

УДК 556.555.6

doi 10.18522/1026-2237-2020-4-87-97

## О ЦИРКУЛЯЦИИ ВОД В ДОЛИННОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ (КРАСНОДАРСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ)\*

© 2020 г. А.В. Погорелов<sup>1</sup>, А.А. Лагута<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия,

<sup>2</sup>ООО «АГМ Системы», Краснодар, Россия

## ON WATER CIRCULATION IN THE VALLEY RESERVOIR (KRASNODAR RESERVOIR)\*\*

A.V. Pogorelov<sup>1</sup>, A.A. Laguta<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kuban State University, Krasnodar, Russia,

<sup>2</sup>AGM Systems LLC, Krasnodar, Russia

Погорелов Анатолий Валерьевич – доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой геоинформатики, Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, 149, г. Краснодар, 350040, Россия, e-mail: pogorelov\_av@bk.ru

Лагута Андрей Александрович – ведущий инженер, ООО «АГМ Системы», ул. Фрунзе, 22/1, г. Краснодар, 350063, Россия, e-mail: alaguta@icloud.com

Anatoly V. Pogorelov - Doctor of Geography, Head of the Department of Geoinformatics, Kuban State University, Stavropolskaya St., 149, Krasnodar, 350040, Russia, e-mail: pogorelov\_av@bk.ru

Andrey A. Laguta - Leading Engineer, AGM Systems LLC, Frunze St., 22/1, Krasnodar, 350000, Russia, e-mail: alaguta@icloud.com

Краснодарское водохранилище в ходе эксплуатации с 1973 г. претерпело существенные преобразования. В результате активного дельтоформирования рек Кубани и Белой водохранилище разделилось на два автономных водоёма, площадь его уменьшилась на 35 %. Для понимания механизмов трансформации чаши и процессов заилиения водохранилища следует установить особенности динамики водных масс. По результатам ADCP-съёмки, выполненной в июле-августе 2016 г., проанализирована циркуляция водных масс в водоёме. Межгалсовые расстояния при съёмке составили 100 м при общей её протяжённости 2518 км, частота промеров – 0,28 м<sup>-1</sup>. Полученный массив данных о векторах скоростей (18,6 млн значений) в сочетании с полученной цифровой моделью чаши водохранилища обработан в среде ГИС с использованием инструментов геостатистического анализа.

Установлено, что общей динамике водных масс свойственна циклоническая циркуляция с выраженным западным стоковым течением вдоль правого берега водохранилища. Преобладающая скорость течения составляет 0,02...0,05 м/с. При устойчивых западных ветрах зафиксировано смещение основной стоковой струи к югу вглубь водоема. В вертикальном перемещении водных масс отмечены повсеместные нисходящие токи в восточной части водохранилища, вызванные поступлением более холодных речных вод.

**Ключевые слова:** долинное водохранилище, ADCP-съёмка, циркуляция вод, ветер, скорость течения, осадконакопление, Краснодарское водохранилище.

The Krasnodar reservoir has undergone significant transformations during its operation since 1973. As a result of active delta formation of the Kuban and Belaya rivers, the reservoir was divided into two autonomous reservoirs, its area decreased by 35 %. To understand the mechanisms of transformation and the processes of siltation of the reservoir, it is necessary to establish the features of the dynamics of water masses. Based on the results of the ADCP survey carried out in July-August, 2016, the circulation of water masses in the reservoir was analyzed. The distance between survey lines during the survey was 100 m with a total length of 2518 km, the frequency of measurements was 0.28 m<sup>-1</sup>. The resulting array of data on the velocity

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта МФИ-20.1/123.

\*\* The research was carried out with the financial support of the Kuban Science Foundation in the framework of the scientific project No. MFI-20.1/123.

*vectors (18.6 million values) in combination with the resulting digital model of the reservoir basin was processed in GIS using geostatistical analysis tools.*

*It has been established that the general dynamics of water masses is characterized by cyclonic circulation with a pronounced western runoff current along the right bank of the reservoir. The prevailing velocities of currents are 0.02 ... 0.05 m/s. With steady westerly winds, a shift of the main water jet to the south into the interior of the reservoir was recorded. In the vertical movement of water masses, ubiquitous downward currents were noted in the eastern part of the reservoir, caused by the influx of colder river waters.*

**Keywords:** valley reservoir, ADCP survey, water circulation, wind, current velocity, sedimentation, Krasnodar reservoir.

## Введение

В последние десятилетия в гидрологических исследованиях нашли свое применение акустические доплеровские измерители течений ADCP – профилографы [1], позволяющие вести сбор полевых данных большого объема и принципиально нового качества – в виде мгновенных направлений и скорости течения с высоким пространственным разрешением. Несмотря на развитие технологии ADCP, ее практическое и научное гидрологическое применение, за редким исключением, ограничивается двумя основными направлениями: акустическая океанология и гидрология рек. Настоящая работа посвящена выявлению особенностей перемещения водных масс в долинном водохранилище по материалам ADCP-съемки.

Объектом исследования выступает Краснодарское водохранилище, основные функции которого – защищена от наводнения 600 тыс. га земель при пропуске паводка с расходом до 1500 м<sup>3</sup>/с и орошение 215 тыс. га рисовых систем [2]. Водохранилище, расположенное в нижнем течении р. Кубани между ст. Воронежской и Краснодаром, эксплуатируется с 1973 г. При вводе в эксплуатацию оно имело площадь зеркала около 400 км<sup>2</sup>, длину 46 км, ширину до 8–11 км, среднюю глубину 5,9 м, максимальную глубину до 24,7 м, полезный объем воды 2,2 км<sup>3</sup> при полной емкости около 3 км<sup>3</sup> [3].

В ходе эксплуатации вследствие заиления водохранилище претерпело значительные преобразования – изменились начальные эксплуатационные характеристики (уменьшились площадь зеркала, полезный объем, средняя глубина и пр.). Оценкам состояния и анализу тенденций трансформации Краснодарского водохранилища посвящены публикации [4–8]. Вместе с тем происходящие изменения долинного водохранилища (по сути – деградация) при всей его хозяйственной значимости заслуживают детального количественного анализа с раскрытием факторов и механизмов трансформации чаши искусственного водоёма, включая гидродинамические процессы.

