ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕЛЯХ УЛУЧШЕНИЯ СУДОХОДНЫХ УСЛОВИЙ НА НИЖНЕЙ ВОЛГЕ

ENGINEERING SURVEYS IN THE RESEARCH OF CHANNEL PROCESSES FOR THE IMPROVEMENT OF NAVIGABLE CONDITIONS OF THE LOWER VOLGA RIVER

БАБИЧ Д.Б.

Научный сотрудник НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, генеральный директор ООО «Гидроэкология-КГС», к.г.н., г. Москва, dmbabich@mail.ru

ИВАНОВ В.В.

Старший научный сотрудник НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, к.г.н., г. Москва, vvi06.56@mail.ru

KOPOTAEB B.H.

Ведущий научный сотрудник НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д.г.н., г. Москва, vlaskor@mail.ru

РИМСКИЙ-КОРСАКОВ Н.А.

Заведующий лабораторией гидролокации дна, заместитель директора Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, д.т.н., г. Москва. nrk@ocean.ru

BABICH D.B.

Staff scientist of the Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and River Bed Evolution of the geography faculty of the Lomonosov Moscow State University, PhD (candidate of science in Geography), Moscow, dmbabich@mail.ru

IVANOV V.V.

Senior staff scientist of the Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and River Bed Evolution of the geography faculty of the Lomonosov Moscow State University, PhD (candidate of science in Geography), Moscow, vvi06.56@mail.ru

KOROTAEV V.N.

Leading staff scientist of the Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and River Bed Evolution of the geography faculty of the Lomonosov Moscow State University, DSc (doctor of science in Geography), Moscow, vlaskor@mail.ru

RIMSKIY-KORSAKOV N.A.

Head of the Bottom Hydrolocation Laboratory, deputy director of the Shirshov Oceanology Institute of the Russian Academy of Sciences, DSc (doctor of science in Technics), Moscow, nrk@ocean.ru

Ключевые слова: инженерные изыскания; дистанционные методы; Нижняя Волга; русловые процессы; судоходные условия.

Аннотация: в статье рассматриваются вопросы применения современных методов исследований и их аппаратного обеспечения при проведении полевых изысканий на крупных реках. На примере Нижней Волги показываются возможности изучения русловых процессов с привлечением дистанционных методов.

Key words: engineering surveys; remote sensing methods; Lower Volga; channel processes; navigability.

Abstract: the paper considers issues of application of modern research methods and their hardware for field surveys on large rivers. Possibilities of channel processes investigations using remote sensing methods are demonstrated on the example of the Lower Volga River.

Введение

Нижнее течение Волги является важнейшим из исторических путей сообщения и имеет многовековую историю развития водного пути и его эксплуатации, обеспечивающей транзитное перемещение грузопассажирского потока по реке и далее по Каспийскому морю. После создания ряда каналов (Волго-Балтийского, Волго-Донского) роль Нижней Волги как судоходной артерии значительно возросла — она стала составной частью Единой глубоководной системы

(ЕГС) европейской части России. Вхождение Волги в состав ЕГС повлекло за собой не только увеличение протяженности соединяющихся водных путей страны, но и рост грузовых перевозок, использование крупнотоннажного флота, что, в свою очередь, потребовало увеличения габаритов судового хода и затрат на их поддержание. Однако проблема поддержания и увеличения гарантированных габаритов судового хода, несмотря на современный уровень технических средств дноуглубления, до на-

стоящего времени остается достаточно острой. Большая протяженность участка (свыше 700 км) от Волгограда до Каспийского моря, необходимость обеспечения морских и речных транзитных перевозок, изменение условий стока воды и наносов по длине реки и в прибрежной части Каспия, а также во времени — все это требует проведения комплексных инженерно-изыскательских и научно-исследовательских работ. Всестороннее исследование русловых процессов наряду с инженерными расчетами позволяет оценить перспективы сохранения и возможного улучшения судоходных условий.

Крупные обобщения в области русловой морфодинамики Нижней Волги были выполнены в начале 1960-х годов непосредственно сразу после создания Волгоградского водохранилища [9]. Многолетние исследования, проведенные научно-исследовательской лабораторией эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова совместно с лабораторией

Таблица 1

гидролокации дна Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, позволили выявить основные факторы и закономерности переформирования русла Нижней Волги к началу XXI века и разработать вероятные схемы его дальнейшего развития [3, 8]. В основу исследований были положены методики инженерно-гидрографических, инженерно-гидрометеорологических, инженерно-геологических (геофизических) изысканий и современные методы изучения русловых процессов.

