

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЕЖЕДНЕВНЫХ ПЛОЩАДЕЙ ЗАЛИВАНИЯ РАЙОНА ДЕЛЬТЫ ВОЛГИ В ПОЛОВОДЬЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

© 2024 г. Н. С. Зилитинкевич^{1,*}

¹Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

*E-mail: vodanavolge@mail.ru

Поступила в редакцию 26.12.2023 г.

Разработана методика расчета ежедневных площадей заливания района дельты Волги (ДВ) за весь период половодья с использованием спутниковых данных. В основе методики лежит построение зависимостей площадей заливания русловой сети и междуречных пространств района ДВ ($F_{\text{общ}}$) от средних по территории района ДВ среднесуточных уровней воды в руслах водотоков (H_p). $F_{\text{общ}}$ за отдельные даты половодья определялись по спутниковым снимкам (космоснимкам). Данные по H_p на гидрологических постах (г/п) за эти же даты брались из Государственного водного кадастра. С помощью этих зависимостей с высокой точностью рассчитывались ежедневные площади заливания района ДВ за половодья разной водности (многоводное, маловодное, средневодное). Методика разработана в двух модификациях: 1 – методика с использованием количества космоснимков достаточного для того, чтобы охватить все основные изменения хода каждой фазы половодья, 2 – методика с использованием количества космоснимков недостаточного для того, чтобы охватить все основные изменения хода каждой фазы половодья. Проведен сравнительный анализ полученных с высокой точностью по методике 1 ежедневных $F_{\text{общ}}$ за половодья разной водности (многоводное, маловодное, средневодное). Выявлено, как половодья разной водности различаются по характеристикам (срокам прохождения, амплитуде, площади максимального заливания территории, продолжительности фазы подъема, фазы спада и фазы полки половодья). Этот результат получен впервые. Результаты расчетов по данной методике позволяют выявить пространственно-временные закономерности процессов заливания района ДВ при прохождении половодий разной водности. С использованием разработанной методики можно предсказывать ход половодья в районе ДВ и рассчитывать водный баланс района ДВ.

Ключевые слова: половодье, дельта Волги, площади заливания дельты, космоснимки, спектральный индекс воды

DOI: 10.31857/S0205961424030065, EDN: FANFLF

ВВЕДЕНИЕ

Дельта Волги – это одна из крупнейших дельт мира со сложной гидрографической сетью. Ее площадь составляет 13 916 км². ДВ состоит из центральной дельты (8 248 км²), района западных подступных ильменей (4 216 км²) и района восточных подступных ильменей (1 452 км²). Вершина дельты находится в 46 км выше г. Астрахани, в месте ответвления рукава Бузана от русла Волги. Протяженность дельты от ее вершины до устьев водотоков на морском крае дельты составляет от 115 до 165 км. Длина морского края дельты равна 175 км (Полонский, Остроумова, 2005).

На территории дельты Волги проживает большое число жителей. Она богата природными ресурсами, имеет большое хозяйственное значение,

активно используется сельским, рыбным, коммунальным хозяйствами, водным транспортом. Важнейшей отраслевой деятельностью здесь является рыбное хозяйство. Дельта Волги ценится как рекреационная зона. Исследования процессов ее заливания и разработка методов их расчетов особенно актуальны по двум основным причинам. Во-первых, дельта Волги – это крупное нерестилище ценных пород рыб. Во-вторых, заливание дельты представляет опасность для населенных пунктов и освоенных под сельское хозяйство территорий.

Существенная особенность водного режима дельты Волги – ее сильное заливание в период половодья. Большие объемы воды в период половодья аккумулируются на обширных междуречных пространствах дельты.