Транспорт и отложение наносов в чаши водохранилищ во многом определяются структурой течений, ветроволновыми явлениями и турбу-

лентностью водных масс [9]. Таким образом, гидродинамика является одним из важнейших факторов формирования тела заиления и переработки берегов. Новые сведения о направлениях и скоростях течений дают возможность учесть фактор перемещения водных масс в аспекте осадконакопления и трансформации чаши Краснодарского водохранилища.

## Обзор исследований

Вопросы классификации и расчета течений, динамических явлений в озерах и водохранилищах рассматриваются в ряде работ [10–13]. Среди разнообразных течений наибольшее влияние на режим водоемов имеют стоковые (постоянные) и ветровые, относящиеся к течениям первого порядка [13]. Стоковые течения образуются вследствие поверхностного уклона между приусьевым и приплотинным участком водохранилища, обусловленного притоком воды из другого водного объекта и сбросом воды через сбросное сооружение. Ветровые обусловлены ветровым воздействием – касательным напряжением на поверхностные слои воды. Известно, что ветровые течения наиболее выражены в относительно больших водоемах с плоской формой ложа и малыми глубинами; при этом отмечается резкое уменьшение скорости ветрового течения в направлении дна в верхнем двух-трехметровом слое. Ветер при определенных характеристиках способен усиливать или ослаблять скорость стоковых течений.

Эксперименты, описанные в работах [10, 14], дают представления о схемах циркуляции в моделях проточных водоемов. При оценках результатов измерений необходимо исходить из наличия в водохранилищах суточной и недельной изменчивости течений, вызванной неравномерностью сброса воды. При этом амплитуда суточных колебаний скорости течений вблизи гидросооружений может достигать 1 м/с и более [13].

Оценки циркуляции, как правило, базируются на измерениях скоростей и расходов воды на попечных профилях водоемов. Сведения о течениях в крупных озерах и водохранилищах и схемы течений для конкретных водоемов по данным акусти-

ческих доплеровских измерений приводятся эпизодически. Известны результаты исследований на озерах Мид [15], Аппер-Кламат [16] (США), а также на озере Кинерет (Галилейское море, Тивериадское озеро) (Израиль) [17]. В работах [15, 16] показаны наличие стокового течения от устья впадающей реки к сбросному сооружению и зависимость его параметров от гидравлических условий, создаваемых режимом эксплуатации водохранилищ, скорости и направления ветра; показана применимость методики ADCP-съемки с маломерного судна к изучению динамики озер. При исследовании Галилейского моря установлен характер течений в метеорологических условиях эксперимента: при

ветрах слабой и умеренной силы в озере формируется циклоническая циркуляция вод (против часовой стрелки) со скоростью от 1 до 10 см/с по всей толще. Кроме того, отмечена значительная временная изменчивость циркуляции вод в течение приблизительно 2 ч [17].

### Методика сбора и обработки данных

Сбор ADCP-данных, используемых в работе, осуществлен при выполнении батиметрической съемки Краснодарского водохранилища в 2016 г. Организация съемки и расположение промерных галсов (рис. 1) описаны в работе [6].



Рис. 1. Схема расположения промерных галсов в Краснодарском водохранилище

/ Fig. 1. Layout of the survey lines in the Krasnodar reservoir

Вкратце методика измерений сводится к следующему. Каждое частное измерение вектора скорости по промерной вертикали, соответствующей в плане точке измерения глубины, производится в отдельной ячейке высотой 0,25 м. При движении судна вдоль проектного галса формируется профиль скорости от поверхности до дна. Следует отметить, что из-за особенностей съемки скорость физически не может быть измерена в непосредственной близости от поверхности водо-

ема (0,6 м). В придонном же слое соразмерной ширины дополнительная мертвая зона образуется из-за явления, именуемого интерференцией боковых лепестков [16]. Скорость измеряется по трем ортогональным осям X, Y и Z (East, North, Up, или U, V, W) относительно неподвижного дна водоема, направление – по встроенному магнитному компасу. Расчет профиля скорости естественного течения удобно представить в следующем виде:

$$U_{\text{Absolute}}(i, j) = U_{\text{Measured}}(i, j) + U_{\text{Motion}}(i),$$

где  $i$  – номер цикла измерения;  $j$  – номер уровня измерения (номер ячейки высотой 0,25 м от поверхности);  $U_{\text{Absolute}}(i, j)$  – трехмерный вектор скорости течения ( $U_{\text{Absolute}}$ ,  $V_{\text{Absolute}}$ ,  $W_{\text{Absolute}}$ ), система координат географическая, положительные направления:  $U$  – восток,  $V$  – север;  $W$  – от дна к поверхности моря;  $U_{\text{Measured}}(i, j)$  – трехмерный вектор измеренной ADCP скорости течения ( $U_{\text{Measured}}$ ,  $V_{\text{Measured}}$ ,  $W_{\text{Measured}}$ );  $U_{\text{Motion}}(i)$  – трехмерный вектор скорости перемещения ADCP ( $U_{\text{Motion}}$ ,  $V_{\text{Motion}}$ ,  $W_{\text{Motion}}$ ) [18].

В дополнение к данным о векторе скорости профилограф фиксирует данные об интенсивности обратного рассеяния – показателе, зависящем от концентрации взвешенных частиц в слое воды. Управление сбором данных осуществлялось с по-

мощью программы WinRiver II Teledyne RD Instruments [19].

Измерения выполнены в июле-августе – периоде с наименьшими в течение года средними скоростями ветра в районе водохранилища. Фоном для съемки в представлениях мезомасштабной временной изменчивости течений послужили суточные изменения, непосредственно влиявшие на формирование поля скоростей и циркуляцию водных масс в целом. Суточные изменения имеют как естественное происхождение (скорость и направление ветра, приточность), так и техногенное (режим эксплуатации водохранилища) (табл. 1). Значение магнитного склонения для поправки к измерениям встроенного компаса на период съемки принято равным 7,83°.

