ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА, 2024, № 5, с. 82–110

ОБЗОРЫ

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПЛОЩАДЕЙ ЗАЛИВАНИЯ И ВОДНОГО БАЛАНСА ДЕЛЬТЫ ВОЛГИ В ПОЛОВОДЬЕ

© 2024 г. Н. С. Зилитинкевич[1, *]

[1]Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

*E-mail: vodanavolge@mail.ru

Поступила в редакцию 26.12.2023 г.

Обзор исследований площадей заливания дельты Волги ($F_{общ}$) и водного баланса дельты Волги (ВБ) в половодье представляет собой базу накопленных знаний об особенностях $F_{общ}$ и ВБ в половодье и методах их исследования. Проанализированы достоинства и недостатки этих методов. Выявлено, что исследования $F_{общ}$ и ВБ в половодье не завершены, получены лишь ориентировочные ежедневные $F_{общ}$ и ориентировочные ежедневные параметры ВБ за некоторые половодья. Поэтому особенности $F_{общ}$ и ВБ в половодья разной водности так и не выявлены в полной мере. Методы исследований менялись и совершенствовались, поэтому точность полученных разными методами ориентировочных ежедневных $F_{общ}$ и ориентировочных ежедневных параметров ВБ за разные половодья существенно различается. Результаты таких расчетов невозможно анализировать в совокупности. Результатами таких расчетов невозможно будет дополнить обладающие высокой точностью будущие исследования. Однако благодаря появлению новых технологий и большого количества спутниковых данных разработанные методики можно внедрять в новейшие исследования, получая высокоточные результаты. Вследствие чего остаются нерешенными следующие задачи: рассчитать с хорошей точностью ежедневные $F_{общ}$ и ежедневные параметры ВБ за половодья разной водности, применив высокотехнологичные методы с использованием большого количества космоснимков; выявить пространственно-временные закономерности и отличительные особенности половодий разной водности по ежедневным $F_{общ}$ и по ежедневным параметрам ВБ.

Ключевые слова: половодье, дельта Волги, площади заливания, параметры водного баланса, космоснимки

DOI: 10.31857/S0205961424050069, **EDN:** RROQHK

ВВЕДЕНИЕ

Дельта Волги (ДВ) – одна из крупнейших дельт мира со сложной гидрографической сетью. Это самая большая дельта в Европе. ДВ располагается на территории Прикаспийской низменности, представляющей собой равнину. Ее площадь составляет 13 916 км^2. ДВ состоит из центральной дельты (8 248 км^2), района западных подстепных ильменей (4 216 км^2) и района восточных подстепных ильменей (1 452 км^2) (Полонский, Остроумова, 2005). Вся территория дельты прорезана сложной сетью различных по величине водотоков. В дельте располагается большое количество озер, песчаных бугров, дюн, пологих ложбин. Именно эта запутанная сеть водотоков и водоемов вместе с богатой растительностью превращают дельту в оазис на фоне сопредельных однообразных полупустынь и пустынь Прикаспийской низменности, практически лишенных водных объектов и растительности (Занозин, 2003).

На территории ДВ проживает большое число жителей. Она богата природными ресурсами, имеет большое хозяйственное значение, активно используется сельским, рыбным, коммунальным хозяйствами, водным транспортом. ДВ ценится как рекреационная зона (Занозин, 2003). Важнейшей отраслевой деятельностью здесь является рыбное хозяйство. В дельте обитает множество видов рыб: осетровые, сельдевые, карповые, окуневые и др. Большое количество проходных и полупроходных рыб разных видов совершают нерестовые миграции из моря на нерестилища дельты. Рыба нерестится на залитой во время весеннего половодья местности (поля, луга, леса) – в полоях. В полоях дельты хорошо прогреваемая вода, затопленная растительность и обилие гидробионтов создают благоприятные условия для сохранения и развития откладываемой икры. ДВ является высокопродуктивным нерестилищем (Шумова, 2014; Подоляко, 2014; Бухарицин и др., 2017; Васильченко и др., 2019).

ДВ – это важный объект исследования по следующим причинам. С 2010 по 2020 гг. уровень Каспийского моря понизился на 1 метр с –27 до –28 м БС (Балтийская система высот). Причина:

прямой водозабор из питающих море рек и испарение (Dero, 2020). Уровень Каспийского моря определяется его водным балансом. Основную часть приходной составляющей водного баланса (примерно 80%) составляет речной сток. Около 80% его приходится на сток р. Волги (Гинзбург, Костяной, 2018).

После постройки каскада водохранилищ и гидроэлектростанций в Волжском речном бассейне водность половодий в ДВ уменьшилась настолько, что нормальное обводнение нерестилищ стало невозможным (за исключением многоводных лет). Маловодные половодья проходят столь стремительно, что молодь рыб не успевает подрастать, и требования рыбного хозяйства не обеспечиваются (Бармин, 2002; Брумштейн и др., 2013; Подоляко, 2014; Васильченко и др., 2019).

Изучение площадей заливания и водного баланса (ВБ) дельты Волги (ДВ) в половодье необходимо для:

1) оптимального управления водным режимом ДВ;

2) планирования водохозяйственных и гидротехнических мероприятий;

3) предупреждения и защиты от наводнений и маловодий;

4) оптимального использования водных ресурсов ДВ:

• водообеспечения сельского, рыбного, коммунального, промышленного хозяйств (восстановления нерестилищ, повышения продуктивности сельскохозяйственных угодий, развития коммунального и промышленного водоснабжения);

• развития сухопутного и водного транспорта;

• развития рекреационных зон;

• сохранения или изменения видового состава флоры и фауны.

Работы по оценке площадей заливания и ВБ ДВ в половодье были начаты в середине XX века. По мере развития технологий, методы оценки площадей заливания и ВБ ДВ в половодье совершенствовались. Основной задачей данного обзора было проанализировать достоинства и недостатки ранее предложенных методов и суммировать собранные с применением этих методов результаты. База накопленных знаний об особенностях площадей заливания и ВБ ДВ в половодье и методах их изучения сформировала сегодняшние представления о закономерностях процессов заливания ДВ в половодье. На основе этих знаний можно выполнять дальнейшие исследования площадей заливания и ВБ ДВ в половодье.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОЩАДЕЙ ЗАЛИВАНИЯ ДВ В ПОЛОВОДЬЕ

Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе данных авиаоблетов

С.С. Байдин заложил основы методов расчета площадей заливания ДВ в половодье (1967). Все расчеты площадей заливания русловой сети и межрукавных пространств ДВ ($F_{общ}$) при разных расходах воды, поступающих в дельту, основывались на визуальных наблюдениях с самолета. Истинная величина $F_{общ}$ завышалась по причине различного зрительного восприятия с высоты полета самолета водной поверхности и суши. Приморская зона дельты, занятая густыми зарослями тростника, не рассматривалась. Для исследования заливания было выполнено районирование ДВ. Вся дельта была разделена на две части: восточную и запад-

Рис. 1. Дельта Волги и Каспийское море на карте https://earth.google.com/.

ную (рис. 2). Восточная и западная части состояли из 3 зон: верхней, средней и нижней. Для расчета изменений $F_{общ}$ ДВ и всех ее зон в зависимости от среднесуточного уровня воды ($H_Р$) на г/п г. Астрахань. С.С. Байдин (1967) построил графики зависимости $F_{общ}$ от $H_Р$ ($F_{общ} = f(H_Р)$) на г/п г. Астрахань для ДВ и всех ее зон. Точки на этих графиках соединялись линиями интерполяции, отображающими ветвь подъема и спада половодья. Траектории этих ветвей показывали изменения хода каждой фазы половодья. Заливание ДВ в половодье характеризуется ходом ежедневных $F_{общ}$, полученных за половодья с разной водностью: многоводное, маловодное, средневодное. Проводить частые авиаоблеты для изучения половодий не было возможности. Поэтому строилась зависимость определенных за конкретные даты разных половодий $F_{общ}$ от $H_Р$ на г/п г. Астрахань, полученных за эти же даты. Поэтому полученная $F_{общ} = f(H_Р)$ являлась обобщенной зависимостей $F_{общ}$ от $H_Р$, построенных для половодий разной водности. Кроме того, величины $F_{общ}$, полученные на основе визуальных наблюдений с самолета, были неточными. Все это не позволяло описать истинный ход конкретного половодья. Поэтому метод нуждался в совершенствовании.

С использованием полученных $F_{общ} = f(H_Р)$ можно было определять за конкретные даты любого половодья ориентировочные $F_{общ}$ ДВ и всех ее зон при разных $H_Р$ на г/п г. Астрахань. Результаты исследования только в общих чертах описывали особенности заливания ДВ в половодье. С использованием полученных $F_{общ} = f(H_Р)$ на г/п г. Астрахань по значениям $H_Р$ на г/п г. Астрахань можно было отслеживать приблизительный ход любого половодья, что необходимо для оптимального использования водных ресурсов дельты.

Исследования площадей заливания ДВ в половодье продолжил В.С. Рыбак (1973а). В 1977 г. планировался запуск Волжского вододелителя (рис. 2)

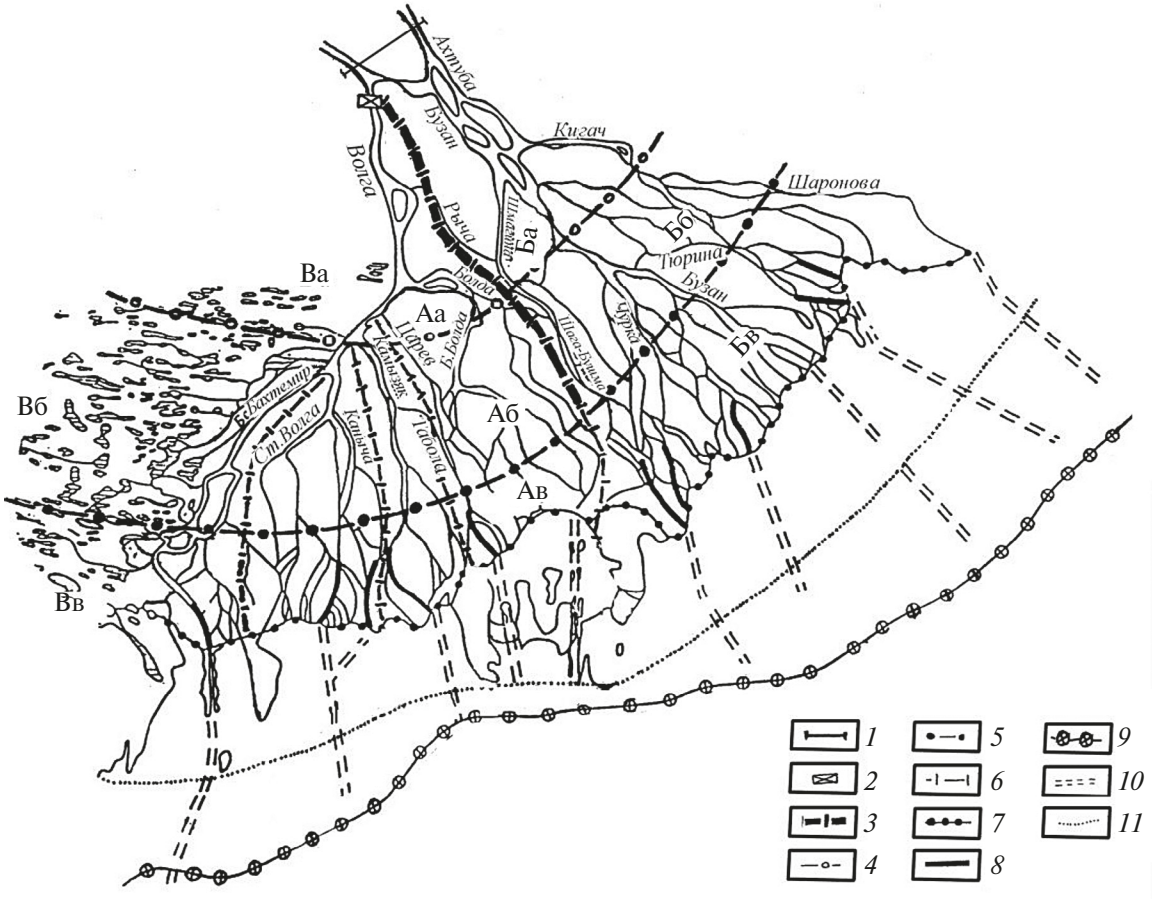

Рис. 2. Аа, Аб, Ав, Ба, Бб, Бв, Ва, Вб, Вв – 9 районов дельты Волги (Б – восточная часть, А – западная часть, В – западные подстепные ильмени, а – верхняя зона, б – средняя зона, в – нижняя зона); *1* – вершина дельты Волги; *2* – Волжский вододелитель; *3* – вододелительная дамба; *4* – южная граница верхней зоны дельты; *5* – южная граница средней зоны дельты; *6* – границы систем магистральных рукавов дельты; *7* – морской край дельты; *8* – банки (коллекторы стока) у морского края дельты; *9* – южная граница отмелой зоны устьевого взморья; *10* – магистральные каналы в отмелой зоне устьевого взморья; *11* – южная граница островной подзоны отмелой зоны устьевого взморья (Горелиц, Полонский, 1997; Полонский и др., 1998).

в вершине дельты, предназначенного для обводнения восточной части ДВ в маловодные половодья для обеспечения нереста рыб и сельского хозяйства. Была поставлена задача рассчитать $F_{общ}$ ДВ на спаде и подъеме половодья при разных $H_Р$ на г/п г. Астрахань при работающем и неработающем вододелителе. Были использованы материалы авиаоблетов дельты. Облеты дельты проводились при разных $H_Р$ на г/п г. Астрахань в период подъема и спада разных половодий. По ландшафтным и гидрографическим особенностям ДВ была разделена на три района (западные подстепные ильмени, центральный район: восточная дельта и западная дельта) и на 4 зоны: верхнюю, среднюю, нижнюю и приморскую (рис. 2). В этом исследовании была захвачена приморская зона дельты, которая ранее не рассматривалась.

Для решения поставленной задачи В.С. Рыбак (1973а) построил $F_{общ} = f(H_Р)$ на г/п г. Астрахань для ДВ и ее трех районов. По методике С.С. Байдина (1967) он рассчитал $F_{общ}$ ДВ и ее трех районов при одних и тех же расходах воды в вершине дельты при разных $H_Р$ на г/п г. Астрахань в условиях неработающего и работающего вододелителя. В результате проделанной работы были получены прогнозные значения $F_{общ}$, которые должны были наблюдаться после введения в эксплуатацию вододелителя.

Преимущества данного исследования по сравнению с предыдущими состояло в том, что $F_{общ}$ рассчитывалась с большей частотой; была охвачена большая территория дельты; расчеты были выполнены по двум фазам половодья (подъем и спад), а не по одной. Таким образом, была получена более подробная картина режима заливания ДВ в половодье. Оценка влияния вододелителя имела большое хозяйственное значение. Однако метод расчета $F_{общ}$ С.С. Байдина (1967) нуждался в совершенствовании. Результатов данного исследования было слишком мало для выявления всех особенностей половодий дельты.

На основе работ С.С. Байдина (1967) и В.С. Рыбака (1973а) был оценен вклад половодья в водный режим дельты. Это исследование было проведено О.В. Горелиц и В.Ф. Полонским (1997). Они рассчитывали $F_{общ}$ ДВ с применением ранее полученных $F_{общ} = f(H_Р)$ (Байдин, 1967; Рыбак, 1973а). С использованием данных по $H_Р$ на г/п г. Астрахань они рассчитали по методике С.С. Байдина (1967) среднемесячные значения $F_{общ}$ трех районов ДВ (районирование В.С. Рыбака (1973а))

1) для 12 месяцев (январь – декабрь), усредненные за многолетний период с 1961 по 1993 гг.;

2) для 12 месяцев (январь – декабрь) 1991 г. (год максимальной водности).

В результате расчетов были выявлены закономерности внутригодовой изменчивости площадей заливания ДВ. Следует отметить, что величины $F_{общ}$ сильно изменчивы в период половодья (апрель – август) и мало изменчивы в меженный период (август – апрель).

Каждый из трех районов, выделенных В.С. Рыбаком (1973а) (восточная дельта, западная дельта, ЗПИ), О.В. Горелиц и В.Ф. Полонский (1997) разделили на три части: верхнюю, среднюю и нижнюю. Таким образом, ДВ была разделена на 9 районов (рис. 2).

С применением ранее полученных $F_{общ} = f(H_Р)$ (Байдин, 1967; Рыбак, 1973а) по методике С.С. Байдина (1967) они рассчитали $F_{общ}$ ДВ и ее 9 районов при разных $H_Р$ на г/п г. Астрахань, наблюдавшихся в фазу подъема и фазу спада половодья.

В данном исследовании использовалось больше данных по $F_{общ}$, чем в предыдущих, расчеты были впервые выполнены по всей дельте с использованием подробного районирования для двух фаз половодья (подъем и спад). Впервые был выполнен сравнительный анализ особенностей заливания 9 районов ДВ, и в общих чертах объяснены причины этих особенностей (рельеф, обвалованные русла водотоков, насыпи, дамбы, наличие большого количества бугров Бэра в районе ЗПИ). Были уточнены стадии половодья в ДВ, выделенные ранее С.С. Байдиным и др. (1956), с указанием соответствующих каждой стадии значений суммарных среднесуточных расходов воды, поступающих в ДВ по руслам реки Волги, реки Ахтубы, с Волго-Ахтубинской поймы (Q_c) (Горелиц, Полонский, 1997):

1 – стадия массового выхода воды на пойму ($Q_c = 16000$ м^3/с),

2 – стадия интенсивного заливания дельты (16000 м^3/с $< Q_c <$ 22000 м^3/с),

3 – стадия накопления воды на залитых территориях (22000 м^3/с $< Q_c <$ 32000 м^3/с),

4 – стадия интенсивного уменьшения площадей заливания дельты после пика половодья.

Зная Q_c (рассчитывается по данным г/п дельты), можно выявить на какой стадии проходит половодье. Это нужно для планирования хозяйственной деятельности в дельте.