Главная цель статьи — познакомить коллег-изыскателей с нашим опытом полевых работ на Нижней Волге с использованием дистанционных средств исследования рельефа дна речных водотоков и русловых отложений применительно к задачам и проблемам обеспечения судоходства на крупных равнинных реках.

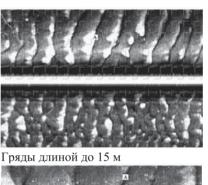
Проблемы судоходства на Нижней Волге

Нижнее течение Волги от Волгограда до устьевого взморья можно разделить на два крупных морфодинамических участка, различающихся спецификой развития гидролого-морфологических процессов, связанных с изменением факторов, воздействующих на формирование русла. В пределах придельтового участка главного русла Волги русловые процессы подчиняются общим закономерностям, характерным для равнинных рек. На дельтовом участке, в зоне непосредственного контакта реки и моря, отмечается проявление специфических устьевых процессов, во многом определяющихся не только стоком воды реки, но и гидродинамикой Северного Каспия.

На участке русла Нижней Волги от Волгограда до Астрахани периодически возникали затруднения с прохождением судами участков аккумуляции речных наносов. Всего здесь насчитывается 15 таких перекатных участков различной протяженности. В настоящее время можно выделить несколько причин, обусловливающих затруднения судоходства на придельтовом участке. Это в первую очередь формирование и смещение тела аккумуляции и следующего за ним фронта размыва после сооружения плотины Волжской ГЭС, а также перераспределение стока воды и наносов между конкурирующими рукавами в разветвлениях и многолетняя трансформация морфодинамических типов русла.

В дельте Волги также существуют специфические проблемы обеспечения нормальных судоходных условий, связанные с изменением условий форми-

Структурная организация руслового рельефа на Нижнеи Волге			
Структурные уровни	Комплексы русловых форм	Средняя длина форм (L, \mathbf{m}) / средн. квадр. отклонение (σ_L)	Средняя высота форм (h, \mathbf{M}) / средн. квадр. отклонение (σ_h)
Ультрамикро- формы	рифели	~5	~0,1
Микроформы	дюны	43/31	0,8/0,5
	заструги	140/83	1,0/0,67
Мезоформы	шалыги	580/310	1,2/0,76
	песчаные волны (малые побочни и осередки)	3100/830	до 12
	большие побочни и осередки, острова	5900/1410	до 15
Макроформы	крупные островные разветвления, излучины половодного русла	13 000	до 20
Мегаформы	параллельно-рукавные разветвления	>100 000	>20



гряды длиной до 13 м

Гряды длиной до 20 м



Гряды длиной до 40 м

Гряды длиной до 80 м

Рис. 1. Гидролокационное изображение гряд с различными параметрами



Рис. 2. Формирование тела аккумуляции в нижнем бьефе Волгоградского водохранилища и его размыв за период 1940–1980-х гг.

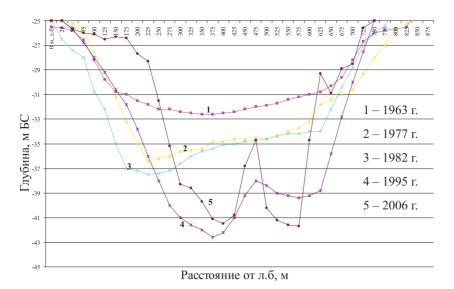
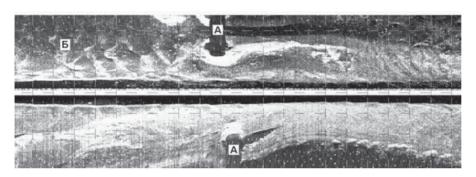
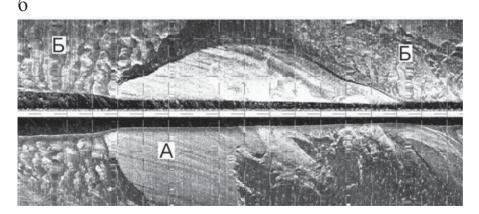


Рис. 3. Деформации дна в Трусовском рукаве по оси автодорожного моста за многолетний период



B B



В Рис. 4. Трансформация гряд при подходе к искусственным и естественным препятствиям: а — на участке мостового перехода (А — опоры моста, Б — гряды); б — на участке выхода глинистой «печины» (А — песчаные гряды, Б — песчаные рифели, В — глинистая «печина»); в — на участке выхода коренных глин на дне (А — глина, Б — песчаные гряды)

рования дельты. Регулирование речного стока каскадом водохранилищ и динамика изменения уровня Каспийского моря определяют устьевые и русловые процессы в пределах Волго-Каспийского и Волго-Белинского судоходных каналов. Дополнительные проблемы возникают в результате экономической необходимости использования судов типа «река — море», что позволяет избежать дорогостоящих перевалок грузов, однако повышает требования к габаритам судового хода и поддержанию в нем гарантированных глубин.