Таблица 1

Метеорологические условия во время выполнения работ [20] / Meteorological conditions during survey [20]

Дата съемки	Рабочий уровень воды в водохранилище, м БС [21]	Сведения о промерных галсах		Ветровой режим		Гидравлические характеристики [21]		
		Количество	Номера	Направление ветра*	Скорость ветра, м/с	Приток, м <sup>3</sup> /с	Сброс, м <sup>3</sup> /с	Разность, м <sup>3</sup> /с
07.07.2016	33,06	6	80–75	3	2	801	930	129
08.07.2016	33,04	2	74–73	С3	3	781	802	21
11.07.2016	33,07	4	73–69	В	3	892	930	38
12.07.2016	33,06	4	68–65	В	3	893	930	37
15.07.2016	33,00	6	64–59	В	2	846	930	84
16.07.2016	32,97	8	58–51	В	2	714	800	86
17.07.2016	33,00	4	50–47	В	4	880	703	–177
18.07.2016	32,99	8	46–39	Ю3	2	666	703	37
19.07.2016	32,99	4	38–35	Ю3	2	657	622	–35
25.07.2016	32,95	4	34–31	С3	2	675	619	–56
26.07.2016	32,90	8	81–88	С3	2	536	619	83
27.07.2016	32,90	13	89–101	СВ	2	629	620	–9
03.08.2016	32,47	24	183–204	В	2	280	620	340
04.08.2016	32,38	12	221–232	Ю3	1	233	618	385
05.08.2016	32,31	16	205–220	В	2	326	619	293
06.08.2016	32,21	8	182–174	В	3	209	620	411
07.08.2016	32,14	12	173–162	СВ	1	325	618	293
08.08.2016	32,08	4	161–159	3	3	383	619	236
09.08.2016	31,99	14	158–145	В	3	256	620	364
10.08.2016	31,96	7	144–138	СВ	3	499	620	121
19.08.2016	31,77	8	137–130	СВ	2	607	680	73
20.08.2016	31,73	12	129–119	В	3	534	679	145
21.08.2016	31,72	14	118–105	В	2	650	678	28
22.08.2016	31,70	3	102–104	В	3	604	681	77
23.08.2016	31,67	12	30–19	СВ	1	570	679	109
24.08.2016	31,61	12	18–7	3	3	441	680	239
25.08.2016	31,55	6	1–6	3	3	453	680	227

\* – указывается направление ветра, принятное в метеорологии.

Список используемых переменных, полученных путем экспорта исходных данных в формате ASCII, приведен в табл. 2. Для осредненных по промерной вертикали данных каждому номеру ансамбля соответствует одно значение переменной, а измеренным по конкретным ячейкам – массив данных в зависимости от глубины.

Полученный текстовый массив добавлен в качестве атрибутивных данных в векторный файл, содержащий пространственную привязку точек измерений. При обработке и анализе материалов изме-

рений (фиксация мгновенных скоростей и направлений) принималась во внимание турбулентность водной среды. Для двухмерной визуализации многомерных данных (вектор скорости) в программе ArcGIS использован способ Vector Field, метод интерполяции – Vector Average. Поля модулей горизонтальной составляющей скорости течения и вертикальной скорости («+» – вверх, «–» – вниз), а также поле распределения величины восточной составляющей скорости течения построены методом интерполяции Natural Neighbor.

Таблица 2

Список переменных выходного ASCII-файла [19] / List of variables in the output ASCII file [19]

№ п/п	Имя переменной	Тип единицы	Принадлежность	Тип	Описание
1	Ensemble Number	Порядковый номер	Ансамбль	Дискретный	ID
2	East Displacement (Ref: BT)	Расстояние	Ансамбль	Накопительный	Прямоугольные координаты
3	North Displacement (Ref: BT)	Расстояние	Ансамбль	Накопительный	
4	Average Backscatter	Интенсивность	Ячейка	Дискретный	Среднее по 4 лучам значение обратного рассеяния
5	East Velocity (Ref: BT)	Вектор скорости	Ячейка	Дискретный	Восточная составляющая скорости относительно донного следа
6	North Velocity (Ref: BT)	Вектор скорости	Ячейка	Дискретный	Северная составляющая скорости относительно донного следа
7	Earth Up Velocity (Ref: BT)	Вектор скорости	Ячейка	Дискретный	Вертикальная скорость относительно донного следа
8	Earth Velocity Magnitude (Ref: BT)	Вектор скорости	Ячейка	Дискретный	Величина вектора скорости относительно донного следа
9	Earth Velocity Direction (Ref: BT)	Угол	Ячейка	Дискретный	Направление вектора скорости относительно донного следа
10	Water Column Est. Avg. Speed (Ref: BT)	Вектор скорости	Ансамбль	Дискретный	Расчетная средняя скорость течения для промерной вертикали
11	Flow Direction (Ref: BT)	Угол	Ансамбль	Дискретный	Расчетное среднее направление течения для промерной вертикали

## Результаты исследования

В период съемки над акваторией в основном наблюдались слабые и умеренные восточные и северо-восточные ветры (табл. 1), общая повторяемость которых в течение всего года достигает 45 % [22]. Отметим, что основное стоковое течение вдоль длинной оси водохранилища совпадает с северо-восточной циркуляцией воздуха. Западные и юго-западные ветры наблюдались в единичных случаях. Как выяснилось, ветровой режим в период съемки заметно влиял на динамику водных масс.

*Динамика водных масс при восточных и северо-восточных ветрах.* При северо-восточных и восточных ветрах в водохранилище формируется циклоническая циркуляция со стоковым течением, тяготеющим к правому (северному) берегу. На рис. 2а показан характерный профиль с векторами скоростей, осредненными по 30 ансамблям, по промерному галсу № 70, отражающему особенности динамики водных масс при соответствующих условиях (табл. 1). Съемка по галсу выполнялась 11.07.2016 от правого берега к левому с 15 ч 02 мин до 16 ч 42 мин при восточном ветре скоростью до 3 м/с.

По преобладающим векторам движения водной массы хорошо видно, что в поперечном профиле выделяются два разнонаправленных потока (рис. 2а). Правый поток, согласно нашим расчетам, имел суммарный расход воды  $1714 \text{ м}^3/\text{с}$ , среднее направление на юго-запад (азимут  $229^\circ$ ) и среднюю скорость  $0,04 \text{ м/с}$ ; левый поток имел расход  $830 \text{ м}^3/\text{с}$ , направление на восток (азимут  $84^\circ$ ) и скорость  $0,01 \text{ м/с}$ . Сброс воды из водохранилища 11.07.2016 составлял  $930 \text{ м}^3/\text{с}$ . Расход стокового течения, превышающий в два раза об-

щую приточность в водохранилище, объясняется вовлечением в речную струю водных масс водоема [23]. Скорости правого и левого потоков уменьшаются с приближением к центральной части водоема – продольной оси циркуляции (рис. 2а). Профилю интенсивности обратного рассеяния, характеризующему концентрацию взвешенных частиц в толще воды, свойственны высокие вертикальные градиенты между приповерхностным слоем до  $1,4 \text{ м}$  и более глубокими слоями (рис. 2).