В вышеописанных исследованиях для построения $F_{общ} = f(H_Р)$ для ДВ и ее районов использовались $H_Р$ только на г/п г. Астрахань. Площадь ДВ составляет 13 916 км^2. По ее территории течет множество водотоков, в разных участках которых разные $H_Р$. Поэтому измерений $H_Р$ на одном г/п дельты недостаточно для того, чтобы получить полную картину изменений $H_Р$ в ходе половодья во всей дельте и ее

районах. Это учли О.В. Горелиц и В.Ф. Полонский (1997) в своем исследовании влияния изменения уровня Каспийского моря на заливание дельты Волги в половодье. Такое исследование было проведено впервые. Оно внесло большой вклад в изучение заливания ДВ в половодье. По причине того, что уровень Каспийского моря меняется из года в год, исследование имело большое практическое значение. По всем 9 районам, изображенным на рисунке 2, были получены $F_{общ} = f(H_Р)$ на репрезентативных для каждого района г/п с использованием $F_{общ} = f(H_Р)$, взятых из литературы (Байдин, 1967; Рыбак, 1973а). Для этого $H_Р$ на г/п г. Астрахань были пересчитаны в $H_Р$ на репрезентативных для каждого района г/п. Помимо этого, были получены графики зависимости $H_Р$ на репрезентативных для каждого района г/п от среднего по акватории среднесуточного уровня Каспийского моря ($H_к$) ($H_Р = f(H_к)$) при Q_c равных 6000 м^3/с, 22000 м^3/с, 32000 м^3/с. По методике С.С. Байдина (1967) были рассчитаны $F_{общ}$ ДВ и ее 9 районов при разных $H_Р$ на репрезентативных для каждого района г/п. О.В. Горелиц и В.Ф. Полонский (1997) получили следующие результаты:

1) понижение $H_к$ ниже отметки –27.5 м БС в пределах отмелой зоны устьевого взморья (рис. 2) исключает влияние изменения уровня моря и сгонно-нагонных явлений на режим уровней в дельте Волги. Подпор морской воды в дельту начинает распространяться лишь после преодоления $H_к$ отметки –27.5 м БС. Этот факт выявили ранее В.Н. Михайлов и соавторы (1993);

2) выявлено, как изменится $F_{отн}$ 9 районов при Q_c равных 6000 м^3/с и повышении $H_к$ от –27 до –26 м БС; при Q_c равных 6000 м^3/с и повышении $H_к$ от –27 до –25 м БС;

3) выявлено, как изменится $F_{отн}$ 9 районов при Q_c равных 22000 м^3/с и повышении $H_к$ от –27 до –26 м БС; при Q_c равных 22000 м^3/с и повышении $H_к$ от –27 до –25 м БС;

4) выявлено, как изменится $F_{отн}$ 9 районов при Q_c равных 32000 м^3/с и повышении $H_к$ от –27 до –26 м БС; при Q_c равных 32000 м^3/с и повышении $H_к$ от –27 до –25 м БС.

Результаты исследования О.В. Горелиц и В.Ф. Полонского (1997) нужны для сохранения народного хозяйства в условиях повышения уровня Каспийского моря. Однако предложенный ими метод дает неточные результаты. Для получения истинных значений $F_{общ}$ ДВ и ее районов при разных уровнях Каспийского моря необходимо проводить дополнительные исследования с применением более совершенных методик. Для того чтобы подробно изучить влияние изменения уровня Каспийского моря на заливание ДВ в половодье, расчеты необходимо выполнить не только при Q_c равных 6000 м^3/с, 22000 м^3/с, 32000 м^3/с, но и при других значениях Q_c.

Методику С.С. Байдина (1967) для расчета ежедневных площадей заливания ДВ в половодье усовершенствовали В.Ф. Полонский и О.В. Горелиц (2003). По всем 9 районам ДВ, изображенным на рис. 2, $F_{общ} = f(H_Р)$ на репрезентативных для каждого района г/п В.Ф. Полонский и О.В. Горелиц (2003) взяли из работы О.В. Горелиц и В.Ф. Полонского (1997). $F_{общ}$ состоит из площади заливания русловой сети (F_p) и площади заливания межрукавных пространств ($F_п$): $F_{общ} = F_p + F_п$. Они строили $F_{общ} = f(H_п)$ для каждого района с использованием $F_{общ} = f(H_Р)$ на репрезентативных для каждого района г/п. С использованием $F_{общ} = f(H_Р)$ на репрезентативных для каждого района г/п для всех 9 районов были построены петли половодий: маловодного 1945 и многоводного 1947 (в эти года режим стока реки Волги был естественный); маловодного 1996 и многоводного 1991 (в эти года режим стока реки Волги был зарегулированный). По ежедневным $H_Р$ были рассчитаны ежедневные $F_{общ}$ ДВ и ее 9 районов за исследуемые половодья (маловодные 1945 и 1996 гг., многоводные 1947 и 1991 гг.).

В.Ф. Полонским и О.В. Горелиц (2003) впервые был проведен сравнительный анализ половодий с разной водностью, проходящих в условиях естественного и зарегулированного режима стока реки Волги. Было выявлено как регулирование режима стока реки Волги влияет на прохождение многоводных и маловодных половодий. Эти исследования важны для ведения антропогенной деятельности в ДВ. С использованием полученных ежедневных $F_{общ}$ ДВ и ее районов были рассчитаны ежедневные объемы воды, накапливающейся и расходующейся в ДВ, за исследуемые половодья (Полонский, Горелиц, 2003). Результаты расчета изложены в разделе “Исследования водного баланса дельты Волги в половодье”.

Прогресс в исследовании $F_{общ}$ в половодье заключался в том, что с помощью новой методики можно было рассчитать ежедневные $F_{общ}$ за любое половодье по ежедневным значениям $H_Р$. Впервые стало возможным получить ежедневные $F_{общ}$ за период полки половодья. Однако данная методика имела несколько недостатков:

1) исходные данные, взятые из работы (Горелиц, Полонский, 1997), были неточными по вышеописанным причинам;

2) ветви подъема и спада на графике $F_{общ} = f(H_Р)$ были осредненными ветвями подъема и спада половодий разной водности, что искажало истинную динамику $F_{общ}$ за период подъема и спада конкретного половодья;

3) петля половодья искажала истинную динамику $F_{общ}$ за период полки конкретного половодья.

Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе спутниковых данных

К.В. Цыценко и А.Л. Шалыгин (2002, 2003) продолжили исследования площадей заливания ДВ в половодье с применением спутниковых данных. С применением космоснимков спутников Ресурс-01, Landsat-TM, Landsat-MSS с высоким и средним разрешением от 30 м до 200 м они получили значения $F_{общ}$ выделенных ими трех районов ДВ (1 – центральная дельта, 2 – западные ильмени, 3 – восточные ильмени) за охваченные космической съемкой даты половодий, наблюдавшихся в период с 1975 по 1998 гг. (13 дат). Для расчета $F_{общ}$ были использованы методы спектральных индексов для выделения покрытых водой участков на космоснимках: NDVI (нормализованный относительный индекс растительности) (Rouse et al., 1973), LWCI (индекс влагосодержания в листьях) (Hunt et al., 1987), SWCI (индекс содержания поверхностных вод на влажной почве) (Du Xiao et al., 2007). Индексы рассчитывались в программе ILWIS. По значениям этих индексов вода была отделена от суши. Затем программа рассчитывала количество пикселей на космоснимках, захваченных водой. $F_{общ}$ в пикселах переводилась в $F_{общ}$ в км^2. С использованием данных по $H_Р$ на г/п г. Астрахань за даты космической съемки были построены $F_{общ} = f(H_Р)$ на г/п г. Астрахань для всех 3 районов. Затем по методике С.С. Байдина (1967) были рассчитаны $F_{общ}$ ДВ и ее 3 районов при разных $H_Р$ на г/п г. Астрахань на спаде и подъеме половодья.

Гидрографическая сеть ДВ сложна и изменчива. Особую сложность и изменчивость она приобретает в период половодья. В ДВ множество рукавов, протоков, крупных и мелких озер. В период половодья появляются и исчезают водотоки, наполняются и усыхают ерики, среди которых много мелких водотоков и ериков. $F_{общ}$ дельты ежедневно увеличиваются на подъеме половодья, уменьшаются на спаде и стабилизируются в период полки половодья (Байдин, 1962). Все это можно отследить только по снимкам ДВ высокого разрешения (не менее 40 м). Поэтому применение снимков среднего разрешения в работе К.В. Цыценко и А.Л. Шалыгина (2002, 2003) понизило точность расчетов. Однако расчеты $F_{общ}$ с использованием космоснимков значительно превосходили по точности расчеты $F_{общ}$ с использованием данных авиаоблетов (Su, 1996; Schultz, 1996). Используемые в работе спектральные индексы для расчета $F_{общ}$ менее точно выделяют покрытые водой участки на космоснимках, чем спектральные индексы: NDWI (McFeeters, 1996) (нормализованный относительный индекс воды) и MNDWI (Xu, 2006) (модифицированный нормализованный относительный индекс воды) (Szabo, 2016; Kwang, 2017; Buma, 2018). В остальном исследование обладало всеми недостатками методики С.С. Байдина (1967). В исследовании был охвачен длительный промежуток времени (1975-1998 гг.), за который было получено 13 отечественных и зарубежных космических снимков половодий разной водности. Поэтому результаты расчетов более точно характеризовали ход половодий в ДВ, чем в предыдущих исследованиях.

Высокая точность или хорошая точность расчета – это получение близких к реальным (очень похожим на реальные) или реальных значений исследуемых гидрологических параметров. Оценкой точности является статистический анализ (Елисеева, 2014), который показывает линейную регрессионную зависимость некоторого количества полученных близких к реальным значений гидрологических параметров (полученных в полевых условиях или по методикам, которые рассчитывают параметры лишь за некоторые даты) от рассчитанных гидрологических параметров по разработанной методике. Статистические параметры, характеризующие точность расчета: коэффициент корреляции Пирсона и статистическая значимость корреляционной связи, коэффициент детерминации, средняя абсолютная ошибка, среднеквадратичная ошибка, разность между средними значениями двух сравниваемых переменных или смещение.

Настоящим прорывом в исследованиях площадей заливания ДВ в половодье стало применение космических снимков высокого разрешения (Полонский, Остроумова, 2005). В комбинации спектральных каналов электромагнитного излучения, в которой можно четко различать воду и сушу (Su, 1996; Евдокимов, Михалап, 2015) стало возможно определять $F_{общ}$ за даты космической съемки с точностью, которая значительно превосходит точность определения $F_{общ}$ по данным авиаоблетов (Su, 1996; Schultz, 1996; Kwang, 2017). На космоснимках высокого разрешения (20 м) российских космических аппаратов (Ресурс-Ф) с применением программы Photoshop В.Ф. Полонский и Л.П. Остроумова (2005) определяли покрытые водой участки в комбинации спектральных каналов “вода/суша” (Su, 1996; Евдокимов, Михалап, 2015). Инструментами программы Photoshop они выделяли пикселы на космоснимках, захваченные водой. Программа рассчитывала количество этих пикселей. $F_{общ}$ в пикселах переводилась в $F_{общ}$ в км^2.

Для изучения заливания такой крупной дельты как ДВ (13 916 км^2) с разнообразными ландшафтами и сложной гидрографией необходимо более подробное районирование, чем в предыдущих исследованиях, так как заливание дельты проис-

ходит по-разному в различных ее частях. Поэтому для расчетов $F_{общ}$ было использовано районирование, разработанное В.Ф. Полонским (2003). ДВ была разделена на 16 районов по 5 признакам: ландшафтные и гидрографические особенности, географическое положение, степень антропогенной освоенности, расчлененность дельты дамбами и дорогами, характеристики заливания в половодье (рис. 3). Заливание каждого района в половодье связано с изменением уровней воды на соответствующих г/п.

С использованием космоснимков В.Ф. Полонский и Л.П. Остроумова (2005) получили значения $F_{общ}$ всех районов ДВ за разные даты половодий 1982, 1986, 1991, 1997 годов, которые были охвачены космической съемкой. С использованием данных по $H_Р$ на г/п 16 районов за эти же даты они построили графики зависимости $F_{общ}$ районов от $H_Р$ на репрезентативных для каждого района г/п. С использованием полученных $F_{общ} = f(H_Р)$ были построены $F_{общ} = f(H_n)$ для всех 16 районов. Был усовершенствован метод построения $F_{общ} = f(H_n)$ В.Ф. Полонского и О.В. Горелиц (2003). Затем по методике расчета ежедневных $F_{общ}$ районов дельты, описанной в работе В.Ф. Полонского и О.В. Горелиц (2003), были получены значения ежедневных $F_{общ}$ всех 16 районов (рис. 3) за экстремально многоводное половодье 1991 г.

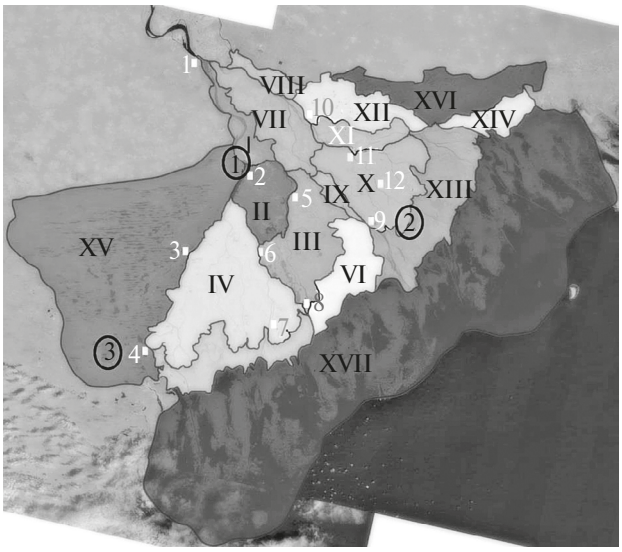

Рис. 3. Районирование дельты Волги, разработанное В.Ф. Полонским (2003). Выполнено на основе космической съемки спутника Landsat-7. I-XVI – номера районов дельты Волги, XVII – отмелая зона устьевого взморья дельты Волги. Белыми прямоугольниками обозначены гидрологические посты. 1–12 – номера гидрологических постов (с. Верхнее Лебяжье (1), г. Астрахань (2), с. Икряное (3), с. Оля (4), с. Килинчи (5), г. Камызяк (6), с. Караульное (7), с. Каралат (8), с. Зеленга (9), с. Красный Яр (10), пос. Володарский (11), с. Большой Могой (12)). В круг обведены номера метеостанций (МС): 1 – МС Астрахань, 2 – МС Зеленга, 3 – МС Лиман.

Применение космоснимков в работе В.Ф. Полонского и Л.П. Остроумовой (2005) значительно усовершенствовало методику В.Ф. Полонского и О.В. Горелиц (2003) получения ежедневных $F_{общ}$ за весь период половодья. И еще новый метод построения $F_{общ} = f(H_n)$ немного усовершенствовал эту методику. Ветви подъема и спада на графике $F_{общ} = f(H_Р)$ были осредненными ветвями подъема и спада половодий разной водности, что искажало истинную динамику $F_{общ}$ за период подъема и спада конкретного половодья. Космоснимков дельты было мало. Их было недостаточно для того, чтобы охватить самые важные изменения хода фаз половодий разной водности, что негативно отразилось на точности расчетов. Построение петли половодья и расчет ежедневных $F_{общ}$ были выполнены по алгоритму В.Ф. Полонского и О.В. Горелиц (2003), который нуждался в совершенствовании.

По результатам расчетов были выявлены особенности заливания всех 16 районов и дельты в целом при прохождении экстремально многоводного половодья 1991 г. Эти знания необходимы для защиты населенных пунктов от наводнений и планирования хозяйственной деятельности в разных районах дельты. С использованием полученных ежедневных $F_{общ}$ были рассчитаны ежедневные параметры водного баланса 16 районов и дельты в целом за весь период экстремально многоводного половодья 1991 (Полонский, Остроумова, 2005). Результаты расчетов изложены в разделе “Исследования водного баланса дельты Волги в половодье”.

Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе спутниковых и полевых данных

В.Ф. Полонский и Л.П. Остроумова (2011) продолжили исследования площадей заливания ДВ в половодье с использованием спутниковых и полевых данных. Для расчета $F_{общ}$ района ЗПИ (15 район по районированию В.Ф. Полонского (2003)) они использовали космоснимки ДВ высокого разрешения (30 м), полученные спутниками Landsat-5, Landsat-7 за разные даты половодий 1986, 1987, 1998, 1999, 2001, 2002, 2006, 2007 годов. С использованием этих космоснимков по алгоритму, описанному в работе В.Ф. Полонского и Л.П. Остроумовой (2005), были рассчитаны $F_{общ}$ района ЗПИ за даты космической съемки. Затем был построен график зависимости $F_{общ}$ района ЗПИ от $H_Р$ на репрезентативных г/п этого района (г. Астрахань, с. Икряное), полученных за эти же даты. Петли половодий многоводного 2005 г. и средневодного 2009 г. были построены с использованием по-

лученного графика $F_{общ} = f(H_Р)$ и полевых данных по уровням воды в районе ЗПИ, полученных за эти половодья. Эти полевые данные были взяты из ранее опубликованных работ (Полонский, Остроумова, 2009; Полонский, Остроумова и др., 2009). Значения ежедневных H_n района ЗПИ за половодья 2005 и 2009 гг. были получены осреднением значений ежедневных среднесуточных уровней воды на 13 сезонных г/п, установленных на заливаемых территориях района ЗПИ. Затем были построены графики зависимости ежедневных H_n района ЗПИ от ежедневных $H_Р$ на г/п района ЗПИ, полученных за исследуемые половодья: $H_n = f(H_Р)$. Впервые удалось построить $F_{общ} = f(H_n)$, полученных за даты космической съемки с использованием данных сезонных г/п. Такой точности построения этой зависимости не удавалось добиться ни в одном из предыдущих исследований из-за отсутствия г/п на заливаемых в половодье территориях ДВ.

Графики $H_n = f(H_Р)$ на г/п района ЗПИ, построенные за многоводное половодье 2005 и средневодное половодье 2009, опровергли допущение принятое в работе В.Ф. Полонского и О.В. Горелиц (2003) о том, что ветви фазы спада половодий с разной водностью идут по единой траектории. С использованием ежедневных значений $H_Р$ и H_n впервые были получены индивидуальные ветви спада ($F_{общ} = f(H_Р)$) половодий разной водности 2005 и 2009 гг. Интерполяционные линии и прямые линии на графиках $F_{общ} = f(H_Р)$ описывались уравнениями, выражающими зависимость $F_{общ}$ от $H_Р$. По ежедневным $H_Р$ были рассчитаны значения ежедневных $F_{общ}$ района ЗПИ за половодья многоводного 2005 г. и средневодного 2009 г. С использованием полученных ежедневных $F_{общ}$ были рассчитаны ежедневные параметры водного баланса района ЗПИ за весь период многоводного половодья 2005 г. и средневодного половодья 2009 г. (Полонский, Остроумова, 2011). Результаты расчетов изложены в разделе “Исследования водного баланса дельты Волги в половодье”.