Методология расчетов процессов заливания дельты Волги развивалась на протяжении многих лет. К началу XXI века удалось:

1. ориентировочно оценить вклад половодья в водный режим дельты (Байдин, 1967; Рыбак, 1973; Горелиц, Полонский, 1997; Полонский, Горелиц, 2003);

2. выявить особенности заливания ДВ при работающем и неработающем Волжском водodelителе в ее вершине (Рыбак, 1973);

3. определить влияние изменения уровня Каспийского моря на заливание ДВ в половодье (Горелиц, Полонский, 1997);

4. выявить особенности прохождения многоводных и маловодных половодий в условиях естественного и зарегулированного режима стока реки Волги (Полонский, Горелиц, 2003).

С начала XXI века исследования площадей заливания ДВ в половодье стали проводиться с использованием спутниковых данных. Однако интервалы между космическими съемками дельты были слишком большими для изучения всех основных особенностей половодий разных типов. $F_{\text{общ}}$ рассчитывались за даты разных половодий теперь с применением космоснимков, а не методом авиаоблетов. Это существенно повысило точность методик, но рассчитываемые ежедневные значения $F_{\text{общ}}$ все равно оставались ориентировочными из-за недостатка космоснимков. За первую декаду XXI века удалось:

1. уточнить общие сведения об особенностях заливания ДВ в половодье (Полонский, 2003; Полонский, Остроумова, 2005; Полонский, Остроумова, 2008; Полонский, Остроумова, 2011);

2. выявить особенности прохождения экстремально многоводного половодья в ДВ (Полонский, Остроумова, 2005);

3. определить характеристики многоводного и средневодного половодий в одном из районов ДВ с использованием полевых данных (Полонский, Остроумова, 2011).

Таким образом, исследования площадей заливания ДВ в половодье не завершены. Получены лишь ориентировочные значения ежедневных $F_{\text{общ}}$ 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. Благодаря появлению новых технологий и большого количества спутниковых данных в настоящее время разработанные методи-

ки можно внедрять в новейшие исследования, получая высокоточные результаты.

Развитие спутникового зондирования в настоящее время позволило в настоящей работе создать методику высоко точного расчета ежедневных площадей заливания районов ДВ при прохождении половодий разной водности в двух модификациях: 1 – методика с использованием количества космоснимков достаточного для того, чтобы охватить все основные изменения хода каждой фазы половодья, 2 – методика с использованием количества космоснимков недостаточного для того, чтобы охватить все основные изменения хода каждой фазы половодья. С использованием методики 1 в настоящей работе проведен сравнительный анализ полученных с высокой точностью ежедневных $F_{\text{общ}}$ за половодья разной водности.

Методика 2 с использованием количества космоснимков недостаточного для того, чтобы охватить все основные изменения хода каждой фазы половодья, разработана по следующей причине. Оптические спутниковые данные высокого разрешения не могут в полной мере обеспечить полноценный многолетний ретроспективный анализ половодий в ДВ. Так как временное разрешение космической съемки раньше было низкое, а также при повышенной облачности невозможна полноценная космическая съемка (Шинкаренко и др., 2023). Большое количество космоснимков ДВ появилось после 2013, а до 2013 их было мало. Поэтому по ДВ с 2013 по настоящее время имеется количество космоснимков достаточное для того, чтобы охватить все основные изменения хода каждой фазы половодья; до 2013 не имеется количество космоснимков достаточное для того, чтобы охватить все основные изменения хода каждой фазы половодья (табл. 1).

Таблица 1. Годы запуска спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) высокого разрешения, получающих изображение дельты Волги

Спутник ДЗЗ	Год запуска
Landsat-5	1984
Landsat-7	1999
Landsat-8	2013
Sentinel-2	2015
Landsat-9	2021

Методика 1 и методика 2 основаны на зависимости площадей заливания дельты Волги (ДВ) от уровней воды в ее водотоках. Многие ученые основывали свои методы исследования площадей заливания ДВ на этой зависимости (Байдин, 1967;

Рыбак, 1973; Горелиц, Полонский, 1997; Полонский, Горелиц, 2003; Полонский, Остроумова, 2005; Полонский, Остроумова, 2008; Полонский, Остроумова, 2011).

