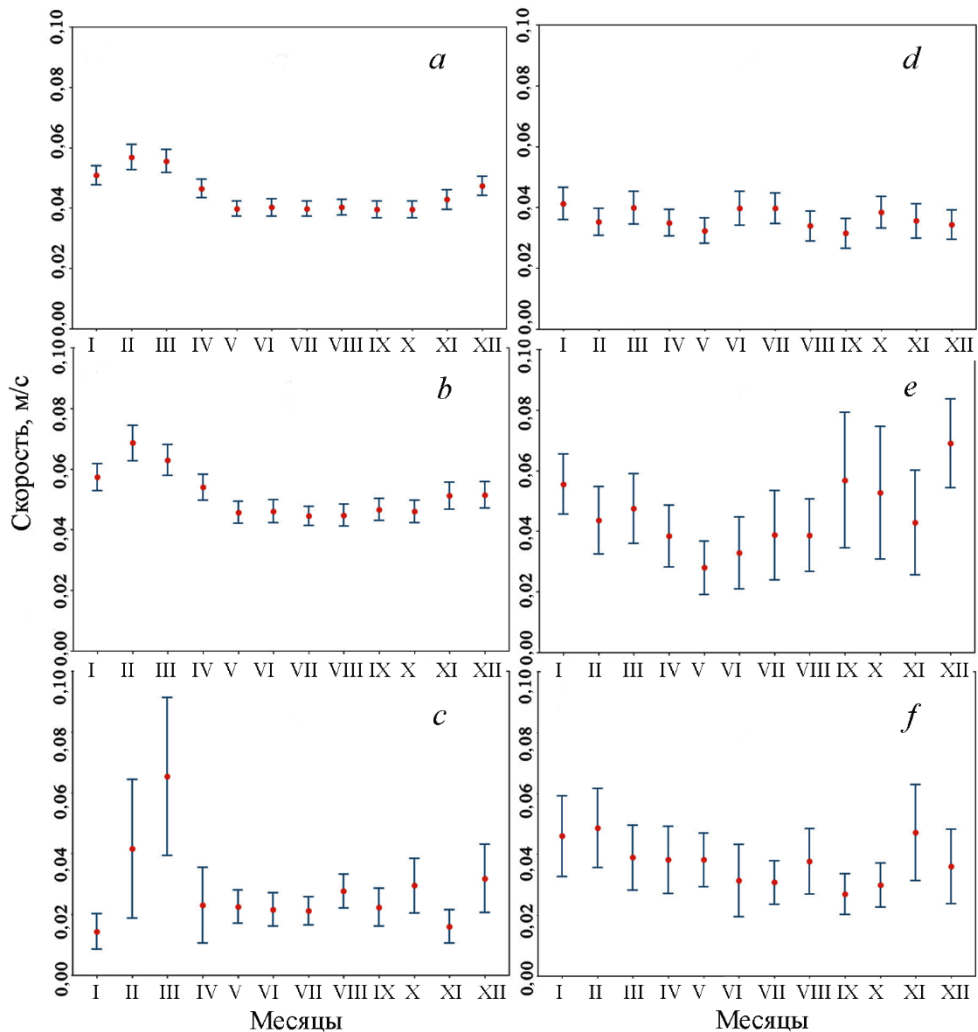


Рис. 8 Рассчитанные векторы скорости буев *Argo* в центральной части моря во всех слоях и соответствующая роза течений
Fig. 8. Calculated vectors of the *Argo* float velocities in all the layers of the sea central part and the corresponding current rose



Р и с. 9. Сезонный ход скорости дрейфа буев *Argo* в Черном море (красные точки) с соответствующими доверительными интервалами (вертикальные отрезки): *a* – во всем объеме бассейна; *b* – в слое 150–250 м; *c* – в слое 350–600 м; *d* – в слое 600–850 м; *e* – в слое 850–1200 м; *f* – в слое 1200–1600 м

Fig. 9. Seasonal variation of the *Argo* float drift velocities in the Black Sea (red dots) with the corresponding confidence intervals (vertical segments): *a* – in the whole volume of the basin; *b* – in the 150–250 m layer; *c* – in the 350–600 m layer; *d* – in the 600–850 m layer; *e* – in the 850–1200 m layer and *f* – in the 1200–1600 m layer

Заключение

С использованием разработанной геоинформационной системы выполнены оценки скорости дрейфа буев-профилемеров *Argo*, которые осуществляли сбор океанографических данных в Черном море в 2005–2022 гг. Анализ скоростей выполнен на более полном массиве данных *Argo* по сравнению с ранее опубликованными работами, уточнены значения средней скорости, показаны особенности дрейфа в отдельных слоях моря. Обнаружено, что зимнее