Методика изысканий

Для изучения рельефа дна реки и транспортируемых ею наносов авторы использовали комплекс гидроакустической аппаратуры, разработанный в лаборатории гидролокации дна Института океанологии РАН, эхолоты и приемники систем спутникового позиционирования для геодезической привязки судовых галсов. Комплекс гидроакустической аппаратуры состоял из гидролокатора бокового обзора (ГБО-150-1), акустического профилографа (АП-4,5), графического самописца «ОКЕАН» и цифровой системы сбора-обработки гидролокационной информации «РАСТР». Гидролокационное картирование подводного рельефа при помощи гидролокатора бокового обзора, непрерывное сейсмоакустическое профилирование на базе акустического профилографа и продольное эхолотирование по фарватеру судового хода позволяют довольно детально представить современную картину расположения основных форм подводного рельефа и литологию слагающих их грунтов и подстилающих пород [5, 6].

Грунтовые съемки с отбором поверхностного слоя наносов (5–10 см) производились синхронно с промером и автономно во время остановки судна при помощи донных щупов и дночерпателей. Механический анализ проб донных наносов заключался в разделении песчаных фракций с диаметром частиц до 0,1 мм на стандартном наборе сит и фракций с частицами менее 0,1 мм на фракциометре. При этом в соответствии с принятой десятичной классификацией выделялись следующие фракции: больше 100 мм (валуны); 100-10 мм (галька); 10-1 мм (гравий); 1-0,5 мм (крупный песок); 0,5-0,25 мм (средний песок); 0,25-0,1 мм (мелкий песок); 0,1-0,01 мм (алевриты); мельче 0,01 мм (илы).

Динамика руслового рельефа исследовалась методом анализа сопоставления разновременных лоцманских и топографических карт, а также космо-



снимков. Геоморфологическое строение дельтовой поймы изучалось на основе полевых маршрутов и анализа геологических данных, топографических карт и космических снимков. Таким образом, в качестве информационной основы исследования были использованы материалы полевых гидрографических, геологических и геофизических изысканий, методы руслового анализа разновременных лоций, топографических карт и космических снимков Landsat-7.

Результаты дистанционных методов исследований

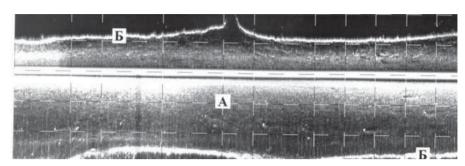
Статистическая обработка результатов эхолотирования позволила получить продольное изменение отметок дна на всем протяжении главного русла Волги на придельтовом участке и отдельных магистральных рукавов ее дельты. Полученные данные послужили основой для определения структурной организации руслового рельефа (табл. 1), при этом было выделено 8 комплексов русловых образований. Данные о характерных размерах наименьших грядовых форм (от ультрамикроформ до мезоформ) могут быть использованы для определения стока влекомых наносов по методике Н.И. Алексеевского [1].

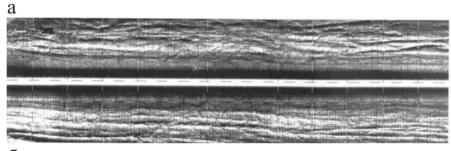
При определении параметров грядовых форм к анализу привлекался материал, полученный в результате непрерывной записи гидролокатора бокового обзора, синхронной с эхолотированием (рис. 1).