М.В. Козлова и др. (2015) показали многолетнюю изменчивость и тесную связь гидрологических характеристик реки Волги в створе города Волгоград: Q_{cp} – среднегодовой расход Волжской ГЭС в м³/с; H_{cp} – средний уровень воды за июль и август на г/п Волгоград в м БС (метры в Балтийской системе высот); W_n – средний объем половодья; r – коэффициент корреляции Пирсона; P – статистическая значимость корреляционной связи; R^2 – коэффициент детерминации (табл. 2). От города Волгоград до дельты Волги простирается Волго-Ахтубинская пойма, образованная реками Волга и Ахтуба.

В работе С.С. Шинкаренко и др. (2023) отмечена тесная связь площадей заливания дельты Волги с уровнями воды в реке Волге на г/п Астрахань в период с 2015 по 2022 гг. (коэффициент корреляции Пирсона (r) = 0.93 ($P < 0.05$)). В работе С.С. Шинкаренко и др. (2021) отмечена тесная связь площадей заливания Западного ильменно-бугрового района дельты Волги с максимальными половодными расходами Волжской ГЭС в период с 2010 по 2020 гг. (коэффициент корреляции Пирсона (r) = 0.93 ($P < 0.05$)).

Методы гидродинамического моделирования устьев рек в данной работе не использовались по следующим причинам. А.А. Бубер и др. (2017) описали и применили в своей работе гидродинамическую модель дельты Волги, С.В. Лебедева (2016) описала и применила в своей диссертации гидродинамическую модель (ГМ) многорукавного приливного устья крупной реки (на примере р. Северная Двина). Методом гидродинамического моделирования определяются характеристики динамики потока на устьевом участке реки (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. Рельеф определяется по результатам оцифровки топографических карт, батиметрия русел – по лоциям, морским навига-

ционным картам, специальным планам русел, так как цифровые модели рельефа высокой точности отсутствуют в открытом доступе (Лебедева, 2016; Бубер и др., 2017). В ГМ многорукавного приливного устья крупной реки и в ГМ дельты Волги не учитывается транспорт наносов и переформирования рельефа дна (Лебедева, 2016; Бубер и др., 2017). Коэффициенты шероховатости на разных участках русла и на пойме подбирались так, чтобы различия между смоделированными и фактическими данными были минимальными. Для условий половодья и для условий межени подбирались два набора коэффициентов шероховатости (Лебедева, 2016). ГМ не исключает влияние возможных ошибок при подборе и применении коэффициентов шероховатости, в воспроизведении рельефа (Лебедева, 2016; Бубер и др., 2017). ГМ удовлетворительно рассчитывает динамику водной поверхности в пределах дельты и придельтового участка многорукавного приливного устья крупной реки (на примере р. Северная Двина) как в приливных, так и в бесприливных условиях в отсутствии ледяного покрова и других ледовых явлений (Лебедева, 2016). ГМ позволяет определять характеристики динамики потока в водотоках дельты для того, чтобы обосновать мероприятия, необходимые для обводнения нерестилищ дельты Волги (Бубер и др., 2017).

Методика 1 и методика 2, предложенные в данной работе, не обладают недостатками ГМ благодаря качественным данным ДЗЗ высокого разрешения, которые они используют.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЕЖЕДНЕВНЫХ ПЛОЩАДЕЙ ЗАЛИВАНИЯ РАЙОНА ДВ В ПОЛОВОДЬЕ

Фазы половодья в ДВ

В середине апреля – начале мая начинается подъем уровней воды в руслах водотоков ДВ, и вода начинает выходить на пойму (фаза половодья – подъем). В мае – июне уровни воды в руслах водотоков достигают своих максимумов (фаза половодья – пик) и стабилизируются на высоких отметках

Таблица 2. Многолетняя изменчивость и связь гидрологических характеристик реки Волги в створе города Волгоград (Козлова и др., 2015)