увеличение скоростей буев в акватории Черного моря, связанное с сезонным усилением ветрового воздействия, проявляется не только в верхнем, но и в более глубоких слоях моря. Установлено, что в зимний период на глубинах > 850 м может наблюдаться 1,5–2-кратное возрастание значений средних скоростей относительно летних, а средние скорости в слое 350–600 м могут увеличиваться до 2–2,5 раза с четким максимумом в феврале – марте. Доминирующее западное направление движения буев в северной части моря на всех горизонтах, а в южной части – преимущественно восточное свидетельствуют о циклоническом характере циркуляции в бассейне. В центральной глубоководной части моря определяется преобладание западного направления скоростей дрейфа. Анализ векторов других направлений свидетельствует о неоднородности поля скорости, нестационарности течений и наличии вихревых образований разного масштаба во всех рассмотренных слоях.

Использование ГИС для анализа данных *Argo* существенно упрощает работу с океанографическими данными для региона Черного моря и их научный анализ. При этом ГИС предполагает возможность быстрого пересчета скоростей при поступлении новых данных наблюдений, включения в систему ряда дополнительных опций, а также возможность уточнения методики расчета скоростей на парковочной глубине с учетом различных оценок сноса буя при его всплытии/погружении.

В развитие системы предполагается добавление в нее функционала по визуализации данных дрейфтеров и измерителей течений *ADCP* для Черного моря и автоматическое пополнение базы данных новыми данными наблюдений буев *Argo*. Также возможна адаптация разработанной ГИС для других акваторий Мирового океана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fifteen years of ocean observations with the global *Argo* array / S. C. Riser [et al.] // *Nature Climate Change*. 2016. Vol. 6, iss. 2. P. 145–153. <https://doi.org/10.1038/nclimate2872>
2. *Argo* Data 1999–2019: Two Million Temperature-Salinity Profiles and Subsurface Velocity Observations From a Global Array of Profiling Floats / A. P. S. Wong [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2020. Vol. 7. 700. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00700>
3. *Ollivrault M., Rannou J.-P.* ANDRO: An *Argo*-Based Deep Displacement Dataset // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2013. Vol. 30, iss. 4. P. 759–788. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00073.1>
4. An Advanced Method to Estimate Deep Currents from Profiling Floats / J. J. Park [et al.] // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2005. Vol. 22, iss. 8. P. 1294–1304. <https://doi.org/10.1175/JTECH1748.1>
5. *Korotaev G., Oguz T., Riser S.* Intermediate and deep currents of the Black Sea obtained from autonomous profiling floats // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2006. Vol. 53, iss. 17–19. P. 1901–1910. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2006.04.017>
6. *Герасимова С. В., Лемешко Е. Е.* Оценка скоростей глубоководных течений по данным *ARGO* // *Системы контроля окружающей среды*. 2011. Вып. 15. С. 187–196. <https://msoe.ru/articles/2011/15-33/>
7. *Milanova M., Peneva E.* Deep Black Sea circulation described by *Argo* profiling floats // *Annual of Sofia University “St. Kliment Ohridski”, Faculty of Physics*. 2016. Vol. 109. 12 p. URL: https://www.phys.uni-sofia.bg/annual/archive/109/full/GSU-Fizika-109_02.pdf (date of access: 07.07.2024).

8. *Маркова Н. В., Багаев А. В.* Оценка скоростей глубоководных течений в Черном море по данным дрейфующих буев-профилемеров Argo // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 3. С. 26–39. EDN WNAFSV. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2016-3-26-39>
9. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь, 2011. 212 с. EDN XPERZR.
10. Undercurrents in the Northeastern Black Sea Detected on the Basis of Multi-Model Experiments and Observations / S. G. Demyshev [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, iss. 9. 933. EDN QPOVKS. <https://doi.org/10.3390/jmse9090933>
11. *Zhuk E.* ARGO Black Sea Database: storage and visualization // *Proceedings of SPIE* / Eds. K. Themistocleous, D. G. Hadjimitsis, S. Michaelides, G. Papadavid. SPIE, 2023. Vol. 12786 : Ninth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2023). 127861Q. <https://doi.org/10.1117/12.2681583>

Об авторах:

Жук Елена Владимировна, младший научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 3814-6300**, **ORCID ID: 0000-0002-4263-7734**, **ResearcherID: JCD-8660-2023**, **Scopus Author ID: 57191412660**, elena.zhuk@mhi-ras.ru

Маркова Наталья Владимировна, старший научный сотрудник, отдел теории волн, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физ.-мат. наук, **SPIN-код: 3625-6866**, **ORCID ID: 0000-0002-7123-6657**, **ResearcherID: Q-2638-2017**, **Scopus Author ID: 57198013260**, n.v.markova@mhi-ras.ru