Благодаря применению спутниковых и полевых данных в работе В.Ф. Полонского и Л.П. Остроумовой (2011) методика В.Ф. Полонского и Л.П. Остроумовой (2005) расчета площадей заливания ДВ в половодье была усовершенствована. Такой точности расчета ежедневных $F_{общ}$ не удавалось добиться ни в одном из предыдущих исследований. Благодаря этим расчетам были выявлены характеристики половодий многоводного 2005 г. и средневодного 2009 г. в районе ЗПИ, которые необходимо знать для ведения сельского, рыбного, коммунального, промышленного хозяйств в этом районе. Однако полевые работы не проводились на заливаемых территориях других районов дельты, так как эти работы трудоемкие. Подобное исследование не проводилось ни по другим районам ДВ, ни по половодьям с другой водностью. Результатов данного исследования было слишком мало для выявления всех особенностей половодий дельты. Высокоточный результат расчета площадей заливания ДВ в половодье не был достигнут, так как :

1) $F_{общ} = f(H_Р)$ и $F_{общ} = f(H_n)$ были построены с использованием космоснимков не за исследуемые половодья 2005 и 2009 гг., а за другие половодья разной водности;

2) траектории ветвей спада половодья на $H_n = f(H_Р)$ лишь приблизительно повторяли траектории ветвей спада половодья на $F_{общ} = f(H_Р)$.

Поэтому методика исследования В.Ф. Полонского и Л.П. Остроумовой (2011) нуждалась в совершенствовании.

Выводы

Исследования площадей заливания ДВ ($F_{общ}$) в половодье начали развиваться с середины 20 века. Раньше $F_{общ}$ в половодье рассчитывались на основе данных авиаоблетов. $F_{общ}$ за разные даты половодий разной водности определялись визуальным методом (Байдин, 1967). Истинная величина $F_{общ}$ завышалась из-за различного зрительного восприятия водной поверхности и суши с высоты полета самолета. Проводить частые авиаоблеты для изучения половодий не было возможности. Поэтому расчет $F_{общ}$ получался неточным.

К началу 21 века удалось:

1) ориентировочно оценить вклад половодья в водный режим дельты;

2) выявить особенности заливания ДВ при работающем и неработающем Волжском вододелителе в ее вершине;

3) определить влияние изменения уровня Каспийского моря на заливание ДВ в половодье;

4) выявить особенности прохождения многоводных и маловодных половодий в условиях естественного и зарегулированного режима стока реки Волги.

С начала 21 века исследования $F_{общ}$ в половодье стали проводиться с использованием спутниковых данных. Однако интервалы между космическими съемками дельты были слишком большими для изучения основных особенностей половодий разной водности. $F_{общ}$ рассчитывались за даты разных половодий теперь с применением космоснимков, а не методом авиаоблетов. Это существенно повысило точность методик (Полонский, Горелиц, 2003), но рассчитываемые ежедневные $F_{общ}$ все равно оставались ориентировочными из-за нехватки космоснимков. Поэтому для повышения точности

расчетов начали использоваться полевые данные (Полонский, Остроумова, 2011). Полевые работы были трудоемкие. Точность расчетов повысилась, так как полевые данные помогли уточнить $F_{общ} = f(H_P)$, строящуюся для конкретного половодья. Однако близкие к реальным ежедневные $F_{общ}$ за исследуемые половодья не удалось получить из-за больших интервалов между космическими съемками дельты.

За первое десятилетие 21 века удалось:

1) уточнить общие сведения об особенностях заливания ДВ в половодье;

2) выявить особенности прохождения экстремально многоводного половодья в ДВ;

3) определить характеристики многоводного и средневодного половодий в одном из районов ДВ с использованием полевых данных.

Таким образом, исследования площадей заливания ДВ в половодье не завершены. Получены лишь ориентировочные ежедневные $F_{общ}$ за некоторые половодья. Это связано с тем, что интервалы между космическими съемками дельты были велики для того, чтобы охватить все основные изменения хода всех фаз половодий разной водности. Поэтому особенности площадей заливания ДВ в половодья разной водности так и не выявлены в полной мере. Методы исследований менялись и совершенствовались, поэтому точность полученных разными методами ориентировочных ежедневных $F_{общ}$ за разные половодья существенно различается. Результаты таких расчетов невозможно анализировать в совокупности. Результатами таких расчетов невозможно будет дополнить будущие исследования, которые охарактеризуются значительно более высокой точностью расчетов. Но благодаря появлению новых технологий и большого количества спутниковых данных разработанные методики можно внедрять в новейшие исследования, получая высокоточные результаты. Вследствие чего остаются нерешенными следующие задачи:

1) рассчитать с высокой точностью ежедневные $F_{общ}$ за половодья разной водности (многоводное, маловодное, средневодное), применив высокотехнологичные методы с использованием большого количества космоснимков;

2) сравнить ход ежедневных $F_{общ}$ у половодий разной водности и у разных районов ДВ по характеристикам.

С использованием ежедневных $F_{общ}$ районов, полученных за половодье, можно рассчитывать ежедневные параметры водного баланса районов ДВ за весь период половодья (Полонский, Остроумова, 2005; Полонский, Остроумова, 2011). Исследования площадей заливания и характеристик водного баланса дельты необходимы для оптимального управления ее водным режимом; предупреждения и защиты от наводнений и маловодий; водообеспечения сельского, рыбного, коммунального и промышленного хозяйств.

ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДНОГО БАЛАНСА ДВ В ПОЛОВОДЬЕ

Исследования водного баланса ДВ в половодье были начаты В.С. Рыбаком (1973б). В дельте Волги происходят потери стока на испарение, фильтрацию, водозабор. Расчет величин этих потерь необходим для оценки объема притока поверхностных волжских вод в Каспийское море и оптимального использования водных ресурсов ДВ и Каспийского моря. В.С. Рыбак (1973б) использовал формулу расчета потерь стока воды в ДВ, разработанную П.С. Кузиным (1939): потери стока воды = испарение воды с русловой сети + испарение воды с заливаемых территорий + испарение воды с водной поверхности, заросшей тростником + фильтрация воды в грунт – осадки, выпадающие на водную поверхность.

Суммарный слой испарения (мм) за месяц рассчитывался по формуле ГГИ (Государственный гидрологический институт) расчета испарения с водной поверхности (Кузнецов и др., 1969). Эта формула разработана для водоемов, расположенных на равнинной территории, и рассчитывается с использованием среднемесячных метеорологических данных, измеренных на метеостанциях (МС) ДВ: температура воды (°С), температура воздуха (°С), влажность воздуха (мб), скорость ветра (м/с), облачность (баллы), направления ветра. Помимо метеоданных в формуле используются следующие данные: длина разгона воздушного потока над водоемом, растительность на берегу водоема, площадь водной поверхности, местоположение МС (защищенность станции от ветра, рельеф в районе станции, широта, высота над уровнем моря). Регулярные измерения метеопараметров проводились только на МС Астрахань. Поэтому среднемесячные вышеперечисленные метеоданные, полученные на МС Астрахань, пересчитывались в метеоданные для всей территории дельты методом коэффициентов.

Площади заливания ДВ ($F_{общ}$) в половодье рассчитывались по графику зависимости $F_{общ}$ от H_P на г/п г. Астрахань, полученному в работе В.С. Рыбака (1973а). $F_{общ}$ состоит из площади заливания русловой сети (F_p) и площади заливания межрукавных пространств (F_n). Значения F_p брались из работы С.С. Байдин и др. (1956), по этим значениям рассчитывались F_n: $F_n = F_{общ} - F_p$. Суммарный слой испарения с водной поверхности за месяц умножался на среднемесячные значения F_p и F_n. Таким образом были получены ориентировочные значе-

ния объемов воды, испарившейся с русловой сети и с заливаемых территорий, за каждый месяц периода половодья.

Суммарный слой осадков (мм), выпавших на водную поверхность дельты за месяц, рассчитывался с помощью метеоданных по осадкам, полученных на МС ДВ, переводился из мм в км и умножался на среднемесячные значения $F_{общ}$. Таким образом были получены ориентировочные значения объемов воды, выпавшей на водную поверхность дельты в виде осадков, за каждый месяц периода половодья.

Для расчета испарения с водной поверхности, заросшей тростником, был использован метод Т.М. Гельбуха (1964). Этот метод заключался в том, что суммарный слой испарения (мм) с водной поверхности за месяц пересчитывался в суммарный слой испарения (мм) с водной поверхности, заросшей тростником, за месяц с применением переводных коэффициентов. Эти коэффициенты определялись по среднемесячным величинам дефицита влажности и скорости ветра. Площадь водной поверхности, заросшей тростником, в половодье составляла 23.2% от F_n. Эта площадь была определена по крупномасштабным топографическим картам. Было принято допущение, что площадь водной поверхности, заросшей тростником, не меняется в период половодья. На самом деле эта площадь меняется за весенне-летний период с апреля по июль. Суммарный слой испарения с водной поверхности, заросшей тростником, за месяц умножался на среднемесячные значения площадей заливания тростниковых зарослей. Таким образом были получены ориентировочные значения объемов воды, испарившейся с водной поверхности, заросшей тростником, за каждый месяц периода половодья.

В.С. Рыбаком (1973б) было принято допущение, что потери стока на фильтрацию воды в грунт происходят вследствие полного заполнения всех пор деятельного слоя грунтов водой. При этом условии содержание воды в грунте количественно характеризуется величиной полной влагоемкости грунта. Средняя толщина деятельного слоя грунтов в дельте Волги, в котором температура и влагосодержание меняются в течении года, составляет 1 м (Кузин, 1951). Полная влагоемкость грунта в среднем на территории ДВ составляет 24% от объема грунта (Роде, 1965). Было принято допущение, что в период межени в деятельном слое грунтов ДВ среднее содержание воды составляет 4% от объема грунта. Средняя толщина деятельного слоя грунтов умножалась на среднемесячные значения площадей заливания межрукавных пространств и на полную влагоемкость грунтов в долях, из которой вычитались 0.04 доли. Таким образом были получены ориентировочные значения объемов воды, отфильтрованной в грунт, за каждый месяц периода половодья.

В.С. Рыбак (1973б) рассчитал потери стока воды в ДВ за половодья, проходившие с 1940 по 1955 гг., по центральному району и району ЗПИ (районирование В.С. Рыбака (1973а)). Значения $F_{общ}$, взятые из работы В.С. Рыбака (1973а), были неточными по причинам, описанным в разделе “Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе данных авиаоблетов”. Сложная гидрографическая сеть ДВ характеризуется интенсивной изменчивостью в период половодья (Байдин, 1959). $F_{общ}$ дельты ежедневно увеличиваются на подъеме половодья, уменьшаются на спаде и стабилизируются в период полки половодья (Байдин, 1962). Поэтому среднемесячные значения $F_{общ}$ лишь приблизительно характеризуют заливание ДВ в течении месяца. Кроме того, в работе В.С. Рыбака (1973б) были использованы лишь приблизительные значения средней толщины деятельного слоя грунтов в ДВ; полной влагоемкости грунта в среднем на территории ДВ; площади водной поверхности, заросшей тростником, в половодье. Это объяснялось тем, что для получения данных, требуемых для расчета этих параметров, необходимы трудоемкие полевые работы, которые не проводились в дельте. Метеоданные для всей территории дельты, площадью 13 916 км^2, рассчитывались по среднемесячным метеоданным, полученным только на одной МС.

В связи с вышесказанным значения всех параметров водного баланса в формуле расчета потерь стока воды за период половодья, используемой в работе В.С. Рыбака (1973б), определены приблизительно. Следует отметить, что формула расчета испарения с водной поверхности ГГИ является наиболее физически обоснованной для условий ДВ, многократно проверенной практически, и характеризуется приемлемой точностью (Кузнецов и др., 1969; Голубев, Федорова, 1981; Албул, 2012).

В исследования водного баланса (ВБ) внес вклад и С.С. Байдин (1991). Он разработал формулу расчета объема притока поверхностных волжских вод в Каспийское море с помощью параметров ВБ ДВ:

сток воды в море =

+ сток воды, поступающий в дельту

+ осадки, выпадающие на дельту

+ конденсация водяного пара

± приток или отток грунтовых вод

– испарение воды с дельты (испарение воды с заливаемых территорий и русловой сети, испарение почвенной влаги, транспирация водной и луговой растительностью)

– хозяйственные водозаборы

– инфильтрация воды в почву.

В связи с трудностью расчета притока или оттока грунтовых вод, испарения воды с суши, инфильтрации воды в почву эта формула не использовалась в исследованиях ВБ ДВ. В настоящее время технические возможности для исследований ДВ развиваются. Поэтому разработанная формула может оказаться востребованной в дальнейших исследованиях ВБ ДВ.

Исследования параметров водного баланса продолжили В.Ф. Полонский и О.В. Горелиц (2003). Они разработали методику расчета объемов поверхностных вод, накапливающихся и расходующихся в ДВ за каждый день периода половодья.

Объем поверхностных вод, накопленных в дельте в половодье за период времени (W) = сумме объемов поверхностных вод, накопленных в русловой сети (W_p) и на межрукавных пространствах (W_n).

Формула расчета W_n для районов ДВ:

$$W_{\text{n}} = \int_{H_{0\text{n}}}^{H_{1\text{n}}} F_{\text{n}}\left(H_{\text{n}}\right) dH_{\text{n}}, \qquad (1)$$

F_n – площадь заливания межрукавных пространств района;

H_n – средний по территории среднесуточный уровень воды на заливаемых межрукавных пространствах района;

H_{0n} – H_n, при котором начинается заливание межрукавных пространств района;

H_{1n} – H_n в конце расчетного периода.

Формула расчета изменения W_n за период времени для районов ДВ:

$$\Delta W_{\text{n}} = \frac{F_{\text{n}1} + F_{\text{n}2}}{2} \Delta H_{\text{n}}, \qquad (2)$$

ΔH_n – изменение H_n за период времени;

F_{n1} и F_{n2} – F_n в начальный и конечный моменты периода времени (сутки).

Значения ежедневных $F_{\text{общ}}$ 9 районов ДВ (районирование О.В. Горелиц и В.Ф. Полонского (1997)) (рис. 2) были рассчитаны за половодья маловодных 1945 и 1996 гг. и многоводных 1947 и 1991 гг. методом В.Ф. Полонского и О.В. Горелиц (2003), описанным в разделе “Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе данных авиаоблетов”. F_n равна разности $F_{\text{общ}}$ и F_p. Значения F_p по всем 9 районам были ранее получены В.Ф. Полонским и др. (1998). Так были получены значения ежедневных F_n в 9 районах за все исследуемые половодья. По значениям ежедневных $F_{\text{общ}}$ рассчитывались значения ежедневных H_n с использованием уравнения интерполяционной линии, проходящей через все точки $F_{\text{общ}} = f(H_n)$, полученной методом В.Ф. Полонского и О.В. Горелиц (2003), описанным в разделе “Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе данных авиаоблетов”. По формуле (2) рассчитывались ΔW_n за каждые сутки исследуемых половодий 1945, 1996, 1947, 1991 годов для всех 9 районов ДВ. Суммированием ΔW_n были получены значения ежедневных W_n, накапливающихся и расходующихся в 9 районах ДВ в периоды спада и подъема исследуемых половодий (на спаде половодья ΔW_n отрицательные).

По данным по W_p и суммарным среднесуточным расходам воды, поступающим в ДВ по р. Волге, р. Ахтубе, с Волго-Ахтубинской поймы (Q_c), взятым из работы В.Ф. Полонского и др. (1998), была построена зависимость W_p от Q_c. Накопление W_p рассчитывалось относительно меженного объема воды в русловой сети ДВ, равного 2.35 км^3. При этом объеме воды в русловой сети ДВ Q_c = 7000 м^3/с. (Полонский и др., 1998). По данным ежедневных значений Q_c на г/п ДВ были получены ежедневные значения W_p, накапливающихся и расходующихся в 9 районах ДВ, за периоды спада и подъема исследуемых половодий 1945, 1996, 1947, 1991 годов. Суммированием ежедневных значений W_p и W_n были получены значения ежедневных объемов воды, накапливающихся и расходующихся в 9 районах ДВ (W), за периоды спада и подъема исследуемых половодий.

По результатам расчетов был проведен анализ распределения объемов воды по 9 районам дельты на пике каждого исследуемого половодья. Эти знания необходимы для водообеспечения народного хозяйства, предупреждения и защиты от наводнений и маловодий в районах ДВ.

В результате проведенного исследования было выявлено, что зарегулирование режима стока р. Волги привело к сокращению объема половодья и его продолжительности, сделало невозможным полное затопление участков нереста рыб и привело к снижению рыбных запасов дельты (Полонский, Горелиц, 2003).

Значения ежедневных $F_{\text{общ}}$ 9 районов ДВ, используемые в исследовании, были неточные по причинам, описанным в разделе “Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе данных авиаоблетов”. Это привело к неточности значений ежедневных H_n. Поэтому значения ежедневных W в 9 районах, полученных за периоды спада и подъема исследуемых половодий, получились неточными. Однако невысокая точность расчета ежедневных W по разработанной методике повысится до точности близкой к высокой при наличии близких к истинным значений ежедневных $F_{\text{общ}}$ и H_n.

Значительный прорыв в исследованиях водного баланса ДВ в половодье сделали В.Ф. Полонский и Л.П. Остроумова (2005). Они разработали водно-балансовую модель дельты Волги. Эта модель представляет собой систему расчета ежедневных параметров ВБ за весь период половодья в районах ДВ. Для этих расчетов было использовано районирование, разработанное В.Ф. Полонским (2003) (рис. 3).