Период	Q_{cp}	W_n	Связь Q_{cp} и W_n	H_{cp} июль и август	Q_{cp} июль и август	Связь H_{cp} и Q_{cp} июль и август
1961–1977	7108	84.4	$r = 0.96$ $(P < 0.05)$ $R^2 = 0.93$			
1990–1999	8836	114		–9.8	7127	$r = 0.99$
2000–2005	8436	103		–10.2	6770	$(P < 0.05)$
2006–2013	7550	83.3		–11	5737	$R^2 = 0.99$

(фаза половодья – полка). В июне – июле реже в августе уровни воды в руслах водотоков понижаются (фаза половодья – спад). В августе – сентябре наблюдаются низкие значения уровней воды, при которых вода не выходит за пределы русла (фаза водного режима – межень). Продолжительность и даты наступления фаз половодья и межени зависят от водности года. Половодья бывают разных типов: многоводное, средневодное, маловодное (Байдин, 1962).

Районирование ДВ

В настоящей работе использовано районирование по В.Ф. Полонскому, разделяющее ДВ на 16 районов (рис. 1) (Полонский, 2003). Разделение дельты выполнено по 5 основным признакам:

1. ландшафтные и гидрографические особенности;
2. географическое положение;
3. степень антропогенной освоенности;
4. расчлененность дельты дамбами и дорогами;
5. характеристики заливания в половодье.

Такое подробное районирование позволяет наблюдать связь $F_{\text{общ}}$ конкретного района (из 16 районов) и H_p на репрезентативных для этого конкретного района г/п – зависимость $F_{\text{общ}}$ от H_p : $F_{\text{общ}} = f(H_p)$, исключая удаленность гидрологических постов от исследуемого района. Следует отметить, что районы 13, 14, 15 – Западные подстепные ильмени, 16 – Восточные подстепные ильмени нуждаются в большем количестве постоянно действующих г/п. Для решения этой проблемы устанавливались временно действующие гидрологические посты (г/п) в районе 15 (Полонский, Остроумова, 2011).

Методика расчета ежедневных площадей заливания района ДВ в половодье продемонстрирована на одном из 16 районов, располагающимся в верхней и средней зонах восточной части ДВ – районе 11. Этот район был выбран в качестве демонстрационного исходя из того, что по нему имеется наибольшее количество космоснимков и его размеры и географическое положение хорошо соотносятся с расположением репрезентативного для него г/п пос. Володарский.

Исходные данные

Исходным материалом для получения $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ демонстрационного района являются: космические снимки ДВ, скаченные с сайтов <https://earthexplorer.usgs.gov/> и <https://www.copernicus.eu/en>; данные H_p на репрезентативном для демонстрационного района г/п пос. Володарский (рис. 1), взятые из Государственного водного кадастра. Отметка нуля поста

на г/п пос. Володарский: -28 м БС (Балтийская система высот). Использовались космоснимки, полученные со спутников Landsat-5, Landsat-7, Landsat-8 (обработка уровня-L1T) с высоким разрешением 30 м, Sentinel-2 (обработка уровня-L1C) с высоким разрешением 10 и 20 м. Данные указанных уровней обработки ортотрансформированы с использованием наземных контрольных точек и цифровой модели рельефа. Эти данные пространственно привязаны с использованием системы координат UTM (Universal Transverse Mercator) (Claverie et al., 2018). В связи с тем, что районирование ДВ выполнено на основе космической съемки спутника Landsat-7, было уменьшено разрешение у космоснимков Sentinel-2 до 30 м/пиксел с помощью программы ENVI 5.3. Диапазон съемок по годам – с 1986 по 2018 (32 года) охватывает половодья разных типов, включая экстремально маловодное и экстремально многоводное. Диапазон космических снимков по датам – с 1 апреля по 25 августа, охватывает все фазы половодий разных типов и фазу межени (табл. 1).

Определение $F_{\text{общ}}$

$F_{\text{общ}}$ района рассчитывались по спектральному алгоритму для выделения покрытых водой участков на космоснимках (Xu, 2006) с помощью программы ENVI 5.3. (ENVI..., 2009). Этот алгоритм основан на различии оптических свойств воды и суши.