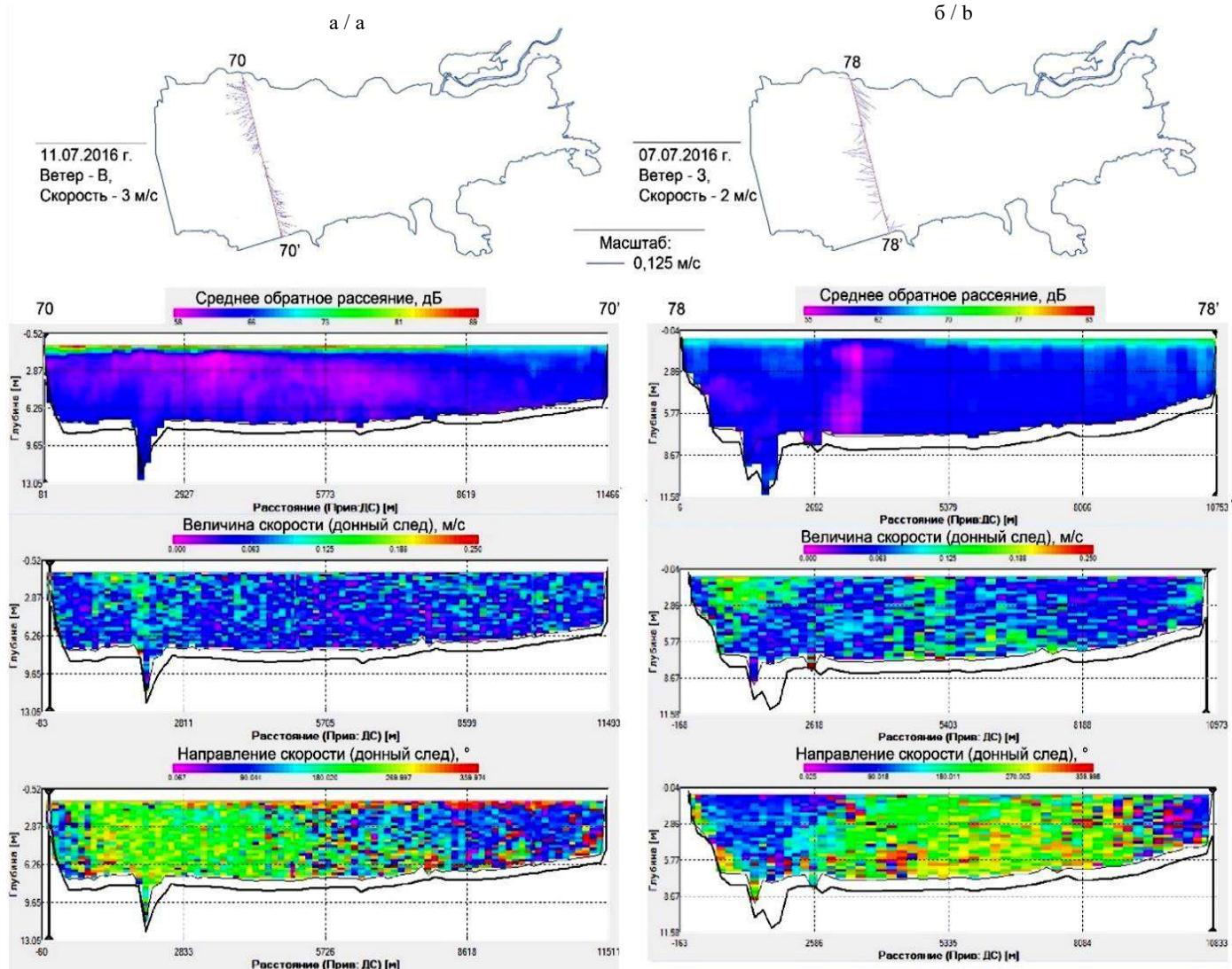


Рис. 2. Поперечные профили скорости и направления течения вдоль промерных галсов № 70 (а) и № 78 (б) и интенсивности обратного рассеяния / Fig. 2. Transverse profiles of the velocity and direction of the current along the survey lines No. 70 (a) and No. 78 (b) and the intensity of backscattering

*Динамика водных масс при западном ветре.* При западном ветре, судя по данным измерений 07.07.2016, под влиянием разнонаправленных гравитационного и ветрового воздействий формируется иная схема циркуляции вод, сочетающая квази-

постоянные стоковые и нерегулярные ветровые течения. Этую циркуляцию отражают измерения на галсе № 78 (рис. 2б), выполненные с 11 ч 07 мин до 12 ч 13 мин от правого берега к левому при западном ветре скоростью до  $2 \text{ м/с}$ . В анализируемом

поперечном профиле выделяются три участка циркуляции водных масс. На двух участках вдоль берега течения совпадают с направлением ветра; на центральном участке основное стоковое течение со средней скоростью 0,03 м/с и расходом воды 1930 м<sup>3</sup>/с имеет противоположное направление. Таким образом, стоковая струя при западном ветре оттеснена от правого берега вглубь водоёма. При этом у правого берега течение в восточном направлении имеет среднюю скорость 0,03 м/с и расход 732 м<sup>3</sup>/с, у левого берега – расход воды 262 м<sup>3</sup>/с. Наибольшие измеренные скорости течения при такой схеме циркуляции зарегистрированы в центральной части стокового течения, а также у берегов и в местах впадения рек (рис. 2б). На расстоянии около 3 км от правого берега на участке контакта разнонаправленных течений по всей толще воды отмечены низкие значения интенсивности обратного рассеяния (рис. 2б), что свидетельствует о пониженной мутности воды. В водоёме, как и при восточных ветрах, в целом наблюдаются высокие вертикальные градиенты интенсивности обратного рассеяния между приповерхностным слоем (до 1,4 м) и более глубокими слоями.