В основе ВБ модели лежит уравнение водного баланса районов дельты:

$$\text{ПР} - \Delta W - \text{ИС} + \text{ОС} = \text{ОТ}, \quad (3)$$

ПР – объем притока в район за сутки;

ОТ – объем оттока из района за сутки;

ИС – объем воды, испарившейся с района за сутки;

ОС – объем осадков, выпавших на район за сутки;

ΔW – изменение объема воды в русловой сети и на межрукавных пространствах района за сутки.

Объем воды в русловой сети (W_p) для районов ДВ рассчитывается по формуле:

$$W_{\text{р}} = \int_{H_{0\text{р}}}^{H_{1\text{р}}} F_{\text{р}}\left(H_{\text{р}}\right) dH_{\text{р}}, \quad (4)$$

F_p – площадь заливания русловой сети района;

$H_{\text{Р}}$ – среднесуточный уровень воды в русловой сети района;

H_{0p} и H_{1p} – $H_{\text{Р}}$ в начале и в конце расчетного периода.

Формула расчета изменения W_p (ΔW_p):

$$\Delta W_{\text{р}} = \frac{F_{\text{р}1} + F_{\text{р}2}}{2} \Delta H_{\text{р}}, \quad (5)$$

ΔH_P – изменение H_P за период времени;

F_{p1} и F_{p2} – F_p в начальный и конечный моменты периода времени (сутки).

Формула расчета объема воды в русловой сети и на межрукавных пространствах района (W):

$$W = W_{\text{р}} + W_{\text{п}}. \quad (6)$$

Формула расчета изменения W (ΔW):

$$\Delta W = \Delta W_{\text{р}} + \Delta W_{\text{п}}. \quad (7)$$

Объем воды, накапливающийся в дельте Волги, равен сумме объемов воды, накапливающихся во всех ее 16 районах.

Входные параметры ВБ модели:

1) ежедневные $F_{\text{общ}}$ района (км^2), которые рассчитываются с применением космоснимков по методике В.Ф. Полонского и Л.П. Остроумовой (2005) (методика описана в разделе “Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе спутниковых данных”);

2) ежедневные среднесуточные гидрологические данные на г/п района (рис. 3):

– среднесуточные уровни воды в русловой сети района ($H_{\text{Р}}$) (см);

– среднесуточные расходы воды на стоковых г/п в вершине ДВ (м^3/с);

– суммарные среднесуточные расходы воды, поступающей в дельту Волги по руслам рек Волги и Ахтубы, с Волго-Ахтубинской поймы (Q_c) (м^3/с);

3) ежедневные метеорологические данные на метеостанциях района (МС Астрахань, МС Зеленга, МС Лиман (рис. 2)):

– слой осадков, выпавших на район за сутки (мм);

– данные для расчета слоя испарившейся воды с района за сутки (мм) (температура воды (°С), температура воздуха (°С), влажность воздуха (мб), атмосферное давление (Па), скорость ветра (м/с), облачность (баллы), направления ветра).

Рассчитываемые параметры ВБ модели:

1) ежедневные H_n (см), рассчитываемые по ежедневным $F_{\text{общ}}$ района методом В.Ф. Полонского и Л.П. Остроумовой (2005) (метод описан в разделе “Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе спутниковых данных”);

2) ежедневные ΔW_n, ΔW_p, ΔW района (км^3), рассчитываемые по формулам (2), (5), (7). По ранее опубликованным данным по F_p (Полонский и др., 1998) была построена зависимость F_p от H_P. По данным ежедневных значений H_P на г/п рассчитывались значения ежедневных F_p;

3) ежедневные W_n, W_p, W района (км^3), рассчитываемые по формулам (1), (4), (6). Накопление W_p рассчитывалось относительно меженного объема воды в русловой сети, равного 2.35 км^3;

4) ежедневный объем осадков (км^3), выпадающих на:

- район;
- водную поверхность района;
- сушу района.

Ежедневные значения слоя осадков (км) умножались на ежедневные значения:

- площади района (км^2);
- $F_{\text{общ}}$ района (км^2);
- разности этих площадей (км^2);

5) ежедневный объем испарившейся воды (км^3) с:

- района;
- водной поверхности района;
- суши района.

Этот параметр рассчитывается по формуле расчета испарения А.П. Браславского (1986) с помощью компьютерной программы ISPAR (Остроумова, 2004; Остроумова, Михайлова, 2008). В основе формулы лежит расчет интенсивности вертикального переноса водяного пара в приводном слое атмосферы под действием свободной конвекции и вынужденной конвекции. Поэтому в формуле учтено не только влияние метеоданных на процесс испарения, но и влияние кинематической вязкости воздуха на процесс вынужденной конвекции и влияние коэффициента объемного теплового расширения воды на процесс свободной конвекции. Этот метод расчета испарения был проверен (Браславский, Остроумова, 1988, 1991; Остроумова, 1995; Остроумова, Фалеева, 2007) и охарактеризован как точный. Для расчета слоя испарения с разных ландшафтов дельты были применены коэффициенты, повышающие или понижающие величину испарения с водной поверхности (Браславский и др., 1973; Дерибизова, 1989). Ежедневные значения слоя испарения (км) умножались на ежедневные значения:

- площади района (км^2);
- $F_{общ}$ района (км^2);
- разности этих площадей (км^2);

6) ежедневные значения разности объема осадков и объема испарения в районе (км^3);

7) ежедневный объем воды (км^3):

- вытекающей из русловой сети района и попадающей в соседние районы по руслам больших и средних водотоков;
- втекающей в русловую сеть района из соседних районов и из-за пределов ДВ по руслам больших и средних водотоков.

Эти два параметра рассчитываются с использованием данных по ежедневным значениям Q_c на г/п и данных по распределению стока воды по водотокам ДВ в % от Q_c, которые содержатся в публикациях В.Ф. Полонского и др. (1998; 1992).

В.Ф. Полонский и Л.П. Остроумова (2005) рассчитали вышеперечисленные ежедневные параметры ВБ с применением разработанной ими ВБ модели за весь период экстремально многоводного половодья 1991 для дельты и ее 16 районов (районирование В.Ф. Полонского (2003)) (рис. 3).

Позднее В.Ф. Полонский и Л.П. Остроумова (2008) рассчитали ежедневные параметры ВБ с применением разработанной ими в 2005 г. ВБ модели за весь период экстремально многоводного половодья 1991 для дельты и ее укрупненных районов (районирование В.С. Рыбака (1973а)) (рис. 2).

Исследования ВБ районов ДВ важны для ведения хозяйственной деятельности в дельте. В результате исследования распределения параметров ВБ по 16 районам в экстремально многоводное половодье 1991 г. были выявлены:

1) особенности процессов водообмена в ДВ;

2) различия между величинами объемов стока, поступающих в разные районы;

3) различия между объемами воды, временно накапливающейся в районах в период половодья;

4) различия между величинами объемов воды, испаряющейся с разных районов.

ВБ модель В.Ф. Полонского и Л.П. Остроумовой (2005) не включает водозабор из районов на хозяйственные нужды населения, фильтрацию воды в грунт, подземный приток в районы и подземный отток из районов. Уравнение ВБ, лежащее в основе модели, не полностью описывает ВБ дельты. Сама модель рассчитывает отдельные параметры ВБ. Значения ежедневных $F_{общ}$ районов, используемые в расчетах, были неточные по причинам, описанным в разделе “Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе спутниковых данных”. Это привело к неточности значений ежедневных H_n, неточности значений ежедневных объемов осадков и испарения. Неточность $F_{общ}$ и H_n привела к неточности значений ежедневных ΔW_n, ΔW, W_n, W. ВБ модель нуждалась в более совершенных методиках расчета ежедневных значений $F_{общ}$ и H_n. После появления таких методик можно будет получать рассчитываемые параметры ВБ модели с точностью близкой к высокой.

Впервые формулы (1), (2), (4), (5), (6), (7) для расчета W_n, ΔW_n, W_p, ΔW_p, W, ΔW были разработаны В.Ф. Полонским в 1998 году.

Уравнение (3) ВБ В.Ф. Полонского для всей ДВ (Полонский и др., 1998):

+ объем воды, поступившей в ДВ за период времени по руслам рек Волги и Ахтубы, с Волго-Ахтубинской поймы

– объем воды, вытекшей из ДВ за период времени и поступившей в Каспийское море

– объем воды, испарившейся с ДВ за период времени

+ объем осадков, выпавших на ДВ за период времени

$= \Delta W$ (изменение объема воды в русловой сети и на межрукавных пространствах ДВ за период времени)

В 1998 г. впервые были получены приблизительные значения параметров ВБ ДВ и ее районов за экстремально многоводное и экстремально маловодное половодья. Это позволило получить ориентировочные представления о том, как затапливается и осушается дельта в ходе половодья в маловодных и многоводных условиях, какую роль при этом играют потери на испарение, сколько воды накапливается в дельте, сколько воды попадает в Каспийское море. Даже приблизительные значения этих параметров важны для хозяйственного освоения дельты и оптимального использования ее водных ресурсов.

Исследования ВБ в ДВ в половодье продолжили В.Ф. Полонский и Л.П. Остроумова (2011). С использованием разработанной ими в 2005 г. ВБ модели они рассчитали ежедневные параметры ВБ в 15 районе – районе ЗПИ (районирование В.Ф. Полонского (2003)) (рис. 3) за многоводное половодье 2005 г. и средневодное половодье 2009 г. Значения ежедневных H_n были получены с использованием полевых данных. Значения ежедневных H_n и $F_{общ}$ за половодья 2005 и 2009 гг. были получены методами В.Ф. Полонского и Л.П. Остроумовой (2011), описанными в разделе “Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе спутниковых и полевых данных”.

Благодаря использованию полевых данных ежедневные параметры ВБ района ЗПИ за половодья 2005 и 2009, рассчитанные с применением ВБ модели В.Ф. Полонского и Л.П. Остроумовой (2005), получились более точными, чем в предыдущих исследованиях (Полонский, Остроумова, 2011). Благодаря полевым работам впервые были получены:

1) близкие к реальным значения ежедневных объемов притока и оттока поверхностных вод, участвующих в осуществляющемся по сети водотоков водообмене района ЗПИ с руслом р. Волги и ее рукавом Бахтемир;

2) близкие к реальным значения ежедневных H_n;

3) более точные чем в предыдущих исследованиях значения ежедневных $F_{общ}$. Однако они не были близки к реальным значениям по причинам, описанным в разделе “Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе спутниковых и полевых данных”.

Из-за неточности ежедневных $F_{общ}$ не удалось получить близкие к реальным значения ежедневных: ΔW_n, ΔW, W_n, W, объемов осадков, объемов испарения.

Из-за трудоемкости полевых работ исследование было проведено только в одном из 16 районов дельты – районе ЗПИ. Этот район является высокопродуктивным нерестилищем, и в этом районе развито орошаемое земледелие. Зарегулирование режима стока реки Волги, пастбищное рыбоводство, работы по дноуглублению в водотоках дельты, строительство искусственных дамб – все это привело к деградации района ЗПИ. Там гибнет большое количество рыбы, происходит опустынивание и засоление земель, в некоторых местах появляются заросли пустынных кустарников и песчаные барханы. Земли вокруг высыхающих ильменей становятся непригодными для орошаемого растениеводства и выпаса скота (Валов, Бармин, 2014; Бухарицин и др., 2017). Поэтому исследование района ЗПИ имело огромное хозяйственное и экологическое значение.

Выводы

Параметры водного баланса (ВБ) ДВ в половодье:

1) осадки, испарение воды, просачивание воды в грунт,

2) накопление и расходование объемов воды в русловой сети и на заливаемых территориях,

3) приток и отток поверхностных и подземных вод в районы и из районов

зависят от площади заливания ДВ ($F_{общ}$). Поэтому методы исследования ВБ совершенствовались вместе с методами исследования $F_{общ}$.

До появления в начале 21 века космоснимков ДВ можно было получать лишь приблизительные $F_{общ}$, а значит и приблизительные параметры ВБ (Рыбак, 1973б). Ведь только по космоснимкам высокого разрешения можно точно определять $F_{общ}$. В первом десятилетии 21 века увеличение частоты космической съемки ДВ и проведение полевых работ позволили уточнить ежедневные $F_{общ}$ (Полонский, Остроумова, 2011). Однако интервалы между космическими съемками ДВ были большими. Поэтому ежедневные $F_{общ}$ рассчитывались неточно, что приводило к неточным расчетам ежедневных параметров ВБ за период половодья.

Разными исследователями рассчитывались:

1) слой испарения с водной поверхности ДВ рассчитывался с использованием метеорологических данных по формулам, разработанным для водоемов, расположенных на равнинной территории (Кузнецов и др., 1969; Браславский, 1986);

2) слой осадков, выпавших на водную поверхность ДВ, рассчитывался с помощью метеоданных по осадкам;

3) слой испарения с суши рассчитывался методом пересчета слоя испарения с водной поверхно-

сти с применением переводных коэффициентов (Гельбух, 1964; Браславский и др., 1973; Дерибизова, 1989).

Только В.С. Рыбаком (1973б) была предпринята попытка рассчитать объем фильтрации воды в грунт в половодье. Однако эта оценка была неточной в связи с тем, что расчет проводился с использованием неточных значений $F_{общ}$, объема воды в деятельном слое грунтов перед началом половодья, полной влагоемкости деятельного слоя грунтов, толщины деятельного слоя грунтов.

В.Ф. Полонский и О.В. Горелиц (2003) разработали методику расчета объемов поверхностных вод, накапливающихся и расходующихся в ДВ за каждый день периода половодья. Объемы воды, накапливающейся и расходующейся в русловой сети (W_p), рассчитывались с использованием площадей заливания русловой сети (F_p), уровней воды в руслах водотоков ($H_Р$). Объемы воды, накапливающейся и расходующейся на межрукавных пространствах (W_n), рассчитывались с использованием площадей заливания межрукавных пространств (F_n), уровней воды на межрукавных пространствах (H_n). Поэтому точность этих расчетов повышалась по мере совершенствования методов расчета H_n и $F_{общ}$ (сумма F_p и F_n). Суточные объемы притока и оттока поверхностных вод в районы и из районов рассчитывались с использованием данных по распределению стока воды по водотокам ДВ, взятых из работы В.Ф. Полонского с соавторами (1998).

Исследования параметров ВБ в половодье не завершены. Получены лишь ориентировочные ежедневные параметры ВБ за некоторые половодья из-за трудностей расчета $F_{общ}$. Особенности ВБ половодий разной водности так и не выявлены в полной мере.

Методы исследований менялись и совершенствовались, поэтому точность полученных разными методами ориентировочных ежедневных параметров ВБ за разные половодья существенно различается. Результаты таких расчетов невозможно анализировать в совокупности. Результатами таких расчетов невозможно будет дополнить будущие исследования, которые охарактеризуются значительно более высокой точностью расчетов. Но благодаря появлению новых технологий и большого количества спутниковых данных разработанные методики можно внедрять в новейшие исследования, получая высокоточные результаты. Вследствие чего остаются нерешенными следующие задачи:

1) рассчитать с хорошей точностью ежедневные параметры ВБ за половодья разной водности (многоводное, маловодное, средневодное), применив высокотехнологичные методы с использованием большого количества космоснимков;

2) выявить пространственно-временные закономерности и отличительные особенности половодий разной водности по ежедневным параметрам ВБ.

Исследования характеристик водного баланса дельты необходимы для оптимального управления ее водным режимом; предупреждения и защиты от наводнений и маловодий; водообеспечения сельского, рыбного, коммунального и промышленного хозяйств.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОЩАДЕЙ ЗАЛИВАНИЯ ТЕРРИТОРИЙ С РАЗЛИЧНЫМИ ЛАНДШАФТАМИ

Работы по оценке площадей заливания территорий с различными ландшафтами проводились многими исследователями (Sun et al., 2012; Feyisa et al., 2014; Катаев, Бекеров, 2017; Xu, 2006; Szabo et al., 2016; Du et al., 2016; Kwang et al., 2017; Buma et al., 2018). Наиболее точные современные методы этих исследований основаны на различии оптических свойств воды и суши. Разработан ряд спектральных индексов для отделения воды от суши на космических снимках высокого разрешения спутников ДЗЗ (McFeeters, 1996; Xu, 2006; Feyisa et al., 2014):

1) Landsat 5-7-8-9 с разрешением 30 м, Sentinel-2 с разрешением 10 и 20 м (спутники с высоким разрешением, получающие изображение дельты Волги, снимки которых есть в свободном доступе);

2) перечисленных здесь https://www.scanex.ru/data/satellites/ (в этом списке есть спутники с очень высоким разрешением (< 10 м), получающие изображение дельты Волги, снимки которых платные дорогостоящие).

Спектрорадиометр MODIS с разрешением 250 м (каналы 1–2), 500 м (каналы 3–7), 1000 м (каналы 8–36) и радиометр VIIRS с разрешением 375 м, 750 м не подойдут для исследования площадей заливания дельты Волги в половодье по причине, изложенной во введении и в разделе “Исследования площадей заливания ДВ в половодье на основе спутниковых данных” (требуются снимки с разрешением < 40 м).

На космоснимках площадь, занятая водой, измеряется в пикселах, которые затем переводятся в км^2. Широкое применение получили Нормализованный Относительный Индекс Воды, Модифицированный Нормализованный Относительный Индекс Воды, Автоматизированный индекс выделения воды (Sun et al., 2012; Feyisa et al., 2014; Xu, 2006; Szabo et al., 2016; Du et al., 2016; Kwang et al., 2017; Buma et al., 2018). Эти индексы эффективно реализуются в программе ENVI.

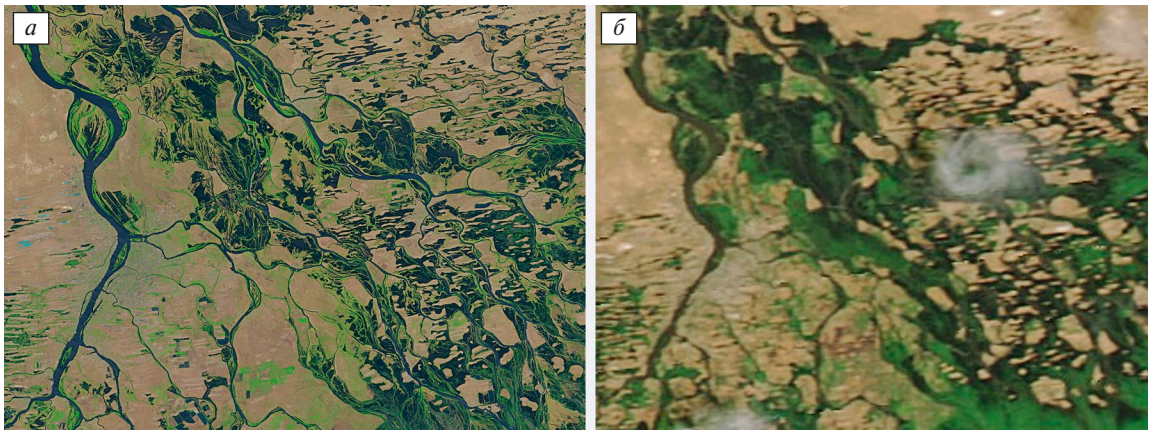

Рис. 4. Снимки половодья в ДВ спутников Landsat-8 (*а*) с разрешением 30 м и MODIS Aqua (*б*) с разрешением 500 м (требуется использование каналов 1–7 для синтеза цветного изображения и расчета спектральных индексов для отделения воды от суши).