Рис. 1. Районирование ДВ на основе космической съемки спутника Landsat-7 20.07.2014 г. I-XVI – номера районов ДВ, XVII – отмеляя зона устьевого взморья ДВ. Белыми прямоугольниками обозначены г/п. 1-12 – номера г/п (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)).

Разработан спектральный индекс для отделения воды от суши на космоснимках – Модифицированный Нормализованный Относительный Индекс Воды (Modified Normalized Difference Water Index (*MNDWI*)) (Xu, 2006):

$$MNDWI = (Green - SWIR) / (Green + SWIR),$$

где *Green* – это зеленый спектральный канал электромагнитного излучения, *SWIR* – это коротковолновый инфракрасный спектральный канал электромагнитного излучения. Отражение электромагнитного излучения канала *SWIR* от почвы, растительности и застройки характеризуется более высокой энергией и более высокой напряженностью электрического и магнитного полей чем у канала *Green* (Siegmond et al., 2005; Jensen, 2015). *MNDWI* выделяет воду на космоснимках вышеуказанных спутников с высокой точностью (Xu, 2006; Szabo et al., 2016; Du et al., 2016; Kwang et al., 2017; Buma et al., 2018).

Состояние атмосферы влияет на значения яркостей пикселей, регистрируемых съемочной системой, путем рассеяния и поглощения излучения молекулами газов и аэрозолей, частицами пыли, водяным паром (Кашкин, Сухинин, 2001). Для получения *MNDWI* на снимках Landsat-5, Landsat-7, Landsat-8, Sentinel-2 была выполнена атмосферная коррекция с использованием модуля атмосферной коррекции программного комплекса ENVI 5.3 Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectra Hypercubes (FLAASH) (Atmospheric..., 2009). В связи с тем, что в основе расчета *MNDWI* лежит способность воды и суши поглощать и отражать электромагнитное излучение в *SWIR* и в *Green*, при хорошей атмосферной видимости (40-100 км), которая является характеристикой прозрачности атмосферы, влияние атмосферы на *MNDWI* незначительное (Gao, 1996; Fraser, Kaufman, 1985).

Объекты антропогенного заливания (рисовые чеки, пруды) не учитывались при построении $F_{\text{общ}} = f(H_p)$, поскольку они не отображают естественные процессы заливания территории. Эти объекты маскировались на спутниковых снимках инструментами программы ENVI 5.3. На спутниковых снимках высокого разрешения (20 м и 30 м) объекты антропогенного заливания имеют вид геометрических форм или фигур (круг, прямоугольник, овал – вытянутый круг, трапеция), а объекты естественного заливания имеют вид органических форм или фигур, которые являются противоположностью геометрическим формам или фигурам (рис. 2). Органические формы или фигуры напоминают формы, встречающиеся в природе (форма листа, морской ракушки, камня, дождевой лужи).

На спутниковом снимке исследуемого района дельты инструментами программы ENVI 5.3 вруч-

ную обводились контуры объектов антропогенного заливания и маскировались.

Особую сложность представляет обнаружение воды под растительностью. Для этой цели был проведен сравнительный анализ космических изображений района, полученных в разные фазы половодья (спад и подъем).

Водопроводящая сеть ДВ обладает значительным гидравлическим сопротивлением. На растекание воды по ландшафтам дельты и на заполнение углублений в них затрачивается время. Поэтому на подъеме половодья мгновенные уровни воды на заливаемых междуручьях пространствах ниже, чем в руслах водотоков, так как их повышение на заливаемых междуручьях пространствах отстает от их повышения в руслах водотоков. На спаде половодья мгновенные уровни воды на заливаемых междуручьях пространствах выше, чем в руслах водотоков, так как их понижение на заливаемых междуручьях пространствах отстает от их понижения в руслах водотоков. Поэтому при одних и тех же H_p , $F_{\text{общ}}$ района на спаде половодья не может быть меньше, чем его $F_{\text{общ}}$ на подъеме половодья (Байдин, 1967; Полонский, Остроумова, 2005).