*Особенности динамики водных масс.* Преобладающие скорости течений в водоёме невелики – 0,02...0,05 м/с, что свойственно равнинным долинным водохранилищам. В осевой и приплотинной частях акватории зафиксированная скорость не превышает 0,05 м/с, в некоторых случаях понижаясь до 0,01 м/с. Максимальные скорости (более 0,5 м/с) закономерно отмечены в местах впадения Кубани и Пшиша.

Распределение осредненных по вертикали скоростей течения (рис. 3а) в сочетании с данными о направлении течений (рис. 3б) подтверждает локализацию стокового течения вдоль правого (северного) берега водоёма. Векторы скорости течения на даты измерений рассчитывались для ячеек 400×400 м. Для оценки общей циркуляции вод в субширотно вытянутом водоёме выделена восточная составляющая циркуляции со скоростью больше и меньше 0 м/с. На рис. 3б показано распределение

осредненной по вертикали восточной составляющей скорости течения в даты съёмки с соответствующим направлением ветра. Как видим, динамика водных масс в общем присуща циклоническая циркуляция: вдоль правого берега преобладают западные течения, вдоль левого – восточные (рис. 3б). Есть основания полагать, что при восточном ветре, имеющем повышенную частоту в течение всего года, циклоническая циркуляция становится ещё более выраженной.

Обобщенные схемы стоково-ветровой циркуляции в Краснодарском водохранилище при преобладающих восточных и западных ветрах показаны на рис. 4.

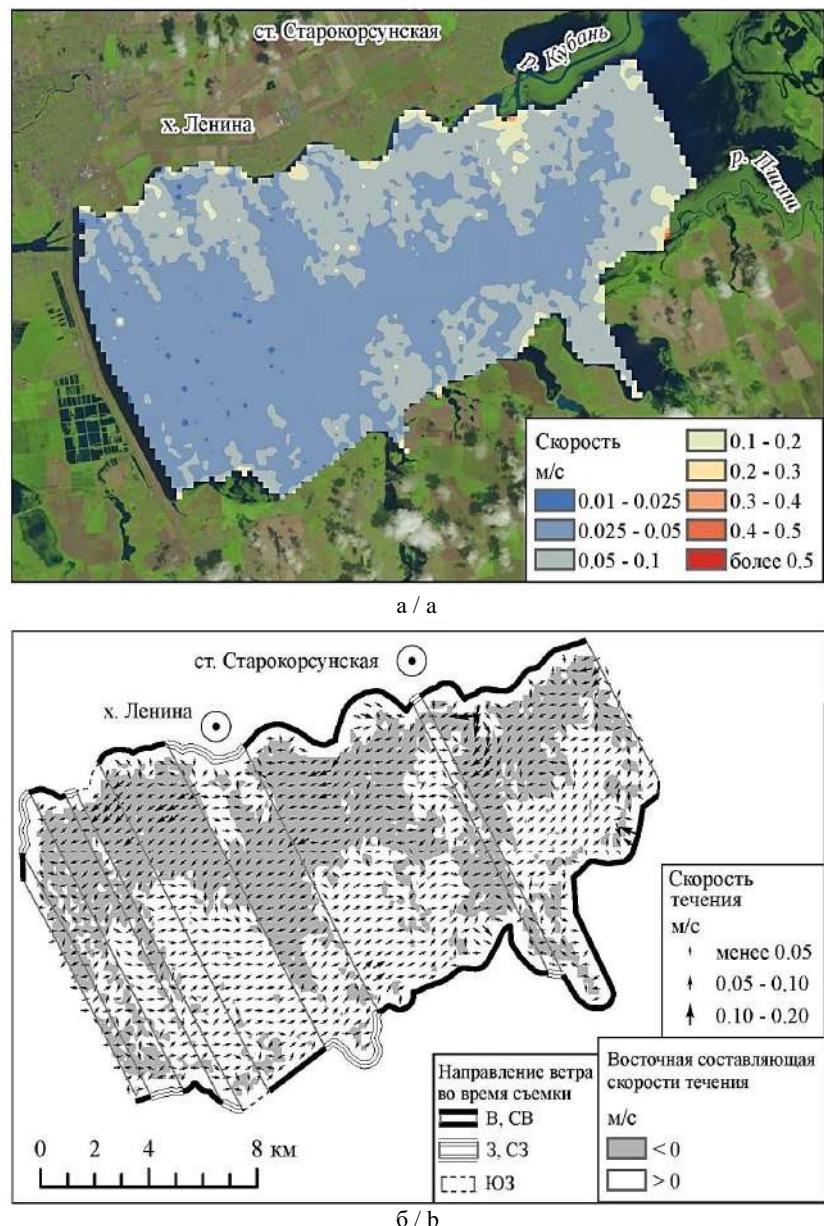


Рис. 3. Распределение осредненной по вертикали абсолютной величины (а) и восточной составляющей (б) скорости течения / Fig. 3. Distribution of the vertical-averaged absolute value (a) and the east-component (b) current velocity

Рассмотрим элементы циркуляции водных масс подчиненного порядка. Распределение векторов скорости течений (рис. 3б) свидетельствует о сгущении линий тока именно над старыми затопленными руслами рек, расположение которых по данным батиметрической съемки показано в [6]. Подобное явление отмечено и в других водохранилищах [24].

Распределение скоростей движения водных масс в устьевой области главной реки Кубани отражает гидрологические условия активно преобразующихся дельты и устьевого конуса выноса. Устьевые области притоков, в частности Кубани, вследствие высокой доли аккумулирующих здесь наносов имеют определяющее значение для трансформации водохранилища [8]. Поле осредненной по вертикали скорости течения на участке устьевого взморья р. Кубани представлено на рис. 5. Выделим два характерных динамических процесса: на фоне расширения струи наблюдается и локализация стокового течения в затопленном русле Кубани. При втекании р. Кубани в водоем на мелководье в зоне аккумуляции наносов происходит расширение (рассредоточение) русловой струи с увеличением турбулентности водных масс, вовлекаемых в движение, и заметной потерей скорости при передаче струи окружающим водным массам. Направленное струйное движение воды с повышенной скоростью течения прослеживается в затопленном русле р. Кубани. Судя по нашим измерениям, кинетическая энергия речной струи Кубани затухает на расстоянии 1,5–2,0 км от вершины дельты, что характеризует способность воды перемещать наносы в пределах устьевого бара.