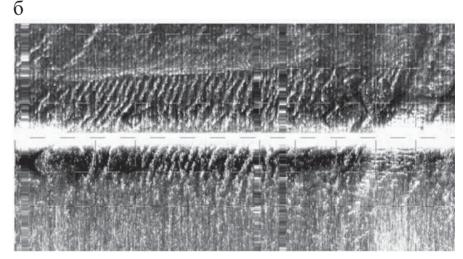
Результаты эхолотирования использовались также при анализе изменения отметок дна на приплотинном участке ниже Волжской ГЭС, где после ее строительства и создания Волгоградского водохранилища последовало значительное понижение уровня воды в нижнем бьефе. Полный перехват водохранилищем стока влекомых и частичный взвешенных наносов обусловил интенсивный размыв дна и русловых форм, что привело к так называемой «посадке» уровней. Проведенные ранее расчеты показывали, что понижение уровня воды к 1980-м годам в межень не превысит 20 см, а в начале XXI века — 40 см. Однако в настоящее время понижение уже достигло почти 1 м. Это объясняется тем, что в результате перекрытия Волги плотиной в нижний бьеф было вынесено около 26,5 млн м³ грунта, из которого было сформировано тело аккумуляции непосредственно ниже створа плотины [4]. Наличие тела аккумуляции создавало подпорный эффект на приплотинном участке и некоторое время задерживало интенсивное понижение уровня воды. В дальнейшем последовал размыв тела аккумуляции и его смещение вниз по течению (рис. 2). По некоторым оценкам, к настоящему времени понижение уровня воды составило до 1,5–1,7 м при меженных расходах воды реки и 0,5–0,6 м при прохож-

дении половодья, а тело аккумуляции и следующий за ним фронт размыва сместились вниз по течению на расстояние около 200 км [7].

На отдельных участках русла Нижней Волги проводилось эхолотирование поперечного профиля русла. Получен-







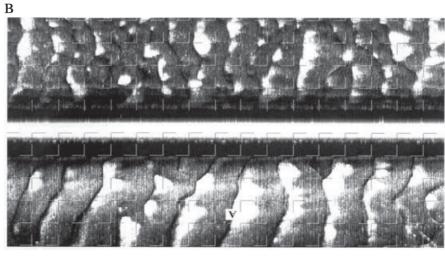


Рис. 5. Гидролокационное изображение донных отложений: а — илы; б — глины; в — песчаные рифели; г — песчаные гряды (дюны)

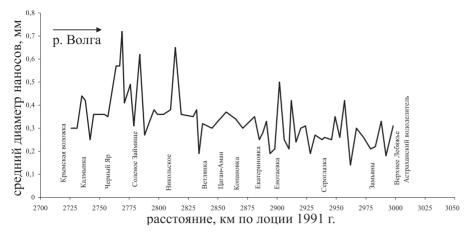


Рис. 6. Изменение среднего диаметра донных отложений р. Волги от Ахтубинска до Волжского вододелителя

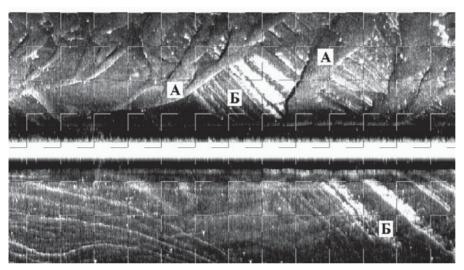


Рис. 7. Гидролокационное изображение песчаных подводных кос (A), наползающих на глины (Б)

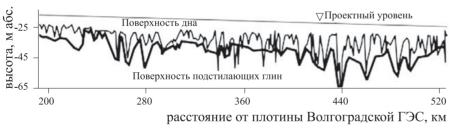


Рис. 8. Положение кровли подстилающих глин на участке от Ахтубинска до Астрахани

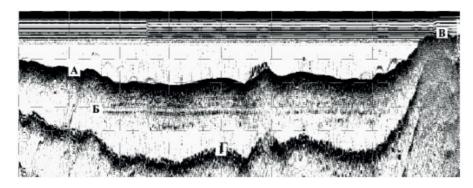


Рис. 9. Сейсмоакустический профиль через Трусовскую протоку вдоль автомобильного моста г. Астрахани: A — дно, B — слои коренных глин в песчаных отложениях, B — правый берег, Γ — кратное отражение от дна

ные данные использовались для анализа направленности и количественных характеристик деформаций дна и берегов на основе сопоставления с разновременными съемками русла (рис. 3). Полученные результаты позволили проследить динамику пропускной способности рукавов на участках разветвленного русла и легли в основу прогноза возможного перераспределения расходов воды по рукавам. Привлечение записей, полученных с помощью ГБО, на таких участках проводилось для оценки трансформации рельефа дна не только в узлах разветвления, но и при подходе к естественным и искусственным препятствиям (рис. 4).