На космических изображениях вышеуказанных спутников в комбинации спектральных каналов электромагнитного излучения “*SWIR*, *NIR*, *RED*” (суша/вода), где *NIR* – это ближний инфракрасный спектральный канал, *RED* – это красный спектральный канал, можно четко различать воду и сушу (рис. 4). На этом изображении суша проявляется в оттенках коричневого и зеленого, а вода – в оттенках синего (Elhag, 2017; Zhang et al., 2017; Евдокимов, Михалап, 2015).

Сравнивались космические изображения района в вышеописанных комбинациях спектральных каналов на подъеме половодья, когда растительный



Рис. 2. Объекты естественного и антропогенного заливания ДВ на снимке спутника Landsat-8.

покров только формируется и не закрывает собой воду (левый спутниковый снимок на рис. 3), и на спаде половодья, когда затопленные территории сильно зарастают (правый спутниковый снимок на рис. 3), примерно при одних и тех же H_p на репрезентативном для района г/п пос. Володарский. Во всех случаях обнаруживалось, что одни и те же участки полностью затоплены на подъеме половодья и покрыты растительностью на спаде половодья. Это свидетельствует о том, что на спаде половодья под зарослями есть вода. На основе данного сравнительного анализа определялось, где есть вода под растительностью. Добавлялись залитые водой участки на космоснимках, заросшие растительностью, вручную инструментом программы ENVI 5.3 “интересующая область”.

Рассчитаны значения $F_{\text{общ}}$ района за 80 дат (80 качественных безоблачных космоснимков района 11 дельты) за период 1986–2018 гг. (32 года) в пикселах и переведены в км² (табл. 3).

Построение $F_{\text{общ}} = f(H_p)$

Для построения $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ брались H_p на г/п Володарский соответствующие рассчитанным $F_{\text{общ}}$ района по дате космической съемки.

На полученных $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ определялись точки подъема, спада, пиков половодий разной водности (многоводного, средневодного, маловодного) и точки межени разных по водности лет (рис. 5а, 5б) с помощью гидрографов ежедневных H_p на г/п Володарский (рис. 6). Эти гидрографы были построены за все годы космической съемки, перечисленные в таблице 3. Каждый гидрограф охватывает весенне-летний период с 1 апреля по 31 июля (или по 31 августа), в который попадают все фазы половодий разной водности (подъем, пик и полка, спад), включая фазу межени.

Определение H_p , при котором начинается выход воды на пойму (ВВП) – $H_{\text{ВВП}}$

У половодий разной водности подъем половодья начинается при одном и том же H_p , при котором начинается выход воды за пределы русел на сушу – $H_{\text{ВВП}}$. Определялся $H_{\text{ВВП}}$ на репрезентативном для рассматриваемого района г/п пос. Володарский. $H_{\text{ВВП}}$ – это H_p , при котором межень переходит в подъем половодья. $H_{\text{ВВП}}$ определялся с помощью $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ района, выполненной для фазы межени и фазы подъема половодий разных по водности лет (многоводного, средневодного,



Рис. 3. Снимки спутником Sentinel-2 фазы подъема половодья 4 мая 2016 г. (левый снимок) и фазы спада половодья 13 июня 2016 г. (правый снимок) в исследуемом районе 11.