У внешних краев стоковой струи образуются вихри, врачающиеся в направлении, противоположном течению [14], т.е. по часовой стрелке – справа от струи и слева – против. Таким образом, стоковое течение, воздействуя на берега юго-восточной экспозиции под острым углом, создаёт вдольбереговое течение, которое в дальнейшем при

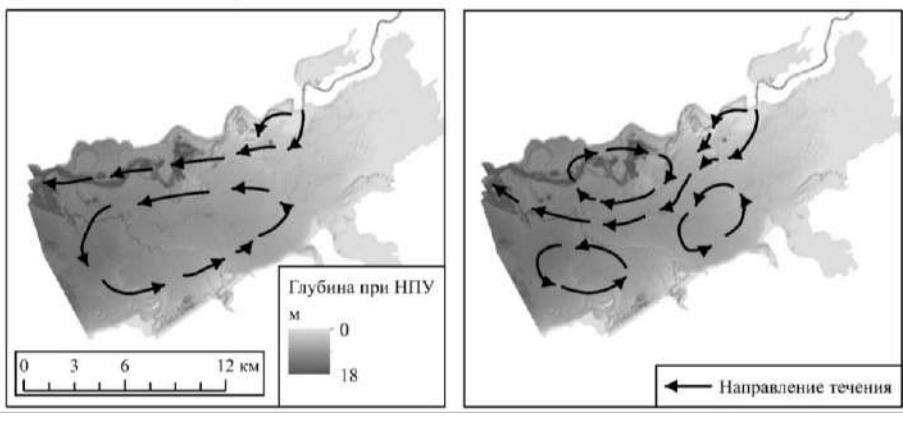


Рис. 4. Стоково-ветровая циркуляция водных масс в Краснодарском водохранилище при восточных (а) и западных (б) ветрах / Fig. 4. Runoff-wind circulation of water masses in the Krasnodar Reservoir with eastern (a) and western (b) winds

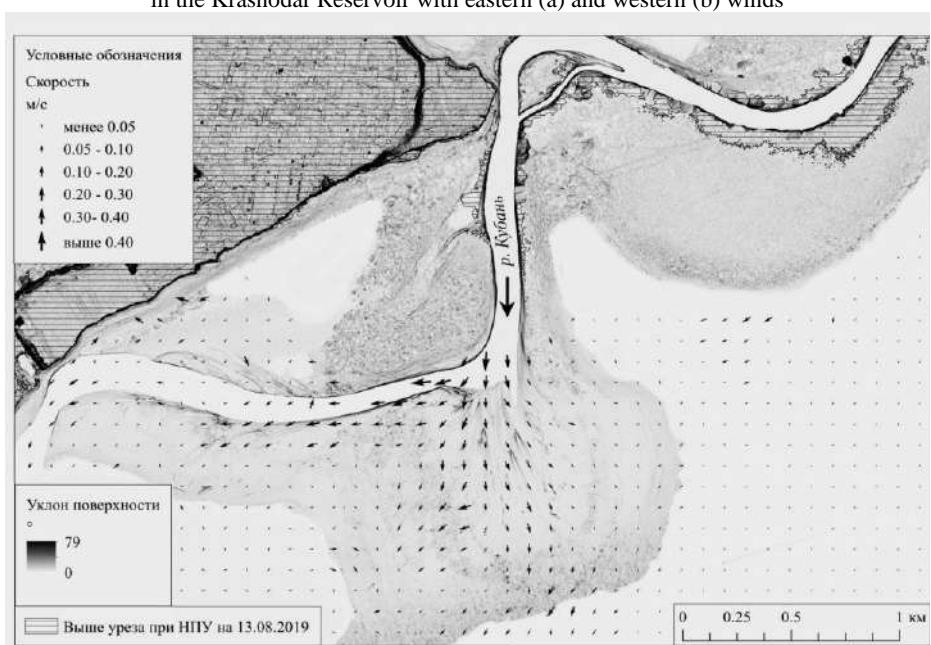


Рис. 5. Векторы осредненной по вертикали скорости течения. Устьевое взморье р. Кубани. 06.08.2019 – 09.08.2019 / Fig. 5. Vectors vertically averaged flow velocity. The estuarine seaside of the Kuban river. 06.08.2019 - 09.08.2019

изменении угла береговой линии теряет скорость. Это, в свою очередь, приводит к отложению наносов с образованием примкнувших террас у берегов юго-западной экспозиции (рис. 6) [8].

Анализ вертикальных перемещений водных масс по имеющимся данным измерений в июле-августе позволил выявить их главную закономерность в масштабе всего водоема (рис. 7). Восточной (верхней) части акватории в целом свойственны нисходящие движения, вызванные поступлением более холодной и плотной речной воды с дальнейшим ее погружением. В западной части водоема, лишенной крупных притоков, поле вертикальной составляющей движения более разнообразно – наряду с нисходящими отмечены и конвективные движения водных масс.



Рис. 6. Примкнувшие аккумулятивные террасы на правом берегу Краснодарского водохранилища. 18.10.2018.  
Снимок Digital Globe Inc. / Fig. 6. Adjacent accumulative terraces on the right bank of the Krasnodar reservoir.  
18.10.2018. Image by Digital Globe Inc.