Гидролокационная съемка локатором бокового обзора (ГБО) велась для уточнения подводного рельефа и при картировании донных отложений. Определение категории грунта на участках возможного проведения дноуглубительных работ является одной из главных задач планируемых мероприятий, поскольку выбор типов и разновидностей дноуглубительной техники основывается на знании категории разрабатываемых грунтов. Наиболее затруднительными для разработки являются плотные грунты (глины и суглинки). Для Нижней Волги это выходы коренных морских хазарских и хвалынских глин в русле. Непрерывная запись гидролокационного изображения дна позволяет выявить участки выхода глин, представленных либо глинистыми отмелями («печинами») под обрывами волго-ахтубинской поймы или бэровских бугров (рис. 4, δ), либо участками глинистого коренного дна непосредственно в русле (рис. $5, \delta$).

Для уточнения крупности аллювия проводился непосредственный отбор грунта из поверхностного слоя отложений (рис. 6). Полученные данные указывают на наличие связи изменения крупности донных отложений в русле с поступлением плохо сортированного материала из размываемых пойменных и коренных берегов. Данные механического анализа донных проб легли в основу дешифрирования гидролокационных изображений, что позволило существенно уточнить ареалы распространения различных типов донных отложений (см. рис. 5).

В ряде случаев гидролокационное изображение дна позволяет уточнить реальные мощности донных отложений, перекрывающих коренные глины. Например, на участке Нижней Волги в районе Цаган-Амана относительно тонкий слой песков сверху перекрывает выходы



коренных глин (рис. 7). Полученные данные о крупности донных отложений обычно используются в расчетных формулах для определения устойчивости русла. В результате расчета, основанного только на данных отбора проб донных отложений без учета их реальной мощности, в некоторых случаях можно неправильно определить значения коэффициента устойчивости русла.

Акустическое профилирование позволяет уточнить залегание кровли коренных пород при наличии значительной толщи руслового аллювия. Традиционно при проведении инженерно-геологических изысканий в руслах рек применяется бурение с понтона. Высокая стоимость и трудоемкость таких работ обычно приводят к значительной минимизации количества скважин и расположению их по разреженной сетке, что при неровном залегании кровли коренных пород ведет к искажению истинного литологического строения русла. Непрерывное сейсмоакустическое профилирование с опорой на буровые скважины позволяет избежать подобных ошибок (рис. 8, 9).

Метод сопоставления и совмещения разновременных картографических материалов (топографических и лоцманских карт) и космических снимков позволил установить основные переформирования русла Нижней Волги, выявить исторические тенденции их развития и составить прогнозные оценки возможных изменений на ближайшее время. Типичным примером характерных для Нижней Волги русловых деформаций является участок Капитанских перекатов (рис. 10).

Установлено, что на этом участке в результате регулирования стока воды Волгоградским водохранилищем произошла смена морфодинамического типа русла с относительно прямолинейного (с подвижными побочнями) на разветвленное. Если до создания водохранилища здесь наблюдалось периодическое отторжение побочней от берегов и их смещение вниз по течению в виде осередков, то после начала регулирования стока воды осередки стали занимать в русле устойчивое положение. По мере приращения высоты поверхностей осередков и зарастания их растительностью они стали превращаться в острова. Динамическая ось потока и судовой ход, ранее располагавшиеся в центральной части русла, стали искривляться и последовательно огибать острова Капитанский и Селитренный. Такое изменение положения динамической оси потока не только

Схема горизонтальных деформаций русла Волги на Сероглазовском участке за период 1965–1982 гг.

Машкии

Ураз 1982 г.

— урез 1982 г.

фаралгер судового хода
причалы, остановочные пункты

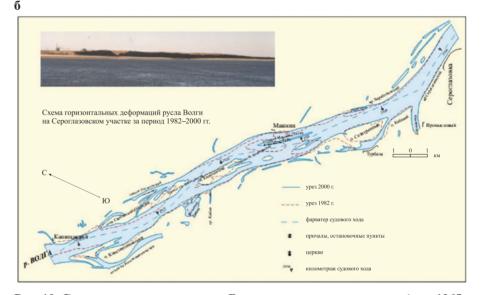


Рис. 10. Совмещенные планы русла Волги за различные периоды (а — 1965-1982 гг., б — 1982—2000 гг.) на Сероглазовском участке

создает предпосылки к развитию излучины, но и удлиняет судовой ход.