Нормализованный Относительный Индекс Воды (Normalized Difference Water Index (*NDWI*)) (McFeeters, 1996) рассчитывается как:

$$NDWI = (Green - NIR)/(Green + NIR).$$

Модифицированный Нормализованный Относительный Индекс Воды (Modified Normalized Difference Water Index (*MNDWI*)) (Xu, 2006) рассчитывается как:

$$MNDWI = (Green - SWIR1)/(Green + SWIR1).$$

Автоматизированный индекс выделения воды (Automated Water Extraction Index (*AWEI*)) (Feyisa et al., 2014) рассчитывается как:

$$AWEI_{nsh} = 4*(Green - SWIR1) - (0.25*NIR + 2.75*SWIR2),$$

$$AWEI_{sh} = Blue + 2.5*Green - 1.5*(NIR + SWIR1) - 0.25*SWIR2,$$

где *Green* – это коэффициент отражения объектом электромагнитного излучения зеленого спектрального канала, *NIR* – это коэффициент отражения объектом излучения ближнего инфракрасного спектрального канала, *Blue* – это коэффициент отражения объектом излучения голубого спектрального канала, *SWIR 1 и SWIR 2* – это коэффициенты отражения объектом излучения коротковолнового инфракрасного спектрального канала с диапазоном длин волн от 1565 до 1655 нм и от 2100 до 2290 нм соответственно.

$AWEI_{nsh}$ разработан для эффективного устранения неводных объектов на космоснимках, включая темные урбанистические объекты. $AWEI_{sh}$ разработан для устранения сильно затененных объектов. Особенности использования двух уравнений *AWEI* для отделения водных объектов от неводных на космоснимках следующие: 1) если тени являются основными источниками потери точности, и отсутствуют поверхности с высоким альбедо, предлагается использовать только один $AWEI_{sh}$; 2) если тени не являются серьезной проблемой, предлагается использовать только один $AWEI_{nsh}$; 3) если поверхности с высоким альбедо, тени и темные неводные объекты присутствуют одновременно, предлагается использовать последовательно два индекса сначала $AWEI_{nsh}$ потом $AWEI_{sh}$; 4) в случаях, когда нет затененных участков, темных неводных объектов и поверхностей с высоким альбедо, предлагается использовать любой из двух индексов.

MNDWI и *AWEI* значительно точней отделяют воду от суши на космоснимках чем *NDWI*, так как *NDWI* забирает в класс воды темные неводные объекты, и *MNDWI,* и *AWEI* точней отделяют от суши растительность, залитую водой, чем *NDWI* (Singh et al., 2015; Szabo et al., 2016; Du et al., 2016; Feyisa et al., 2014).

MNDWI и *AWEI* выделяют воду с высокой точностью (89% ⩽ общая точность ⩽ 99%; 0.87 ⩽ коэффициент Каппа ⩽ 0.99) на космоснимках высокого разрешения (Sun et al., 2012; Feyisa et al., 2014; Катаев, Бекеров, 2017; Xu, 2006; Szabo et al., 2016; Du et al., 2016; Kwang et al., 2017; Buma et al., 2018).

Для *NDWI*, *MNDWI* и *AWEI* установлен порог воды по значениям яркости пикселей на космоснимках равный нулю (McFeeters, 1996; Xu, 2006; Feyisa et al., 2014). Это означает, что водные пиксели имеют значения яркости > 0, а неводные пиксели имеют значения яркости < 0. Однако пороговые значения яркости пикселов на космоснимках, обработанных при помощи водного индекса, меняются в зависимости от места и времени получения изображения. Установленный порог воды необходимо корректировать на фактическом изо-

бражении (Buma et al., 2018). Поэтому Otsu (1987) был разработан алгоритм бинаризации для выбора порога воды, основанный на том, что пиксели на изображении делятся на два класса по интенсивности яркости: вода и не вода. Оптимальный порог, разделяющий два класса, рассчитывается так, чтобы расхождение значений яркости пикселов между классами было максимальным.

Особенностью дистанционного зондирования Земли из космоса является то, что излучение от земной поверхности должно пройти через атмосферу прежде, чем его зафиксируют датчики спутника. Состояние атмосферы влияет на значения яркостей пикселов, регистрируемых съемочной системой, по причине рассеяния и поглощения излучения молекулами газов и аэрозолей, частицами пыли, водяным паром (Кашкин, Сухинин, 2001). Разработаны различные методы атмосферной коррекции космоснимков. Например, алгоритм атмосферной коррекции, созданный на основе атмосферных моделей, позволяет получать наиболее точную информацию о состоянии атмосферы. Этот алгоритм заложен в модуль атмосферной коррекции Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectra Hypercubes (FLAASH) программного комплекса ENVI (Atmospheric Correction Module User's Guide, 2009). Данный алгоритм включает программу по устранению влияния различных атмосферных явлений (водяного пара, кислорода, углекислого газа, метана, озона, рассеивания молекулами аэрозолей и частицами пыли). В этой программе реализовано несколько моделей атмосферы (лето в средних широтах, зима в средних широтах...) и состава аэрозолей (для сельской местности, города, морских территорий), по которым рассчитывается уникальное решение для каждого снимка (Atmospheric Correction Module User's Guide, 2009).

В основе расчета *MNDWI* и *AWEI* лежит способность воды и суши поглощать и отражать электромагнитное излучение *SWIR band* и *Green band*. При хорошей атмосферной видимости (40–100 км), которая является характеристикой прозрачности атмосферы, и отсутствии на космоснимках темных неводных объектов, теней и залитой водой растительности влияние атмосферы на *MNDWI* и *AWEI* незначительное (Gao, 1996; Fraser, Kaufman, 1985). Однако в случаях, когда на космоснимках присутствуют темные неводные объекты, тени и залитая водой растительность, следует выполнить атмосферную коррекцию (Feyisa et al., 2014).

Большое количество космоснимков (достаточно для того, чтобы охватить все основные изменения хода каждой фазы половодья) ДВ появилось после 2013, а до 2013 их было мало (недостаточно для того, чтобы охватить все основные изменения хода каждой фазы половодья), т.к. космическая съемка дельты в то время проводилась редко. Спутники с высоким разрешением, снимки ДВ которых есть в свободном доступе: Landsat-5 (старт: 1984), -7 (старт: 1999), -8 (старт: 2013), -9 (старт: 2021), Sentinel-2 (старт: 2015). В разные годы эти спутники охватывали космической съемкой ДВ с разными интервалами во времени. С 1986 по 2012 ДВ нечасто охватывалась космической съемкой спутников с высоким разрешением (Landsat-5-7). С 2013 ДВ стала чаще охватываться космической съемкой спутников с высоким разрешением (Landsat-7-8), а с 2015 ДВ стала еще чаще охватываться космической съемкой спутников с высоким разрешением (Landsat-7-8-9, Sentinel-2). Архив космоснимков есть на сайтах: https://earthexplorer.usgs.gov/ и https://scihub.copernicus.eu/ или https://www.copernicus.eu.

Площадь ДВ очень велика – составляет 13 916 км^2. Территория ДВ разделена на 16 районов (районирование В.Ф. Полонского (2003)) (рис. 3). В период 2013-2016 более чем по 50% районов есть много космоснимков высокого разрешения, безоблачных, качественных. После 2017 года по большинству районов есть много космоснимков высокого разрешения, безоблачных, качественных. С запуском спутника Landsat-9 в 2021 г. дельта стала почти полностью охватываться очень частой космической съемкой высокого разрешения.

Как могут быть решены проблемы определения водного зеркала под пологом высокостебельной растительности авандельты – вопрос, нерешенный на сегодня. Однако можно попробовать использовать следующие спектральные индексы: индекс содержания влаги в листьях (Hunt, Rock, 1989) – *LWCI* (Leaf Water Content Index) = $-\ln(1-(NIR-MIR_1)/255)$ и нормализованный относительный индекс растительности (Rouse et al., 1973) – *NDVI* (Normalized Difference Vegetation Index) = $(NIR-Red)/(NIR+Red)$, где NIR – это значение отражения объектом излучения ближнего инфракрасного спектрального канала, Red – красного спектрального канала, MIR_1 – среднего инфракрасного спектрального канала. Растительность на суше и островах авандельты и растительность, растущая из воды, будут различаться по этим двум показателям (Пахучий, Пахучая, 2014; Елсаков и др., 2006).

Выводы

Из вышеизложенного анализа методов расчета площадей заливания территорий следует, что эти методы могут использоваться для дельты Волги (ДВ). При этом нужно учитывать то, что в период половодья в ДВ появляются и исчезают водотоки, наполняются и усыхают ерики, среди которых много мелких водотоков и ериков. Все это можно определять только по снимкам высокого разре-

шения (не менее 40 м). При оптических условиях, характерных для периода половодья в дельте Волги, следует использовать любой из двух индексов: *MNDWI* или $AWEI_{nsh}$ (Feyisa et al., 2014; Buma et al., 2018; Xu, 2006). В районах дельты Волги, в которых встречаются крупные городские объекты, лучше использовать $AWEI_{nsh}$ (Feyisa et al., 2014). Высокая точность этих методов оценена на разных водных объектах, включая водные объекты, характерные для дельты Волги (Sun et al., 2012; Feyisa et al., 2014; Катаев, Бекеров, 2017; Xu, 2006; Szabo et al., 2016; Du et al., 2016; Kwang et al., 2017; Buma et al., 2018).

ЛЮБОПЫТНЫЕ И СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОЩАДЕЙ ЗАЛИВАНИЯ ДЕЛЬТЫ ВОЛГИ

А.А. Бубер и др. (2017) описали и применили в своей работе гидродинамическую модель (ГМ) ДВ. Методом гидродинамического моделирования определяются характеристики динамики потока в дельте (распределение расходов воды по рукавам, уровни и уклоны воды, направления и скорости течения). Входные параметры ГМ: ширина и длина русел рукавов, рельеф, уровни и расходы воды (Бубер и др., 2017). Цифровые модели рельефа высокой точности, которые могут быть использованы для моделирования процессов заливания ДВ, отсутствуют в открытом доступе. Поэтому рельеф определялся по результатам оцифровки топографических карт, батиметрия русел – по лоциям, морским навигационным картам, специальным планам русел. ГМ не исключает влияние возможных ошибок при подборе и применении коэффициентов шероховатости, в воспроизведении рельефа, не учитывает транспорт наносов и переформирования рельефа дна. ГМ позволяет определять характеристики динамики потока в водотоках дельты для того, чтобы обосновать мероприятия, необходимые для обводнения нерестилищ дельты Волги (Бубер и др., 2017).

М.В. Болгов и др. (2014) разработали гидродинамическую модель (ГМ) Нижней Волги на базе голландского программного обеспечения (SOBEK-Rural, 2004). Структура ГМ охватывает территорию от плотины Волжской ГЭС до побережья Каспийского моря. ГМ включает все основные рукава рек Волги и Ахтубы, протоки Волго-Ахтубинской поймы (ВАП) и ДВ, шириной в межень > 20 м, и гидротехнические сооружения. На пойменных участках введены емкости, накапливающие и расходующие воду на подъеме и спаде половодья. В ГМ есть верхний граничный участок водоподачи в створе Волжской ГЭС с заданными расходами воды. В ГМ есть > 60 граничных участков водоотдачи с заданными уровнями воды – вытекание воды из ДВ в Каспийское море по сети водотоков. ГМ может применяться для лет с разной водностью. ГМ создана на основе космических снимков бассейна Нижней Волги, топографических карт, лоцманских карт с учетом всех характерных точек русел (перегибов, разветвлений, островов). Выбраны расчетные участки, определены необходимые для расчетов поперечные сечения (646 створов), глубина и ширина русел, площади сечения. Положение расчетных 535 створов выбиралось с учетом особенностей гидрографической сети. ГМ последовательно обрабатывает 7035 участков русел. Характеристики поперечных сечений (ширина, глубина, высотные отметки) определялись по экспедиционным материалам, по лоцманским картам, по топографическим картам. ГМ рассчитывает уровни воды, глубины, величины превышения уровня воды над поверхностным уровнем бровки русла в расчетных точках, скорости течения и расходы воды во всех участках гидрографической сети. Результаты расчетов сопоставлены с гидрологическими измерениями в ДВ в период экспедиционных работ. В ГМ используются осредненные коэффициенты гидравлических сопротивлений на основных участках русел. Наибольшее разнообразие их значений наблюдается в ДВ. Для высоких уровней воды в используемые коэффициенты необходимо вводить поправки. В ГМ используется обобщенный уклон трения, характеризующий все силы сопротивления и пропускную способность русла в районе измерений. Контуры затопления ВАП и ДВ в половодье наносятся на расчетную сетку по данным спутниковых снимков. Имеются трудности в оценке достоверности характеристик поперечных сечений (есть потери точности). Требуются высокоточные цифровые модели рельефа, которых нет в свободном доступе. Имеются трудности учета особенностей водообмена в районе Западных ильменей в половодье (есть потери точности) (Болгов и др., 2014).

ГМ позволяет определять характеристики динамики потока в водотоках ВАП и ДВ для того, чтобы эффективно и рационально управлять водными ресурсами ВАП и ДВ. ГМ позволяет рассчитать любой заданный вариант пространственно-временного распределения стока в пределах ВАП и ДВ с удовлетворительной точностью. Несмотря на существующие сложности, ГМ пригодна для прогностических вычислений уровней воды в ВАП и ДВ по заданным расходам воды в створе Волжской ГЭС в межень и в половодье (Болгов и др., 2014).

В.Н. Орлянкин и А.Р. Алешина (2019) для определения границ и глубин затопления речных пойм в половодье или в паводок использовали цифровую модель рельефа (ЦМР) SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), созданную на основе радиолокационной съемки с космического аппарата. ЦМР

SRTM, находящаяся в открытом доступе, имеет разрешение 90 м, линейную абсолютную ошибку по высоте менее 16 м, линейную относительную ошибку по высоте менее 10 м (Farr et al., 2007). Осредненные ошибки высот ЦМР SRTM на равнинной местности 2.8 м, на холмистой местности 5.4 м. Плотная застройка городов и промышленных зон, сомкнутые кроны древесно-кустарниковой растительности, горный рельеф приводят к ошибкам отображения рельефа местности на ЦМР SRTM (Орлянкин, Алешина, 2019). Поэтому исследование проводилось на безлесных незастроенных территориях с крутизной склонов менее 10‰. В работе составлены карты границ и глубин паводкового затопления в речной долине на открытых незастроенных территориях поймы, не покрытых густой древесной и кустарниковой растительностью вне речных русел, старичных озер, оврагов, в удалении от пойменных бровок и от крутых уступов надпойменных террас. Исследуемые участки: долина р. Москва в районе г. Жуковский и г. Раменское и долины р. Москва и р. Ока в районе г. Коломна. На исследуемых участках ЦМР SRTM имеет ошибку по высоте 4 м. С помощью топографической карты масштаба 1:50000 ЦМР SRTM была скорректирована, и ошибки по высоте составили от 2.6 м до 4 м в зависимости от участка. По данным г/п или с использованием полуэмперической формулы расчета наивысшего уровня воды определялись максимальные уровни воды в пик половодья или паводка. Затем по высотным отметкам массива точек скорректированной ЦМР SRTM определялись глубины затопления. Затем по долине р. Москва в районе г. Жуковский и г. Раменское и по долинам р. Москва и р. Ока в районе г. Коломна были составлены (Орлянкин, Алешина, 2019):

• карты границ и глубин затопления в половодье или в паводок;

• карты объектов инженерной защиты от затопления.

ЦМР SRTM, находящаяся в открытом доступе, нуждаются в корректировке ошибок высотных отметок массива точек. Скорректированные ЦМР SRTM могут применяться для составления карты границ и глубин паводкового затопления в речных долинах на открытых незастроенных территориях поймы, не покрытых густой древесной и кустарниковой растительностью вне речных русел, старичных озер, оврагов, в удалении от пойменных бровок и от крутых уступов надпойменных террас (следует учитывать, что ошибки по высоте могут составлять от 2.6 до 4 м). Следует учитывать, что ЦМР SRTM имеет погрешность привязки к геодезической сети (круговая абсолютная ошибка в плане менее 20 м, круговая относительная ошибка в плане меньше 15 м), поэтому в горных и холмистых районах ошибки высотных отметок массива точек могут быть большие (Farr et al., 2007). Использование ЦМР SRTM для инженерных изысканий, требующих высокую точность измерений, не рекомендуется (Орлянкин, Алешина, 2019).

Радарные данные (например Sentinel-1 от Copernicus Open Access: https://www.copernicus.eu/) могут применяться для определения площадей заливания территорий в любую погоду, в любое время суток, при любой атмосферной видимости и обладают следующими особенностями:

• эффективны для обнаружения спокойной, гладкой поверхности воды;

• вода под растительностью, почвы с высокой влажностью, взволнованная поверхность воды, городские застройки имеют сходные значения яркостей пикселов, что искажает реальную картину затопления территории (Родионова, 2017; Винокурова, Чермошенцев, 2020).

Поэтому при использовании радарных данных для определения площади заливания территории следует подбирать такие районы исследования, в которых нет явлений и объектов, искажающих реальную картину затопления (Родионова, 2017; Винокурова, Чермошенцев, 2020). Вся ДВ в период половодья не является таким районом исследования и подобных работ по ДВ не проводилось.