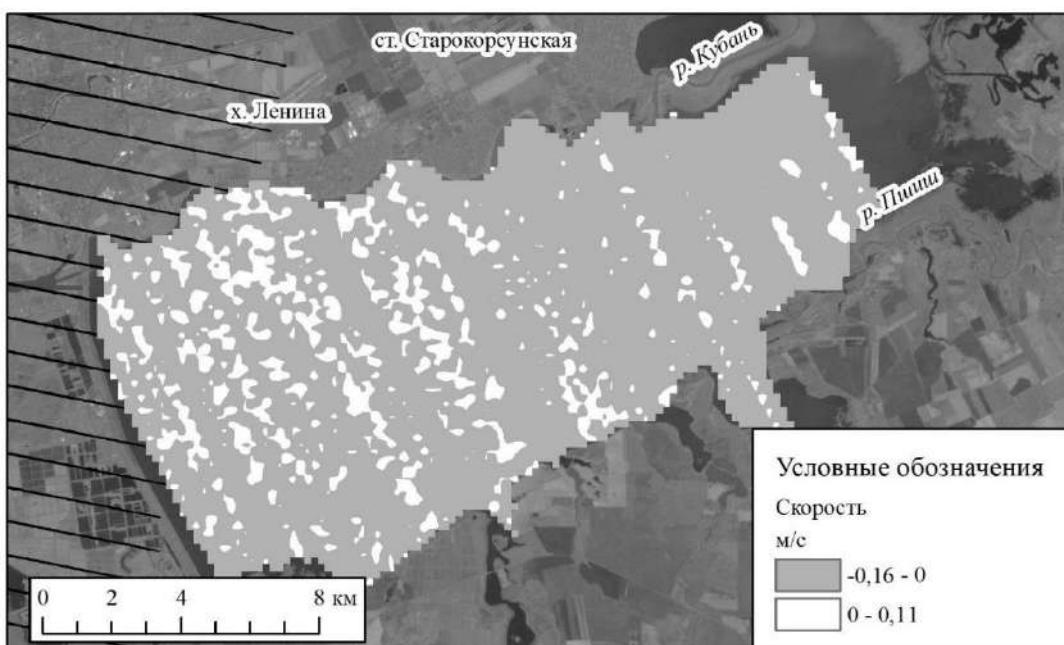


Рис. 7. Поле осредненных значений вертикальной составляющей движения водных масс. Отрицательные значения соответствуют нисходящим токам / Fig. 7. Field of averaged values of the vertical component of the movement of water masses. Negative values correspond to downward currents

### Заключение

По данным ADCP-съемки акватории Краснодарского водохранилища, проведенной с 07.07.2016 по 25.08.2016, установлены особенности динамики водных масс с элементами циркуляции разного порядка. Приведем основные:

1. Наличие уклона водной поверхности между приусыевым (р. Кубань) и приплотинным участками водохранилища с соответствующими притоком и сбросом воды обуславливает образование в водоеме стокового течения. В наблюдаемый период скорость, траектории и устойчивость стокового течения определялись взаимодействием с ветровыми течениями.

2. Динамика водных масс находится под влиянием господствующих в течение суток направлений ветров. При северо-восточных и восточных ветрах в водохранилище формируется характерная циклоническая циркуляция со стоковым течением, тяготеющим к правому берегу. При западных ветрах формируется схема течений с отклонением траектории стокового течения от правого берега к осевой части водоема.

3. Преобладающие скорости течений, отражающие транспортирующую способность водных масс, изменяются в пределах 0,02...0,5 м/с. Максимальные скорости зафиксированы в устьях Кубани и Пшиши – более 0,5 м/с. В центральной и приплотинной частях акватории скорость течений, как

правило, не превышает 0,05 м/с, в отдельных случаях снижаясь до 0,01 м/с.

4. При впадении р. Кубани в водохранилище на мелководье происходит расширение русловой струи с увеличением турбулентности вовлекаемых в движение водных масс. Вместе с тем струйное движение воды с повышенной скоростью течения отмечено в затопленном русле р. Кубани. Энергия речной струи Кубани затухает на расстоянии 1,5–2,0 км от вершины дельты.

5. Установлено различие в вертикальном перемещении водных масс между верхней и нижней частью водохранилища. Верхней части свойственно нисходящее движение, вызванное погружением относительно холодных речных вод, нижней части акватории – сочетание восходящих и нисходящих токов.

### Литература

1. РД 52.08.767-2012. Расход воды на водотоках. Методика измерений акустическими доплеровскими профилографами Stream Pro и Rio Grande. М.: Росгидромет, 2012. 80 с.

2. Правила использования водных ресурсов Краснодарского водохранилища. Краснодар: Кубаньводпроект, 2008. 158 с.

3. Лурье П.М., Панов В.Д., Ткаченко Ю.Ю. Река Кубань: гидрография и режим стока. СПб.: Гидрометеоиздат, 2005. 500 с.

4. Курбатова И.Е. Мониторинг трансформации Краснодарского водохранилища с использованием спутниковых данных высокого разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 3. С. 42–53.

5. Погорелов А.В., Липилин Д.А., Курносова А.С. Спутниковый мониторинг Краснодарского водохранилища // Геогр. вестн. = Geographical Bulletin. 2017. № 1 (40). С. 130–137. Doi: 10.17072/2079-7877-2017-1-130-137.

6. Лагута А.А., Погорелов А.В. Особенности заилиения Краснодарского водохранилища. Опыт оценки по данным батиметрических съемок // Географ. вестн. = Geographical Bulletin. 2018. № 4 (47). С. 54–66. DOI: 10.17072/2079-7877-2018-4-54-56.

7. Погорелов А.В., Лагута А.А. Краснодарское водохранилище: состояние и трансформация за период эксплуатации // Региональные географические исследования: сб. науч. тр. Краснодар: Кубанский гос. ун-т, 2019. Вып. 2 (12). С. 34–42.

8. Лагута А.А., Погорелов А.В. Особенности дельтоформирования рек, впадающих в долинное водохранилище (на примере Краснодарского водохранилища) // Географ. вестн. = Geographical Bulletin. 2019. № 3(50). С. 119–134. Doi 10/17072/2079-7877-2019-3-119-134.

9. Карапашев А.В. Проблемы динамики естественных водных потоков. Л.: ГИМЗ, 1960. 393 с.

10. Карапашев А.В. Речная гидравлика (курс общей и специальной гидравлики для гидрологов). Л.: ГИМЗ, 1969. 418 с.

11. Филатова Т.Н. Исследование течений в озерах и водохранилищах. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 319 с.

12. Матарзин Ю.М., Богословский Б.Б., Мацкевич И.К. Гидрологические процессы в водохранилищах. Пермь: ПГУ, 1977. 88 с.

13. Волны, течения и водные массы водоемов / под ред. Б.Б. Богословского. Л.: ЛПИ, 1980. 57 с.

14. Судольский А.С. Динамические явления в водоемах. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 260 с.

15. Vermeyen T.B. Acoustic Doppler Current Profiler Measurements Near the Proposed Southern Nevada Water System Intake. No. 3, Lake Mead, Nevada. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Hydraulic Investigations and Laboratory Services Group. Denver, Colorado, 2009. 45 p.

16. Vermeyen T.B., Wahl T. Experiences using Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) for Physical Model Calibrations // Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Ecohydraulics. Salt Lake City, Utah, July 13–19, 1999.