Детальный анализ, проведенный для всей речной части Нижней Волги на основе применения методов сопоставления и совмещения разновременного картографического материала, позволил дать прогнозные оценки возможных русловых переформирований на ближайшее время. Установлено, что исторические тенденции и особенности современного развития русловых процессов на Нижней Волге будут способствовать сохранению в ближайшие 10-20 лет достаточно стабильного состояния русла. Однако для судоходства можно ожидать ряда неблагоприятных последствий, связанных с протекающими деформациями русла. Для участков меандрирующего русла ожидается увеличение крутизны излучин. На относительно прямолинейных участках реки наиболее характерным процессом будет медленный размыв коренного ведущего берега и блуждание динамической оси потока при относительной стабильности положения русла в плане. Ожидается постепенное закрепление осередков растительностью, превращение их в острова и медленная трансформация прямолинейного русла в разветвленное [3, 10]. Наиболее существенных русловых переформирований следует ожидать на участках пойменно-русловых разветвлений и на участках меандрирующего русла с прорванными излучинами. Все эти прогнозируемые процессы потребуют проведения ряда русловыправительных мероприятий и текущих работ по поддержанию судоходных условий.

Дистанционные методы исследований применялись и для дельтового участка Нижней Волги. Однако в отличие от речной части в дельте Волги процессы руслоформирования осложняются рядом специфических факторов. К ним относятся: постоянное продольное уменьшение стока по магистральному направлению судоходных рукавов, колебания уровня Каспийского моря, сгонно-нагонные явления и ряд других

морских факторов. Все эти факторы в той или иной мере создают предпосылки для возникновения участков, затрудняющих судоходство. К ним в дельте Волги можно отнести прежде всего Харбайский узел разветвления [1] и часть глубоководного Волго-Каспийского канала, расположенного в пределах авандельты и огороженного дамбами.

Выводы

1. Современные дистанционные методы исследования рельефа дна реч-

ных водотоков и русловых отложений существенно дополняют и уточняют традиционный комплекс инженерногидрографических, инженерно-геологических и инженерно-гидрометеорологических изысканий.

2. Применение современных комплексов гидроакустической аппаратуры обеспечивает получение дополнительных материалов для проведения полноценного руслового анализа в целях улучшения судоходных условий на реках. 3. В ряде случаев применение акустической аппаратуры, например сейсмопрофилографа, позволяет значительно облегчить получение объективной информации по литологическому строению аллювиальной толщи и резко снизить затраты на проведение изысканий, их трудоемкость и продолжительность.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для ведущих научных школ НШ-1010.2014.5.

Список литературы

- 1. *Алабян А.М., Беликов В.В., Крыленко И.Н., Лебедева С.В.* Применение двумерных гидродинамических моделей для решения проблем регулирования русла Нижней Волги в условиях дефицита данных гидрологических изысканий // Инженерные изыскания. 2014. № 2. В печати.
- 2. Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 203 с.
- 3. Атлас русловой морфодинамики Нижней Волги. М.: Изд-во МГУ, 2009. 232 с.
- 4. *Векслер А.Б., Доненберг В.М.* Переформирование русла в нижних бьефах крупных гидроэлектростанций. М.: Энергоатомиздат, 1983. 217 с.
- 5. *Коротаев В.Н., Зайцев А.А., Римский-Корсаков Н.А., Сычев В.А.* Морфология русла и стратиграфия отложений в западной подсистеме водотоков дельты р. Волги // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 1996. № 5. С. 53-60.
- 6. *Коротаев В.Н., Римский-Корсаков Н.А.* Исследование рельефа и отложений речных русел методами гидроакустики // Геоморфология на рубеже XXI века. М.: Изд-во Московского ун-та, 2000. С. 307-309.
- 7. *Мажбиц Г.Л., Буланов Е.П.* Изменение положения кривой связи расходов и уровней воды и русловые процессы в нижнем бьефе Волжской ГЭС // Водные ресурсы Волги: настоящее и будущее, проблемы управления. Астрахань: Изд-во Астраханского ун-та, 2008. С. 232-240.
- 8. Нижняя Волга: геоморфология, палеогеография и русловая морфодинамика. М.: ГЕОС, 2002. 241 с.
- 9. Попов И.В. Русловые переформирования р. Волги на участке Волгоград Астрахань // Труды ГГИ. 1963. Вып. 108. С. 4-67.
- 10. Middelkoop H., Schoor M.M., Alabyan A.M., Babich D.B., Shoubin M.A., Van Den Berg J.H., De Kramer J., Dijkstra J.T. Bio-morphodynamics of the Lower Volga river a reference for river rehabilitation in the Netherlands // Rehabilitating large regulated rivers. Archiv für Hydrobiologie. 2005. V. 155. № 1-4. P. 89-104.