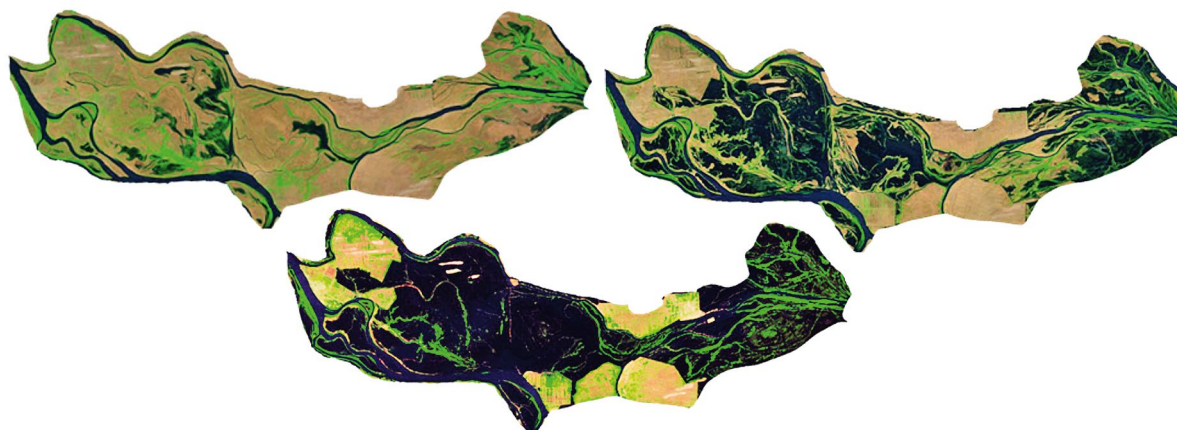


Рис. 4. Снимки спутником Sentinel-2 пика маловодного половодья 2015 г. (верхний левый снимок), пика средневодного половодья 2014 г. (верхний правый снимок), пика многоводного половодья 2016 г. (нижний снимок) в исследуемом районе 11.

Таблица 3. Перечень спутников, лет съемок, количества спутниковых снимков района 11

Спутники	Годы съемки	Фазы водного режима ДВ	Количество спутниковых снимков
Landsat-5, Landsat-7	1986, 1991, 1998, 2001, 2002, 2006, 2007	подъем половодья, пик половодья, спад половодья, межень	12 (по району 11 облака отсутствуют, снимки качественные)
Landsat-7, Landsat-8, Sentinel-2	2013, 2014, 2015, 2016	подъем половодья, пик половодья, спад половодья, межень	38 (по району 11 облака отсутствуют, снимки качественные)
Landsat-8, Sentinel-2	2018	подъем половодья, пик половодья, спад половодья, межень	30 (по району 11 облака отсутствуют, снимки качественные)

маловодного). Для этого была проведена линия тренда всех точек подъема этих половодий и линия тренда всех межженных точек. На пересечении этих трендов находится точка $H_{\text{ВВП}}$. На $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ точке $H_{\text{ВВП}}$ соответствует значение H_p на оси абсцисс (определяется по оси абсцисс) и соответствует значение $F_{\text{общ}}$ на оси ординат (определяется по оси ординат). У демонстрационного района $H_{\text{ВВП}}$ составляет 354 см. При этом уровне $F_{\text{общ}}$ района равна 24.2 км².

Построение петель половодья

Построение петель маловодного, средневодного и многоводного половодий выполняется по одному и тому же алгоритму (Полонский, Горелиц, 2003; Полонский, Остроумова, 2005; Полонский, Остроумова, 2011). Методика продемонстрирована на многоводном половодье 2016, так как за этот год имеется необходимое количество космоснимков и его многоводность обеспечивает большую амплитуду половодья.

Большое количество космоснимков ДВ появилось после 2013, а до 2013 их было мало, т.к. космическая съемка дельты в то время проводилась редко. Спутники с высоким разрешением, снимки дельты Волги которых есть в свободном доступе, собраны в таблице 1. В разные годы эти спутники охватывали космической съемкой дельту Волги с разными интервалами во времени. С 1986 по 2012 ДВ нечасто охватывалась космической съемкой спутников с высоким разрешением (Landsat-5, Landsat-7). С 2013 ДВ стала чаще охватываться космической съемкой спутников с высоким разрешением (Landsat-7, Landsat-8), а с 2015 ДВ стала еще чаще охватываться космической съемкой спутников с высоким разрешением (Landsat-7, Landsat-8, Sentinel-2).