О.В. Горелиц и И.В. Землянов (2005) провели наблюдения заливания дельты Волги в половодья 2002 и 2003 гг. с использованием спутника MODIS с разрешением 250 м (спектральные каналы 1–2), 500 м (спектральные каналы 3–7), 1000 м (спектральные каналы 8–36). В работе осуществлялись совместное использование и анализ ежедневных снимков спутника MODIS и ежедневных данных гидрометеорологических наблюдений (г/п и м/п) сети станций Росгидромета. Синтез спектральных каналов 1, 2 и 4 применялся для получения цветных изображений ДВ в период половодья. Гидрометеорологические данные: сбросы Волжской ГЭС, расходы и уровни воды на гидрологических постах, расположенных в ДВ, данные метеонаблюдений на метеостанциях ДВ Астрахань и Зеленга. По полевым данным г/п Верхнее Лебяжье в вершине ДВ были определены по половодьям 2002, 2003 и осредненным половодьям периода 1961–2001: даты начала, пика, окончания половодий с указанием $H_Р$ на г/п; продолжительность половодий; изменение и скорость роста (см/день) $H_Р$ на г/п за периоды подъема и спада половодий. ДВ была разделена на 3 зоны – верхнюю, среднюю и нижнюю. По данным среднего разрешения спутника MODIS ход половодий 2002 и 2003 был охарактеризован в общих чертах во всех 3 зонах. Были определены периоды с указанием $H_Р$ на г/п

Верхнее Лебяжье, при которых они наступают: выхода воды за пределы русел, интенсивного роста заливания ДВ, пика половодья, интенсивного спада половодья с указанием основных водотоков ДВ, по которым распространяется вода, и участков наибольшего заливания. В работе отмечено, что бурный рост растительности затрудняет наблюдать ход половодья в ДВ по данным среднего разрешения. Получены площади заливания верхней и средней зон ДВ на пиках половодий 2002 и 2003 (в даты пика половодий) (Горелиц, Землянов, 2005). Нет таких картографических данных и аэрофотографий, по которым можно было бы проверить точность полученных площадей заливания всей верхней и всей средней зон ДВ. Есть космоснимки высокого разрешения, которых нет в свободном доступе за даты пика половодий 2002 и 2003. Поэтому точность расчета не проверена. Была ли точно увидена на снимках среднего разрешения визуально вся площадь заливания двух огромных зон ДВ с очень сложной гидрографической сетью и разнообразными ландшафтами с богатой растительностью и верно рассчитана по измерительной сетке, наложенный на спутниковое изображение – неизвестно.

М.В. Болгов и др. (2017) в своей работе описали водно-экологические проблемы ДВ. Волжско-Камский каскад водохранилищ и гидроэлектростанций (ВКК) (регулирует режим стока р. Волги с 1961) в Волжском речном бассейне создает недостаточное обводнение ДВ: не обеспечивается необходимая для рыбного и сельского хозяйства продолжительность затопления; в маловодные годы складываются особенно неблагоприятные условия для рыбного хозяйства; не полностью обеспечиваются судоходные глубины. В многоводные половодья в ДВ создается угроза затоплений, подтоплений, прорыва дамб, размыва дорог, размыва и обрушения береговых склонов (требуется немало дорогостоящих берегоукрепительных работ). Активная деятельность ВКК привела к деградации Западных подстепных ильменей. Ильмени усыхают и давно потеряли рыбопромысловое значение. В периоды маловодья наблюдается дефицит воды для питьевого и технического водоснабжения, орошения. Необходима реконструкция существующих насосных станций и трактов водоподачи. Водно-экологические проблемы ДВ обусловлены природными условиями региона, несоответствием использования водных объектов экологическим требованиям (Болгов и др., 2017).

Волго-Ахтубинская пойма простирается от г. Волгограда до г. Астрахани, сливаясь с верхней зоной ДВ (рис. 5). М.В. Болгов и др. (2017) по данным г/п г. Волгоград (в створе р. Волги в г. Волгоград) в естественных (1881-1957) и зарегулированных (1961-2012) условиях получили: многолетнюю изменчивость годового стока воды; многолетние характеристики годовых объемов стока воды; многолетние характеристики среднегодовых расходов воды; внутригодовое распределение стока по сезонам; основные параметры гидрологического режима (продолжительность половодья и его фаз; даты наступления половодья и его фаз; уровни воды, расходы воды, температура воды в половодье).

Рис. 5. Волго-Ахтубинская пойма и ДВ на снимке спутника Envisat.

М.В. Болгов и др. (2017) выявили:

1) какие существенные изменения рассматриваемых параметров, которые во многом определяют состояние экосистем Волго-Ахтубинской поймы и ДВ, произошли в зарегулированных условиях р. Волги по сравнению с естественными условиями;

2) как активная эксплуатация Волжской ГЭС, приведшая к интенсивному размыву русла в ее нижнем бьефе, отразилась на режиме уровней воды в створе г. Волгоград.

А.С. Тертычная и др. (2023) разработали метод определения площадей заливания Волго-Ахтубинской поймы (ВАП) с использование спутниковых снимков высокого разрешения Landsat-7 (30 м). Они предложили использовать 4 ближний инфракрасный спектральный канал Landsat-7 с длиной волны 0.78–0.90 мкм (*NIR 4*), 5 коротковолновый инфракрасный спектральный канал Landsat-7 с длиной волны 1.55–1.75 мкм (*SWIR 5*), нормализованный относительный индекс растительности (Rouse et al., 1973) – *NDVI* (Normalized Difference Vegetation Index) = (*NIR* – *Red*) / (*NIR* + *Red*). Сначала нужно разделить ВАП на зоны по гидролого-морфологическим признакам. Затем синтезировать спектральные каналы Landsat-7 для получения цветных изображений зон ВАП. Далее с использованием цветных изображений, на которых можно четко различать воду и сушу, и *NDVI* нужно подбирать критические значения яркостей пикселов, меньше которых пикселы являются водой, одновременно в *NIR 4* и *SWIR 5* для каждой зоны ВАП (Тертычная и др., 2023). Проведен математический анализ выбора критических значений яркостей пикселов. Точность метода определения площадей заливания в данной работе не проверена.

С.С. Шинкаренко и др. (2023) определяли площади заливания ВАП и ДВ по данным информационного продукта Global Surface Water (GSW), использующего данные ДЗЗ Landsat-5-7-8 за 1984–2021 гг. (Pekel et al., 2016). GSW создает ежегодные и ежемесячные карты водной поверхности земли. Ошибки составляют от 0.3 до 1.5 % для сезонных и постоянных площадей водоемов (Pekel et al., 2016). GSW не учитывает воду под растительностью (Шинкаренко и др., 2023). С.С. Шинкаренко и др. (2023) корректировали карты GSW по данным максимальных расходов воды и сбросов воды за половодье, забирая в залитые участки околоводную растительность, залитую водой. Определение воды под растительностью представляет большую сложность на некоторых участках ВАП и ДВ (Шинкаренко и др., 2023). В работе определены за период 2000–2021:

• осредненные площади максимального заливания участков ВАП и ДВ;

• многолетняя динамика гидрологических характеристик и площадей заливания ВАП и ДВ.

В работе выявлено:

1) коэффициент корреляции (*r*), характеризующий связь максимальных расходов воды и сбросов воды за половодье в створе Волгоградского гидроузла (ВГУ) и площадей заливания ВАП и ДВ (без западных и восточных подстепных ильменей, где *r* ниже) за период 2000–2021 на разных участках составил от 0.70 до 0.78 ($P < 0.001$);

2) *r*, характеризующий связь максимальных уровней воды на г/п Астрахань и площадей заливания ДВ за период 2015–2022 составил 0.93 ($P < 0.05$) (*r* рассчитывались и по другим г/п);

3) связь максимальных расходов воды и сбросов воды в створе ВГУ за период пика половодья и площадей заливания ВАП и ДВ очень тесная (коэффициент детерминации составил от 0.94 до 0.98).

С.С. Шинкаренко и др. (2023) выявили, что к 2022 году экологические проблемы ВАП и ДВ остались не решенными:

1) Волжско-Камский каскад водохранилищ и гидроэлектростанций в Волжском речном бассейне создает недостаточное обводнение ВАП и ДВ (подтверждает работу М.В. Болгова и др., (2017));

2) антропогенные преобразования (строительство дамб, обвалование территорий) нарушают естественный процесс заливания ВАП и ДВ;

3) сокращение площади озер-ильменей в ДВ и в связи с этим деградация ильменно-бугрового района ДВ;

4) малая повторяемость половодий с максимальным расходом в створе ВГУ более 27-28 тыс. $м^3/с$.

С.С. Шинкаренко и др. (2021) определяли по спутниковым данным Landsat площади водоемов, пересохших водоемов, солончаков в районе Западных подстепных ильменей (ЗПИ) ДВ в периоды летне-осенней межени с 1977 по 2020. Они составили карту-схему и построили графики изменения площадей ильменей в ЗПИ за период 1990–2020. Они выявили:

1) после 1991 в среднем ежегодно пересыхало более 10 водоемов;

2) площадь водного зеркала ЗПИ в 2020 сократилась на 40 % по сравнению с 1991;

3) среднемноголетняя площадь водоемов в ЗПИ с 2010 по 2020 сократилась на 135 $км^2$ по сравнению с периодом 1985–1995 или на 30% от величины периода 1985–1995, что связано с уменьшением максимальных расходов половодий, длительности половодий и периодов пика половодий;

4) в период 1985–1995 среднемноголетний максимальный расход в створе ВГУ составлял 27.9 тыс. м^3, в период 2010–2020 – 25 тыс. м^3;

5) *r*, характеризующий связь площадей заливания ЗПИ с максимальными половодными расходами ВГУ в период с 2010 по 2020 составил 0.93 ($P < 0.05$).

Все это привело к деградации ЗПИ, они практически потеряли свое значение для естественного воспроизводства рыб. В западной части ЗПИ происходит пересыхание ильменей, превращение их в солончаки (Шинкаренко и др., 2021).

Снижение водности и продолжительности половодий на Нижней Волге в период 2010–2020 связано с климатическими факторами (частые зимние оттепели, недостаточное промерзание почвы, сезонное перераспределение осадков) и антропогенными факторами (зарегулирование стока р. Волги, несоблюдение рекомендаций по организации весенних попусков через каскад плотин) (Шинкаренко и др., 2021).

Выводы

В первой четверти 21 века были проведены следующие исследования ДВ. Разработаны гидродинамические модели ДВ, созданные на основе космических снимков, топографических карт, лоцманских карт. ГМ не исключают влияние возможных ошибок при подборе и применении коэффициентов шероховатости, в воспроизведении рельефа, не учитывают транспорт наносов и переформирование рельефа дна. ГМ позволяют определять характеристики динамики потока в водотоках дельты с удовлетворительной точностью (Болгов и др., 2014; Бубер и др., 2017).

О.В. Горелиц и И.В. Землянов (2005) по данным среднего разрешения спутника MODIS исследовали ход половодий 2002 и 2003 в ДВ. Были определены периоды выхода воды за пределы русел, интенсивного роста заливания ДВ, пика половодья, интенсивного спада половодья с указанием участков наибольшего заливания. Были получены площади заливания верхней и средней зон ДВ на пиках половодий 2002 и 2003. Затруднительно наблюдать ход половодья в ДВ по данным среднего разрешения, поэтому высокая точность расчетов не была достигнута.

М.В. Болгов и др. (2017) описали водно-экологические проблемы ДВ: снижение водности половодий, вызванное зарегулированием стока р. Волги, отрицательно сказывается на экологии, рыбном, сельском, коммунальном хозяйствах; угрозы затопления в многоводье. Было выявлено по данным г/п г. Волгоград в вершине ВАП какие существенные изменения гидрологических параметров (уровни воды, температура воды, объемы стока воды, расходы воды, характеристики половодий и их фаз) произошли в зарегулированных условиях р. Волги по сравнению с естественными условиями.

С.С. Шинкаренко и др. (2021) определяли по данным ДЗЗ Landsat площади водоемов, пересохших водоемов, солончаков в ЗПИ ДВ в периоды летне-осенней межени. Они составили карту-схему и построили графики изменения площадей ильменей в ЗПИ за период 1990–2020. Они определили: на сколько сократилась площадь водного зеркала ЗПИ в 2020 по сравнению с 1991, какие ильмени пересыхали после 1991, как изменилась среднемноголетняя площадь водоемов ЗПИ, как изменился среднемноголетний максимальный расход в створе ВГУ, корреляционную связь максимальных половодных расходов ВГУ в период 2010–2020 и площадей заливания ЗПИ (тесная). В работе выявлено, что ЗПИ деградирует из-за снижения водности и продолжительности половодий на Нижней Волге в период 2010–2020.

С.С. Шинкаренко и др. (2023) определяли площади заливания ДВ по скорректированным ими данным ресурса GSW, использующего данные ДЗЗ Landsat (в случае ДВ нуждаются в корректировке). В работе определены за период 2000–2021 многолетняя динамика гидрологических характеристик и площадей заливания ДВ, осредненные площади максимального заливания районов ДВ, корреляционная связь гидрологических параметров и площадей заливания ДВ (тесная). В работе выявлено, что к 2022 экологические проблемы ДВ, описанные М.В. Болговым и др. (2017), остались не решенными.

Экологические проблемы в ДВ остаются не решенными. Поэтому важно: исследовать процессы заливания ДВ и их тенденции в половодье и в межень в будущие года; предлагать наиболее оптимизированные мероприятия, улучшающие обводнение ДВ. В ДВ есть районы, исследование которых в половодье представляет большую сложность (вода под густой растительностью), есть районы, исследование которых в половодье представляет среднюю сложность (вода под растительностью средней густоты). Существующие методы исследования таких районов ДВ нуждаются в совершенствовании. Следует внедрять в дальнейшем в исследования заливания ДВ ЦМР высокой точности или точности около высокой, стремиться создавать такие ЦМР, используя современные данные ДЗЗ и современные технологии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарна Полонскому Вадиму Федоровичу за руководство и поддержку на разных этапах работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Албул И.П. Применение формулы ГГИ для расчета испарения с водной поверхности при различном составе исходной информации // Вестник СПбГУ. 2012. Вып. 3. С. 125–136.

Байдин С.С. Линдберг Ф.Н. Самойлов И.В. Гидрология дельты Волги. Л.: Гидрометеоиздат, 1956. 331 с.

Байдин С.С. Процессы дельтообразования и гидрографическая сеть дельты Волги // Труды ГОИН. 1959. Вып. 45. С. 5–51.

Байдин С.С. Сток и уровни дельты Волги. М.: Гидрометеоиздат, 1962. 337 с.

Байдин С.С. О заливаемости дельты Волги в условиях зарегулированного стока // Труды ГОИН. 1967. Вып. 89. С. 67–71.

Байдин С.С. Основы методов расчета заливаемости дельт рек водами половодья // Труды ГОИН. 1991. Вып. 198. С. 47–63.

Бармин А.Н. Волго-Ахтубинская пойма и дельта реки Волги: динамика травянистого растительного покрова в меняющихся природных и антропогенных условиях. Дис. докт. геогр. наук. Волгоград, 2002. 306 с.

Болгов М.В., Шаталова К.Ю., Горелиц О.В., Землянов И.В. Водно-экологические проблемы Волго-Ахтубинской поймы // Экосистемы: экология и динамика. 2017. Т. 1. № 3. С. 15–37.

Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Шаталова К.Ю. Компьютерная гидродинамическая модель Нижней Волги // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 1. С. 10–23.

Браславский А.П. Усовершенствованная формула для расчета испарения с поверхности водных объектов // Тез. докл. V Всеооюз. гидрол. съезда. Секция озер и водохранилищ. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. С. 35–36.

Браславский А.П., Остроумова Л.П. Расчет испарения воды с поверхности оз. Балхаш // Труды КазНИГМИ. 1988. Вып. 101. С. 52–78.

Браславский А.П., Остроумова Л.П. Оценка точности современных формул, предложенных для расчета слоя испарения с поверхности водных объектов // Труды КазНИГМИ. 1991. Вып. 107. С. 16–45.

Браславский А.П., Шергина К.Б., Гураева В.Ф. Исследование суммарного испарения с зарослей тростника // Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства. 1973. Вып. 10. С. 132–142.

Брумштейн Ю.М., Плужникова Е.Н., Неживая Ю.Н., Серкалиева Д.Е., Водопьянов А.Е. Паводок в дельтовых районах Астраханской области: взгляд с позиций сельских жителей // Астраханский вестник экологического образования. 2013. № 2(24). С. 147–151.

Бубер А.А., Бородычев В.В., Талызов А.А. Разработка гидродинамической модели дельты реки Волги и Западных подстепных ильменей // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2017. № 2(46). С. 271–283.

Бухарицин П.И., Полонский В.Ф., Остроумова Л.П. Устойчивое водообеспечение Западных подстепных ильменей дельты Волги. Beau Bassin: Lambert academic publishing, 2017. 127 с.

Валов М.В., Бармин А.Н. Современные тенденции изменения гидрологических условий в дельте реки Волги // Международная научно-практическая конференция “Региональные проблемы водопользования в изменяющихся климатических условиях”. Уфа, 2014. С. 96–99.

Васильченко О.М., Чавычалова Н.И., Пономарев С.В. Влияние объема стока и режима половодья на качественные характеристики молоди леща в восточных и западных частях дельты реки Волги // Вестник АГТУ. Сер. Рыбное хозяйство. 2019. № 2. С. 22–32.

Винокурова А.Г., Чермошенцев А.Ю. Определение зон паводкового подтопления по данным радиолокационной съемки со спутника Sentinel-1 // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2020. С. 67–72.

Гельбух Т.М. Суммарное испарение с зарослей тростника в зоне недостаточного увлажнения // Труды ГГИ. 1964. Вып. 92.

Гинзбург А.И., Костяной А.Г. Тенденции изменений гидрометеорологических параметров Каспийского моря в современный период (1990-е – 2017 гг.) // Соврем. пробл. ДЗЗ из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 195–207.

Голубев В.С., Федорова Т.Г. Методы измерения и расчета испарения с водной поверхности // Методы изучения и расчета водного баланса. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. С. 249–265.

Горелиц О.В., Землянов И.В. Исследование сезонных процессов в устьевой области Волги с использованием данных дистанционного зондирования // Водные рес. 2005. Т. 32. № 3. С. 261–273.

Горелиц О.В., Полонский В.Ф. Заливание дельты Волги и влияние на него изменений уровня Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 1997. № 10. С. 85–97.