17. Серебряный А.Н., Кацнельсон Б.Г., Тарасов Л.Л., Ужанский Э., Островский И. Новые результаты измерений системы течений и внутренних волн в Галилайском море // Акустика океана : докл. XVI школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2018. С. 255–258.

18. Морозов А.Н., Лемешко Е.М. Опыт использования акустического доплеровского измерителя течений (ADCP) в условиях Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2005. № 12. С. 457–476.

19. WinRiver II. Software user's guide. Teledyne RD Instruments, 2018. 296 p.

20. Официальный сайт автоматизированной метеорологической системы СИНОП. URL: <https://synop.ru/forecast/#archive/> (дата обращения: 15.12.2018).

21. Официальный сайт Кубанского бассейнового водного управления Федерального агентства водных ресурсов. URL: <http://www.kbvu-fgu.ru/> (дата обращения: 01.08.2018).

22. Справочник по климату СССР. Вып. 13, ч. III: Ветер. Л.: Гидрометеоиздат, 1967. 332 с.

23. Михайлов В.Н. Гидрологические процессы в устьях рек. М.: ГЕОС, 1997. 171 с.

24. Назаров Н.Н. Русловые и псевдорусловые процессы в ложе водохранилищ // Маккавеевские чтения – 2008. М.: Географический факультет МГУ, 2009. С. 100–108.

### References

1. RD 52.08.767-2012. Water flow in watercourses. Measurement technique with acoustic Doppler profilers "Stream Pro" and "Rio Grande". (2012). Moscow, Rosgidromet Press, 80 p. (in Russian).

2. *Rules for the use of water resources of the Krasnodar Reservoir.* (2008). Krasnodar, Kuban'vodproekt Press, 158 p. (in Russian).
3. Lur'e P.M., Panov V.D., Tkachenko Yu.Yu. (2005). *Kuban River: hydrography and flow regime.* Saint Petersburg, Gidrometeoizdat Press, 500 p. (in Russian).
4. Kurbatova I.E. (2014). Transformation monitoring of the Krasnodar Reservoir using high resolution satellite data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, vol. 11, No. 3, pp. 42-53. (in Russian).
5. Pogorelov A.V., Lipilin D.A., Kurnosova A.S. (2017). Satellite monitoring of the Krasnodar Reservoir. *Geograf. vestn. = Geographical Bulletin*, No. 1 (40), pp. 130-137. (in Russian).
6. Laguta A.A., Pogorelov A.V. (2018). Peculiarities of Krasnodar water reservoir silting. Evaluation based on the data of bathymetric surveys. *Geogr. vestn. = Geographical Bulletin*, No. 4 (47), pp. 54-66. (in Russian).
7. Pogorelov A.V., Laguta A.A. (2019). Krasnodar Reservoir: state and transformation over the period of operation. *Regional geographical research.* Collection of Scientific Papers. Krasnodar, Kuban State University Press, iss. 2(12), pp. 34-42. (in Russian).
8. Laguta A.A., Pogorelov A.V. (2019). Features of delta formation of rivers flowing into a valley reservoir (on the example of the Krasnodar Reservoir). *Geograf. vestn. = Geographical Bulletin*, No. 3(50), pp. 119-134, doi: 10/17072/2079-7877-2019-3-119-134. (in Russian).
9. Karaushev A.V. (1960). *Natural water flow problems.* Leningrad, GIMIZ Press, 393 p. (in Russian).
10. Karaushev A.V. (1969). *River hydraulics (course of general and special hydraulics for hydrologists).* Leningrad, GIMIZ Press, 418 p. (in Russian).
11. Filatova T.N. (1972). *Study of currents in lakes and reservoirs.* Leningrad, Gidrometeoizdat Press, 319 p. (in Russian).
12. Matarzin Yu.M., Bogoslovskij B.B., Mackevich I.K. (1977). *Hydrological processes in reservoirs.* Perm, Perm State University Press, 88 p. (in Russian).
13. *Waves, currents and water masses of reservoirs.* (1980). B.B. Bogoslovskii (Ed.). Leningrad, LPI Press, 57 p. (in Russian).
14. Sudol'skii A.S. (1991). *Dynamic phenomena in water bodies.* Leningrad, Gidrometeoizdat Press, 260 p. (in Russian).
15. Vermeyen T.B. (2009). *Acoustic Doppler Current Profiler Measurements Near the Proposed Southern Nevada Water System Intake No. 3, Lake Mead, Nevada.* U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Hydraulic Investigations and Laboratory Services Group, Denver, Colorado, 45 p.
16. Vermeyen T.B., Wahl T. (1999). Experiences using Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) for Physical Model Calibrations. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Ecohydraulics.* Salt Lake City, Utah, July 13-19.
17. Serebryanyi A.N., Kacnel'son B.G., Tarasov L.L., Uzhanskiy E., Ostrovskii I. (2018). New results of measurements of the system of currents and internal waves in the Sea of Galilee. *Acoustics of the ocean.* Reports of the XVI academician L. M. Brekhovskikh school-seminar. Moscow, GEOS Publ., pp. 255-258. (in Russian).
18. Morozov A.N., Lemeshko E.M. (2005). Experience of using an acoustic Doppler current profiler (ADCP) in the Black Sea. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon morya*, No. 12, pp. 457-476. (in Russian).
19. *WinRiver II. Software user's guide.* (2018). Teledyne RD Instruments, 296 p.
20. *The official site of the automated meteorological system SINOP.* Available at: <https://synop.ru/forecast/#archive/> (accessed December 15, 2019). (in Russian).
21. *The official site of the Kuban Basin Water Administration of the Federal Agency for Water Resources.* Available at: <http://www.kbvu-fgu.ru/> (accessed August 1, 2018). (in Russian).
22. *Guide to the climate of the USSR.* (1967). Iss. 13, ch. III: Wind. Leningrad, Gidrometeoizdat Press, 332 p. (in Russian).
23. Mikhailov V.N. (1997). *Hydrological processes at river mouths.* Moscow, GEOS Publ., 171 p. (in Russian).
24. Nazarov N.N. (2009). Channel and pseudo-channel processes in the reservoir bed. *Maccabean readings-2008.* Moscow, Faculty of Geography, Moscow State University Press, pp. 100-108. (in Russian).