Дерибизова С.Б. Гидрологические и водохозяйственные аспекты Или-Балхашской проблемы // Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 310 с.

Евдокимов С.И., Михалап С.Г. Определение физического смысла комбинации каналов снимков Landsat для мониторинга состояния наземных и водных экосистем // Вестник Псковского государственного университета. 2015. № 7. С. 21–32.

Елисеева И.И. Статистика: учебник для академического бакалавриата. М.: Изд. Юрайт, 2014. 674 с.

Елсаков В.В., Плюснин С.Н., Щанов В.М. Технологии дистанционного зондирования в исследовании свойств растительных сообществ бассейна р. Новая Нерута // Вестник Инст. биолог. Коми НЦ УрО РАН. 2006. № 2(100). С. 315–319.

Занозин В.В. Морфологическая структура ландшафтов Астраханской области как основа развития рекреационной деятельности // Южно-Росс. вест. геол., геогр. и глобальн. энерг. 2003. № 2. С. 51–54.

Катаев М.Ю., Бекеров А.А. Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям // Доклады ТУСУР. 2017. Т. 20. № 4. С. 105–108.

Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М.: Логос, 2001. 264 с.

Кузин В.Н. Гидрогеологический очерк дельты Волги // Труды ГОИН. 1951. Вып. 18 (30). С. 249–276.

Кузин П.С. Потери стока Волги в районе Волго-Ахтубинской поймы и дельты // Метеорология и гидрология. 1939. № 9. С. 80–85.

Кузнецов В.И., Голубев В.С., Федорова Т.Г. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 85 с.

Михайлов В.Н., Коротаев В.Н., Полонский В.Ф. и др. Гидролого-морфологические процессы в устьевой области Волги и их изменения под влиянием колебаний уровня Каспийского моря // Геоморфология. 1993. № 4. С. 97–107.

Орлянкин В.Н., Алешина А.Р. Использование матриц высот SRTM в предварительных расчетах и картографировании глубин потенциального паводкового затопления речных пойм // Исследование Земли из космоса. 2019. № 5. С. 72–81.

Остроумова Л.П. Расчет испарения с водной поверхности // Актуальные проблемы гидрометеорологии озера Балхаш и Прибалхашья. СПб.: Гидрометеоиздат, 1995. С. 24–36.

Остроумова Л.П. Расчет испарения с поверхности водных объектов в устьевых областях рек южных морей России // Метеорология и гидрология. 2004. № 9. С. 81–96.

Остроумова Л.П., Михайлова В.Я. К расчету испарения с поверхности Краснодарского водохранилища // Труды ГОИН. 2008. № 211. С. 249–272.

Остроумова Л.П., Фалеева О.С. Оценка потерь воды на испарение с водной поверхности в устьевой области Волги // Труды ГОИН. 2007. № 210. С. 285–299.

Пахучий В.В., Пахучая Л.М. Опыт использования вегетационных индексов при комплексных исследованиях на объектах гидролесомелиорации // Вест. Поволж. гос. тех. универ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2014. № 1(21). С. 33–41.

Подоляко С.А. Об урожайности молоди некоторых видов рыб дельты Волги в полоях Астраханского государственного заповедника в 2012–2013 годах // Астр. вест. экол. образ. 2014. № 2(28). С. 52–55.

Полонский В.Ф. Ландшафтное районирование дельты Волги с учетом ее хозяйственной освоенности и характера затопления в половодье // Тезисы докладов Всероссийского конгресса работников водного хозяйства. Москва, 2003. С. 209–210.

Полонский В.Ф., Горелиц О.В. Оценка регулирующей роли дельты Волги при пропуске половодья // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. С. 65–77.

Полонский В.Ф., Лупачев Ю.В., Скриптунов Н.А. Гидрологоморфологические процессы в устьях рек и методы их расчета (прогноза). Спб.: Гидрометеоиздат, 1992. 383 с.

Полонский В.Ф., Михайлов В.Н., Скриптунов Н.А. и др. Устьевая область Волги: гидролого-морфологические процессы, режим загрязняющих веществ и влияние колебаний уровня Каспийского моря. М.: ГЕОС, 1998. 280 с.

Полонский В.Ф., Остроумова Л.П. Новая водно-балансовая модель дельты Волги, как средство для оптимального управления ее водным режимом // Экологические системы и приборы. 2005. № 12. С. 37–48.

Полонский В.Ф., Остроумова Л.П. Изучение параметров затопления дельты Волги и ее водно-балансовое моделирование // Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции “Водные ресурсы Волги: настоящее и будущее, проблемы управления”. Астрахань, 2008. С. 263–273.

Полонский В.Ф., Остроумова Л.П. Гидрологические основы водообеспечения западных подстепных ильменей в дельте Волги при различных гидрографах половодья // Сборник докладов конференции “Управление водно-ресурсными системами в экстремальных условиях”. Москва, 2009. С. 52–56.

Полонский В.Ф., Остроумова Л.П. Исследование процессов затопления, расчет и оценка изменений составляющих водного баланса дельты Волги в половодье // Материалы международной научной конференции “Изменение климата и водного баланса Каспийского региона”. Астрахань, 2011. С. 119–127.

Полонский В.Ф., Остроумова Л.П., Бухарицин П.И., Синенко Л.Г. Водообеспечение западных подстепных ильменей дельты Волги в условиях изменяющегося объема речного стока и возрастающего антропогенного воздействия на экосистему // Проблемы и перспективы современной науки: сб. науч. тр. Томск, 2009. Т. 2. № 1. С. 71–76.

Роде А.А. Основы учения о почвенной влаге. Л.: Гидрометеоиздат, 1965. 952 с.

Родионова Н.В. Анализ изображений Sentinel 1 для весеннего паводка в Алтайском крае в апреле 2015 г. и Рязанской области в апреле 2016 г. // Совр. пробл. ДЗЗ из косм. 2017. Т. 14. № 1. С. 136–146.

Рыбак В.С. О возможном заливании дельты Волги при работе вододелителя // Труды ГОИН. 1973а. Вып. 116. С. 104–112.

Рыбак В.С. Потери стока воды в Волго-Ахтубинской пойме и в дельте Волги // Труды ГОИН. 1973б. Вып. 116. С. 82–96.

Тертычная А.С., Тертычный К.С., Хоперсков А.В. Метод определения береговых линий водных объектов на основе обработки данных дистанционного зондирования Landsat ETM // Соврем. пробл. ДЗЗ из косм. 2023. Т. 20. № 5. С. 28–38.

Цыценко К.В., Шалыгин А.Л. Оценка заливаемости дельты Волги в современных условиях // Метеорология и гидрология. 2002. № 2. С. 80–87.

Цыценко К.В., Шалыгин А.Л. Оценка заливаемости дельты Волги с использованием спутниковой информации // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. С. 78–86.

Шикломанов И.А. Гидрологические аспекты проблемы Каспийского моря. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 77 с.

Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Берденгалиева А.Н., Выприцкий А.А. Динамика площадей водоемов Западного ильменно-бугрового района дельты Волги // Совр. пробл. ДЗЗ из косм. 2021. Т. 18. № 4. С. 285–290.

Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Богодухов М.А., Ворушилов И.И., Сайгин И.А. Классификация пойменных земель Нижней Волги на основе многолетних данных дистанционного зондирования и гидрологической информации // Совр. пробл. ДЗЗ из косм. 2023. Т. 20. № 3. С. 119–135.

Шумова Н.А. Изменение экологически значимых параметров гидрологического режима Нижней Волги при зарегулировании стока // Аридные экосистемы. 2014. Т. 20. № 3(60). С. 33–47.

Biuta W.G., Lee L.I., Seo J.Y. Recent surface water extent of Lake Chad from multispectral sensors and GRACE // Sensors. 2018. V. 18. P. 1–24.

Dero Q.Y., Yari E., Charrahy Z. Global warming, environmental security and its geo-economic dimensions case study: Caspian Sea level changes on the balance of transit channels // Jour. of Environ. Heal. Sci. and Engin. 2020. V. 18(2).

Du Xiao, Wang Shixin, Zhou Yi et al. Construction and validation of a new model for unified surface water capacity based on MODIS data // Geomatics and Information Science of Wuhan University. 2007. Vol. 32. No. 3. P. 205–208.

Du Y., Zhang Y., Ling F., Wang Q., Li W., Li X. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band // Remote Sensing. 2016. V. 8. P. 1–19.

Farr T.G., Rosen P.A. et al. The Shuttle Radar Topography Mission // Rev. Geophys. 2007. V. 45(2). P. 1–33.

Feyisa G.L., Meilby H., Fensholt R., Proud S.R. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery // Remote Sens. Environ. 2014. V. 140. P. 23–35.

Fraser R.S., Kaufman Y.J. The relative importance of aerosol scattering and absorption in remote sensing // IEEE Geosci. Remote Sens. 1985. V. GE-23. P. 615–633.

Gao B.C. NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sens. Environ. 1996. V. 58. P. 257–266.

Hunt E.R., Rock B.N. Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectances // Remote Sens. of Eviron. 1989. № 30. P. 43–54.

Hunt E.R., Rock B.N., Nobel P.S. Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance // Remote Sensing of Environment. 1987. V. 22(3). P. 429–435.

Kwang C., Jnr E.M.O., Amoah A.S. Comparing of Landsat 8 and Sentinel 2A using water extraction indexes over Volta River // J. Geogr. Geol. 2017. V. 10. P. 1–7.

McFeeters S.K. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features // International Journal of Remote Sensing. 1996. V. 17. P. 1425–1432.

Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // Nature. 2016. V. 540. P. 418–422.

Rouse J., Haas R., Schell J. and Deering D. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS // Third ERTS Symposium, NASA (1973): 309–317.

Schultz G.A. Remote Sensing and GIS from the perspective of hydrological systems and process dynamics // HydroGIS 96: Application of geographic information systems in hydrology and water resourses. IAHS publ. No. 235. 1996. P. 637–647.

Singh K.V., Setia R., Sahoo S., Prasad A., Pateriya B. Evaluation of NDWI and MNDWI for assessment of waterlogging by integrating digital elevation model and groundwater level // Geocarto Int. 2015. V. 30(6). P. 650–661.

Sobek-rural. Delft Hydraulics Software manual. Delft, 2004. 250 p.

Su Z. Remote sensing applied to hydrology: the Sauer river basin study // Proc. Ruhr-Universitat Bochum, Germany. 1996. No. 15. 190 p.

Sun F., Sun W., Chen J., Gong P. Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery // Int. J. Remote Sens. 2012. V. 33. P. 6854–6875.

Szabo S., Gacsi Z., Balazs B. Specific features of NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories // Landsc. & Environ. Ser. 2016. V. 10. P. 194–202.

Xu H. Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // International Journal of Remote Sensing. 2006. V. 27. № 14. P. 3025–3033.

Review of Studies of Flooding Areas and Water Balance in the Volga Delta During Flood Period

N. S. Zilitinkevich[1]

[1]*Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

This review analyzed studies of flooding areas (F_{tot}) and water balance in the Volga delta (WB) during flood periods. The review represents a basis of accumulated knowledge about the characteristics of F_{tot} and WB during flood periods and methods for their study. We have analyzed the advantages and disadvantages of these methods. We have revealed that studies of F_{tot} and WB during flood periods have not been completed; only rough daily F_{tot} and rough daily WB parameters have been obtained for a number of flood periods. Therefore, peculiar features of F_{tot} and WB during flood periods of different water contents have not been fully understood. Research methods have been continuously changing and improving, thus the accuracy of the estimated daily F_{tot} and daily WB parameters obtained by different methods for different flood periods varies significantly. Therefore, the results of such calculations cannot be analyzed in combination. The results of such calculations cannot supplement highly accurate data bases which are going to be obtained in future studies. However, thanks to new technologies and a large amount of satellite data, the previously developed methods can be used in the modern researches to obtain highly accurate results. As a result, we propose the following objectives for future researches: to calculate with high accuracy the daily F_{tot} and daily WB parameters for flood periods of different water contents, using high-technological methods and a large number of satellite images; to identify spatiotemporal patterns and distinctive features of flood periods of different water contents based on daily F_{tot} and daily WB parameters.

Keywords: flood periods, Volga delta, flooding areas, water balance parameters, satellite images

REFERENCES

Albul I.P. Primenenie formuly GGI dlya rascheta ispareniya s vodnoy poverkhnosti pri razlichnom sostave iskhodnoy informatsii [Application of the formula of State Hydrological Institute for calculation of evaporation from the water surface based on different input information] // Vestnik SPbGU. 2012. V. 3. P. 125–136. (In Russian).

Baydin S.S., Lindberg F.N., Samoylov I.V. Gidrologiya del'ty Volgi [Hydrology of the Volga delta]. L.: Gidrometeoizdat, 1956. 331 p. (In Russian).

Baydin S.S. Protsessy del'toobrazovaniya i gidrograficheskaya set' del'ty Volgi [Delta formation and hydrographic network of the Volga delta] // Trudy GOIN. 1959. V. 45. P. 5–51. (In Russian).

Baydin S.S. Stok i urovni del'ty Volgi [Runoff and water levels of the Volga delta]. M.: Gidrometeoizdat, 1962. 337 p. (In Russian).

Baydin S.S. O zalivaemosti del'ty Volgi v usloviyakh zaregulirovannogo stoka [The flooding of the Volga delta under conditions of regulated river runoff] // Proceedings of State Oceanographic Institute. 1967. V. 89. P. 67–71. (In Russian).

Baydin S.S. Osnovy metodov rascheta zalivaemosti del't rek vodami polovod'ya [Calculation methods of flooding of river deltas with flood waters] // Trudy GOIN. 1991. V. 198. P. 47–63. (In Russian).

Barmin A.N. Volgo-Akhtubinskaya poyma i del'ta reki Volgi: dinamika travyanistogo rastitel'nogo pokrova v menyayuschikhsya prirodnykh i antropogennykh usloviyakh [Volga-Akhtuba floodplain and the Volga delta: dynamics of herbaceous vegetation cover in the changing natural and anthropogenic environment]. Dis. dokt. geogr. nauk. Volgograd, 2002. 306 p. (In Russian).

Bolgov M.V., Shatalova K.Yu., Gorelits O.V., Zemlyanov I.V. Vodno-ekologicheskie problemy Volgo-Akhtubinskoy poymy [Water-ecological problems of Volga-Akhtuba floodplain] // Ekosistemy: ekologiya i dinamika. 2017. V. 1. № 3. P. 15–37. (In Russian).

Bolgov M.V., Krasnozhon G.F., Shatalova K.Yu. Komp'yuternaya gidrodinamicheskaya model' Nizhney Volgi [Computer hydrodynamic model of the Lower Volga] // Vodnye resursy. 2014. V. 41. № 1. P. 10–23. (In Russian).

Braslavskiy A.P. Usovershenstvovannaya formula dlya rascheta ispareniya s poverkhnosti vodnykh ob'ektov [Advanced formula for calculation of evaporation from the surface of water bodies] // Tez. dokl. V Vsesoyuz. gidrol. s'ezda. Sektsiya ozer i vodokhranilisch. L.: Gidrometeoizdat, 1986. P. 35–36. (In Russian).

Braslavskiy A.P., Ostroumova L.P. Raschet ispareniya vody s poverkhnosti oz. Balkhash [Calculation of water evaporation from surface of Lake Balkhash] // Trudy KazNIGMI. 1988. V. 101. P. 52–78. (In Russian).

Braslavskiy A.P., Ostroumova L.P. Otsenka tochnosti sovremennykh formul, predlozhennykh dlya rascheta sloya ispareniya s poverkhnosti vodnykh ob'ektov [Assessment of accuracy of up-to-date formulas proposed for calculation of evaporation from the surface of water bodies] // Trudy KazNIGMI. 1991. V. 107. P. 16–45. (In Russian).

Braslavskiy A.P., Shergina K.B., Guraeva V.F. Issledovanie summarnogo ispareniya s zarosley trostnika [Research of evapotranspiration from reed beds] // Problemy gidroenergetiki i vodnogo khozyaystva. 1973. V. 10. P. 132–142. (In Russian).

Brumshteyn Yu.M., Pluzhnikova E.N., Nezhivaya Yu.N., Serkalieva D.E., Vodop'yanov A.E. Pavodok v del'tovykh rayonakh Astrakhanskoy oblasti: vzglyad s pozitsiy sel'skikh zhiteley [Flood in delta areas of Astrakhan region: view of rural people] // Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya. 2013. № 2(24). P. 147–151. (In Russian).

Buber A.A., Borodychev V.V., Talyzov A.A. Razrabotka gidrodinamicheskoy modeli del'ty reki Volgi i Zapadnykh podstepnykh il'meney [Development of the hydrodynamic model of the Volga delta and Western steppe ilmens] // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. 2017. № 2 (46). P. 271–283. (In Russian).

Bukharitsin P.I., Polonskiy V.F., Ostroumova L.P. Ustoychivoe vodoobespechenie Zapadnykh podstepnykh il'meney del'ty Volgi [Sustainable water supply of Western steppe ilmens of the Volga delta]. Beau Bassin: Lambert academic publishing, 2017. 127 p. (In Russian).

Valov M.V., Barmin A.N. Sovremennye tendentsii izmeneniya gidrologicheskikh usloviy v del'te reki Volgi [Current trends of changes of the hydrological conditions in the Volga delta] // Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Regional'nye problemy vodopol'zovaniya v izmenyayuschikhsya klimaticheskikh usloviyakh". Ufa, 2014. P. 96–99. (In Russian).

Vasil'chenko O.M., Chavychalova N.I., Ponomarev S.V. Vliyanie ob'ema stoka i rezhima polovod'ya na kachestvennye kharakteristiki molodi lescha v vostochnykh i zapadnykh chastyakh del'ty reki Volgi [The influence of river runoff and flood on qualitative characteristics of juvenile bream in eastern and western parts of the Volga delta] // Vestnik AGTU. Ser. Rybnoe khozyaystvo. 2019. № 2. P. 22–32. (In Russian).

Vinokurova A.G., Chermoshentsev A.Yu. Opredelenie zon pavodkovogo podtopleniya po dannym radiolokatsionnoy s'emki so sputnika Sentinel-1 [The detection of flooding areas based on radar shooting by the satellite Sentinel-1] // Interekspo Geo-Sibir'. 2020. P. 67–72. (In Russian).

Gel'bukh T.M. Summarnoe isparenie s zarosley trostnika v zone nedostatochnogo uvlazhneniya [Evapotranspiration from reed beds in the zone of insufficient moisture] // Trudy GGI. 1964. V. 92. (In Russian).

Ginzburg A.I., Kostyanoy A.G. Tendentsii izmeneniy gidrometeorologicheskikh parametrov Kaspiyskogo morya v sovremennyy period (1990-e – 2017 gg.) [Tendencies in changes of hydrometeorological parameters of the Caspian Sea in the modern period (1990–2017)] // Sovrem. probl. DZZ iz kosmosa. 2018. V. 15. № 7. P. 195–207. (In Russian).

Golubev V.S., Fedorova T.G. Metody izmereniya i rascheta ispareniya s vodnoy poverkhnosti [Methods of measurement and calculation of evaporation from the water surface] // Metody izucheniya i rascheta vodnogo balansa. L.: Gidrometeoizdat, 1981. P. 249–265. (In Russian).

Gorelits O.V., Zemlyanov I.V. Issledovanie sezonnykh protsessov v ust'evoy oblasti Volgi s ispol'zovaniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya [Seasonal processes in the mouth area of the Volga River using remote sensing data] // Vodnye res. 2005. V. 32. № 3. P. 261–273. (In Russian).

Gorelits O.V., Polonskiy V.F. Zalivanie del'ty Volgi i vliyanie na nego izmeneniy urovnya Kaspiyskogo morya [The flooding of the Volga delta and effects of changes of the level of the Caspian Sea on the flooding] // Meteorologiya i gidrologiya. 1997. № 10. P. 85–97. (In Russian).

Deribizova S.B. Gidrologicheskie i vodokhozyaystvennye aspekty Ili-Balkhashskoy problemy [Hydrological and water management aspects of Lake Balkhash and the Ili River problems] // L.: Gidrometeoizdat, 1989. 310 p. (In Russian).

Evdokimov S.I., Mikhalap S.G. Opredelenie fizicheskogo smysla kombinatsii kanalov snimkov Landsat dlya monitoringa sostoyaniya nazemnykh i vodnykh ekosistem [The physical meaning of the combination of spectral bands of Landsat im-

ages for monitoring of terrestrial and aquatic ecosystems] // Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. 2015. № 7. P. 21–32. (In Russian).

Eliseeva I.I. Statistika: uchebnik dlya akademicheskogo bakalavriata [Statistics: tutorial for academic baccalaureate]. M.: Izdatel'stvo Yurayt, 2014. 674 p. (In Russian).

Elsakov V.V., Plyusnin S.N., Schanov V.M. Tekhnologii distantsionnogo zondirovaniya v issledovanii svoystv rastitel'nykh soobschestv basseyna r. Novaya Neruta [Technology of remote sensing in the study of features of plant communities in the New Neruta River basin] // Vestnik Inst. biolog. Komi NTS UrO RAN. 2006. № 2(100). P. 315–319. (In Russian).

Zanozin V.V. Morfologicheskaya struktura landshaftov Astrakhanskoy oblasti kak osnova razvitiya rekreatsionnoy deyatel'nosti [Morphological structure of landscapes of Astrakhan region as the basis for recreational activities development] // Yuzhno-Ross. vest. geol., geogr. i global'n. energ. 2003. № 2. P. 51–54. (In Russian).

Kataev M.Yu., Bekerov A.A. Metodika obnaruzheniya vodnykh ob'ektov po mnogospektral'nym sputnikovym izmereniyam [Methods of detection of water objects using multispectral satellite measurements] // Doklady TUSUR. 2017. V. 20. № 4. P. 105–108. (In Russian).

Kashkin V.B., Sukhinin A.I. Distantsionnoe zondirovanie Zemli iz kosmosa. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Remote sensing of the Earth from space. Digital image processing.] M.: Logos, 2001. 264 p. (In Russian).

Kuzin V.N. Gidrogeologicheskiy ocherk del'ty Volgi [Hydrogeological sketch of the Volga delta] // Trudy GOIN. 1951. V. 18 (30). P. 249–276. (In Russian).

Kuzin P.S. Poteri stoka Volgi v rayone Volgo-Akhtubinskoy poymy i del'ty [Runoff losses of the Volga River in the Volga-Akhtuba floodplain and the Volga delta] // Meteorologiya i gidrologiya. 1939. № 9. P. 80–85. (In Russian).

Kuznetsov V.I., Golubev V.S., Fedorova T.G. Ukazaniya po raschetu ispareniya s poverkhnosti vodoemov [Manual for calculation of evaporation from the surface of water bodies]. L.: Gidrometeoizdat, 1969. 85 p. (In Russian).

Mikhaylov V.N., Korotaev V.N., Polonskiy V.F. i dr. Gidrologo-morfologicheskie protsessy v ust'evoy oblasti Volgi i ikh izmeneniya pod vliyaniem kolebaniy urovnya Kaspiyskogo morya [Hydrological and morphological processes in the Volga River mouth and their changes under the influence of the Caspian Sea level fluctuations] // Geomorfologiya. 1993. № 4. P. 97–107. (In Russian).

Orlyankin V.N., Aleshina A.R. Ispol'zovanie matrits vysot SRTM v predvaritel'nykh raschetakh i kartografirovanii glubin potentsial'nogo pavodkovogo zatopleniya rechnykh poym [Using of matrixes of heights SRTM in the preliminary calculations and mapping of the depths of potential flooding of river floodplains] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2019. № 5. P. 72–81. (In Russian).

Ostroumova L.P. Raschet ispareniya s vodnoy poverkhnosti [Calculations of the evaporation from the water surface] // Aktual'nye problemy gidrometeorologii ozera Balkhash i Pribalkhash'ya. SPb.: Gidrometeoizdat, 1995. P. 24–36. (In Russian).

Ostroumova L.P. Raschet ispareniya s poverkhnosti vodnykh ob'ektov v ust'evykh oblastyakh rek yuzhnykh morey Rossii [Calculations of the evaporation from the surface of the water bodies in the mouths of the rivers of the southern seas in Russia] // Meteorologiya i gidrologiya. 2004. № 9. P. 81–96. (In Russian).

Ostroumova L.P., Mikhaylova V.Ya. K raschetu ispareniya s poverkhnosti Krasnodarskogo vodokhranilischa [Calculations of the evaporation from the surface of the Krasnodar Reservoir] // Trudy GOIN. 2008. № 211. P. 249–272. (In Russian).

Ostroumova L.P., Faleeva O.S. Otsenka poter' vody na isparenie s vodnoy poverkhnosti v ust'evoy oblasti Volgi [Assessment of the water loss via evaporation from the water surface in the Volga River mouth] // Trudy GOIN. 2007. № 210. P. 285–299. (In Russian).

Pakhuchiy V.V., Pakhuchaya L.M. Opyt ispol'zovaniya vegetatsionnykh indeksov pri kompleksnykh issledovaniyakh na ob'ektakh gidrolesomelioratsii [Use of vegetation indices in the complex studies at the facilities of the forest melioration] // Vest. Povolzh. gos. tekh. univer. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie. 2014. № 1(21). P. 33–41. (In Russian).

Podolyako S.A. Ob urozhaynosti molodi nekotorykh vidov ryb del'ty Volgi v poloyakh Astrakhanskogo gosudarstvennogo zapovednika v 2012–2013 godakh [Yield of juveniles of some fish species of the Volga delta in the shallow temporary water bodies of the Astrakhan State Reserve in 2012–2013] // Astr. vest. ekol. obraz. 2014. № 2(28). P. 52–55. (In Russian).

Polonskiy V.F. Landshaftnoe rayonirovanie del'ty Volgi s uchetom ee khozyaystvennoy osvoennosti i kharaktera zatopleniya v polovod'e [Landscape zoning of the Volga delta in view of economic development and features of the flooding] // Tezisy dokladov Vserossiyskogo kongressa rabotnikov vodnogo hozyaystva. Moskva, 2003. P. 209–210. (In Russian).

Polonskiy V.F., Gorelits O.V. Otsenka reguliruyuschey roli del'ty Volgi pri propuske polovod'ya [Assessment of the regulating role of the Volga delta during a flood] // Gidrometeorologicheskie aspekty problemy Kaspiyskogo morya i ego basseyna. SPb.: Gidrometeoizdat, 2003. P. 65–77. (In Russian).

Polonskiy V.F., Lupachev Yu.V., Skriptunov N.A. Gidrologo-morfologicheskie protsessy v ust'yakh rek i metody ikh rascheta (prognoza) [Hydrological and morphological processes in the mouths of the rivers and methods of their calculation (forecast)]. Spb.: Gidrometeoizdat, 1992. 383 p. (In Russian).

Polonskiy V.F., Mikhaylov V.N., Skriptunov N.A. i dr. Ust'evaya oblast' Volgi: gidrologo-morfologicheskie protsessy, rezhim zagryaznyayuschikh veschestv i vliyanie kolebaniy urovnya Kaspiyskogo morya [The Volga River Mouth: hydrological and morphological processes, regime of pollutants and fluctuations of the level of the Caspian Sea]. M.: GEOS, 1998. 280 p. (In Russian).

Polonskiy V.F., Ostroumova L.P. Novaya vodno-balansovaya model' del'ty Volgi, kak sredstvo dlya optimal'nogo upravleniya ee vodnym rezhimom [New water-balance model of the Volga delta as a tool for optimal regulation of water regime] // Ekologicheskie sistemy i pribory. 2005. № 12. P. 37–48. (In Russian).

Polonskiy V.F., Ostroumova L.P. Izuchenie parametrov zatopleniya del'ty Volgi i ee vodno-balansovoe modelirovanie [Parameters of the Volga delta flooding and its water-balance modeling] // Sbornik statey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii 3–5 oktyabrya 2007: "Vodnye resursy Volgi: nastoyaschee i buduschee, problemy upravleniya". Astrakhan', 2008. P. 263–273. (In Russian).

Polonskiy V.F., Ostroumova L.P. Gidrologicheskie osnovy vodoobespecheniya zapadnykh podstepnykh il'meney v del'te Volgi pri razlichnykh gidrografakh polovod'ya [Water supply of Western steppe ilmens in the Volga delta during different types of floods] // Sbornik dokladov konferentsii "Upravlenie vodno-resursnymi sistemami v ekstremal'nykh usloviyakh". Moskva, 2009. P. 52–56. (In Russian).

Polonskiy V.F., Ostroumova L.P. Issledovanie protsessov zatopleniya, raschet i otsenka izmeneniy sostavlyayuschikh vodnogo balansa del'ty Volgi v polovod'e [Processes of flooding, assessment and calculation of the dynamics of water balance components of the Volga delta during a flood] // Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii 19–20 oktyabrya 2010: "Izmenenie klimata i vodnogo balansa Kaspiyskogo regiona". Astrakhan', 2011. P. 119–127. (In Russian).

Polonskiy V.F., Ostroumova L.P., Bukharitsin P.I., Sinenko L.G. Vodoobespechenie zapadnykh podstepnykh il'meney del'ty Volgi v usloviyakh izmenyayuschegosya ob'ema rechnogo stoka i vozrastayuschego antropogennogo vozdeystviya na ekosistemu [Water supply of Western steppe ilmens of the Volga delta under conditions of the river runoff changes and increasing anthropogenic influence on the ecosystem] // Problemy i perspektivy sovremennoy nauki: sb. nauch. tr. Tomsk, 2009. V. 2. № 1. P. 71–76. (In Russian).

Rode A.A. Osnovy ucheniya o pochvennoy vlage [Basis of theory on soil moisture]. L.: Gidrometeoizdat, 1965. 952 p. (In Russian).

Rodionova N.V. Analiz izobrazheniy Sentinel 1 dlya vesennego pavodka v Altayskom krae v aprele 2015 g. i Ryazanskoy oblasti v aprele 2016 g. [Analysis of the Sentinel 1 images of the spring floods in Altai region in April of 2015 and in Ryazan region in April of 2016] // Sovr. probl. DZZ iz kosm. 2017. V. 14. № 1. P. 136–146. (In Russian).

Rybak V.S. O vozmozhnom zalivanii del'ty Volgi pri rabote vododelitelya [Prediction of flooding of the Volga delta under the influence of water-separator] // Proceedings of State Oceanographic Institute. 1973a. V. 116. P. 104–112. (In Russian).

Rybak V.S. Poteri stoka vody v Volgo-Akhtubinskoy poyme i v del'te Volgi [Losses of the water runoff in Volga-Akhtuba floodplain and the Volga delta] // Trudy GOIN. 1973b. V. 116. P. 82–96. (In Russian).

Tertychnaya A.S., Tertychnyy K.S., KHoperskov A.V. Metod opredeleniya beregovykh liniy vodnykh ob'ektov na osnove obrabotki dannykh distantsionnogo zondirovaniya Landsat ETM [Methods of detection of the coast lines of the water objects based on processing of Landsat ETM remote sensing data] // Sovrem. probl. DZZ iz kosm. 2023. V. 20. №5. P. 28–38. (In Russian).

Tsytsenko K.V., Shalygin A.L. Otsenka zalivaemosti del'ty Volgi v sovremennykh usloviyakh [Assessment of the floods in the Volga delta under current conditions] // Meteorologiya i gidrologiya. 2002. № 2. P. 80–87. (In Russian).

Tsytsenko K.V., Shalygin A.L. Otsenka zalivaemosti del'ty Volgi s ispol'zovaniem sputnikovoy informatsii [Assessment of the floods in the Volga delta using satellite data] // Gidrometeorologicheskie aspekty problemy Kaspiyskogo morya i ego basseyna. SPb.: Gidrometeoizdat, 2003. P. 78–86. (In Russian).

Shiklomanov I.A. Gidrologicheskie aspekty problemy Kaspiyskogo morya [Hydrological aspects of the Caspian Sea problems]. L.: Gidrometeoizdat, 1976. 77 p. (In Russian).

Shinkarenko S.S., Bartalev S.A., Berdengalieva A.N., Vypritskiy A.A. Dinamika ploschadey vodoyomov Zapadnogo il'menno-bugrovogo rayona del'ty Volgi [The dynamics of the areas of water bodies in the Western ilmens and mounds region of the Volga delta] // Sovremennye problemy DZZ iz kosmosa. 2021. V. 18. № 4. P. 285–290. (In Russian).

Shinkarenko S.S., Bartalev S.A., Bogodukhov M.A., Vorushilov I.I., Saygin I.A. Klassifikatsiya poymennykh zemel' Nizhney Volgi na osnove mnogoletnikh dannykh distantsionnogo zondirovaniya i gidrologicheskoy informatsii [Classification of the floodplain lands in the Lower Volga based on long-term remote sensing data and hydrological information] // Sovremennye problemy DZZ iz kosmosa. 2023. V. 20. № 3. P. 119–135. (In Russian).

Shumova N.A. Izmenenie ekologicheski znachimykh parametrov gidrologicheskogo rezhima Nizhney Volgi pri zaregulirovanii stoka [Change of the ecologically significant parameters of the hydrological regime of the Lower Volga under runoff regulation] // Aridnye ekosistemy. 2014. V. 20. № 3(60). P. 33–47. (In Russian).

Buma W.G., Lee L.I., Seo J.Y. Recent surface water extent of Lake Chad from multispectral sensors and GRACE // Sensors. 2018. V. 18. P. 1–24.

Dero Q.Y., Yari E., Charrahy Z. Global warming, environmental security and its geo-economic dimensions case study: Caspian Sea level changes on the balance of transit channels // Jour. of Environ. Heal. Sci. and Engin. 2020. V. 18(2).

Du Xiao, Wang Shixin, Zhou Yi et al. Construction and validation of a new model for unified surface water capacity based on MODIS data // Geomatics and Information Science of Wuhan University. 2007. Vol. 32. No. 3. P. 205–208.

Du Y., Zhang Y., Ling F., Wang Q., Li W., Li X. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band // Remote Sensing. 2016. V. 8. P. 1–19.

Farr T.G., Rosen P.A. et al. The Shuttle Radar Topography Mission // Rev. Geophys. 2007. V. 45(2). P. 1–33.

Feyisa G.L., Meilby H., Fensholt R., Proud S.R. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery // Remote Sens. Environ. 2014. V. 140. P. 23–35.

Fraser R.S., Kaufman Y.J. The relative importance of aerosol scattering and absorption in remote sensing // IEEE Geosci. Remote Sens. 1985. V. GE-23. P. 615–633.

Gao B.C. NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sens. Environ. 1996. V. 58. P. 257–266.

Hunt E.R., Rock B.N. Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectances // Remote Sens. of Eviron. 1989. № 30. P. 43–54.

Hunt E.R., Rock B.N., Nobel P.S. Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance // Remote Sensing of Environment. 1987. V. 22(3). P. 429–435.

Kwang C., Jnr E.M.O., Amoah A.S. Comparing of Landsat 8 and Sentinel 2A using water extraction indexes over Volta River // J. Geogr. Geol. 2017. V. 10. P. 1–7.

McFeeters S.K. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features // International Journal of Remote Sensing. 1996. V. 17. P. 1425–1432.

Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // Nature. 2016. V. 540. P. 418–422.

Rouse J., Haas R., Schell J. and Deering D. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS // Third ERTS Symposium, NASA (1973): 309–317.

Schultz G.A. Remote Sensing and GIS from the perspective of hydrological systems and process dynamics // HydroGIS 96: Application of geographic information systems in hydrology and water resourses. IAHS publ. No. 235. 1996. P. 637–647.

Singh K.V., Setia R., Sahoo S., Prasad A., Pateriya B. Evaluation of NDWI and MNDWI for assessment of waterlogging by integrating digital elevation model and groundwater level // Geocarto Int. 2015. V. 30(6). P. 650–661.

Sobek-rural. Delft Hydraulics Software manual. Delft, 2004. 250 p.

Su Z. Remote sensing applied to hydrology: the Sauer river basin study // Proc. Ruhr-Universitat Bochum, Germany. 1996. No. 15. 190 p.

Sun F., Sun W., Chen J., Gong P. Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery // Int. J. Remote Sens. 2012. V. 33. P. 6854–6875.

Szabo S., Gacsi Z., Balazs B. Specific features of NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories // Landsc. & Environ. Ser. 2016. V. 10. P. 194–202.

Xu H. Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // International Journal of Remote Sensing. 2006. V. 27. № 14. P. 3025–3033.