Поэтому на данном этапе методика разбивается на две: 1 – методика с использованием количества космоснимков, достаточного для того, чтобы охватить все основные изменения хода каждой фазы половодья, 2 – методика с использованием количества космоснимков, недостаточного для того, чтобы охватить все основные изменения хода каждой фазы половодья. Гидрограф ежедневных H_p отображает ход всех фаз половодья (Полонский, Остроумова, 2005). С помощью гидрографов ежедневных H_p на г/п пос. Володарский, построенных за все годы космической съемки, перечисленные в таблице 3, определялось количество космоснимков необходимое для того, чтобы охватить все основные изменения хода всех фаз половодий разной водности (многоводного, средневодного, маловодного). Достаточное количество космоснимков половодья мы имеем в том случае, когда число дат космической съемки составляет: больше 12% от числа всех дат многоводного половодья; больше 14% от числа всех дат средневодного половодья; больше 17% от числа всех дат маловодного половодья. В противоположном случае мы имеем недостаточное количество космоснимков половодья.

Методика 1. Петля половодья многоводного 2016 г. для исследуемого района была построена с использованием $F_{\text{общ}} = f(H_p)$. Все точки половодья и межени 2016 г., полученные с применением 15 космоснимков (достаточное количество), были соединены линиями интерполяции (рис. 5а). Для перехода от фазы межени к фазе подъема половодья использовалась точка $H_{\text{ВВП}}$ на $F_{\text{общ}} = f(H_p)$. Способы проведения линий интерполяции: прямая линия через две точки, кривая линия через несколько точек (полиномиальная или логарифмическая, или экспоненциальная...) (Елисеева, 2014). Точки и их количество подбирались для проведения линий

интерполяции с помощью гидрографа ежедневных H_p на г/п Володарский, построенного за половодье 2016 (рис. 6). На гидрографе выявлялись все основные изменения хода каждой фазы половодья 2016. Точки для каждой линии интерполяции подбирались в соответствии с этими изменениями. Каждая интерполяционная линия характеризовалась величиной достоверности аппроксимации более 0.97 (Елисеева, 2014). По интерполяционным линиям, соединяющим точки половодья и межени, была проведена петля половодья 2016 г. (рис. 5а).

Петля половодья 2016 г., построенная для района (рис. 5а), начинается с точки межени, которая соответствует наименьшему H_p (на г/п пос. Володарский), дальше проходит по точкам межени, соответствующим более высоким значениям H_p , доходит до точки $H_{\text{ввп}}$. Дальше петля половодья разделяется на ветвь подъема и ветвь спада. Ветвь подъема половодья начинается с точки $H_{\text{ввп}}$, идет по точкам подъема половодья до точки пика половодья. Ветвь спада половодья начинается с точки пика половодья, идет по точкам спада половодья до точки межени, которая соответствует наименьшему H_p (рис. 5а).

В случае несовпадения дат спутниковой съемки и дат наступления пика и полки половодья следует воспользоваться методом определения точки пика половодья, описанным ниже в методике 2.

Методика 2. Петля половодья многоводного 2016 г. для рассматриваемого района была построена с использованием $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ с применением не 15, а 3 космоснимков этого половодья (недостаточное количество).

У лет с разной водностью на $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ ветви подъема и спада половодья идут по разным траекториям (рис. 5в). Это объясняется тем, что скорость роста и понижения H_p (количество см в день) в период подъема и спада половодья у лет с разной водностью различается. Поэтому петля половодья многоводного 2016 г. для района строилась с использованием космоснимков, полученных за года со сходными половодьями по водности и по форме гидрографа ежедневных H_p . Это многоводные 2001 и 2013 годы. Проверкой сходства служил статистический анализ, который показывал линейную связь между исследуемым половодьем и сходным половодьем (Елисеева, 2014).

Между значениями ежедневных H_p за исследуемое половодье 2016 и за половодье аналог 2001 наблюдалась тесная корреляционная связь (коэффициент корреляции Пирсона (r) = 0.988 (корреляционная связь является статистически значимой $P < 0.0001$)). Линейная регрессионная модель, описывающая связь между этими двумя переменными, характеризовалась коэффициентом детерминации (R^2) = 0.976, средней абсолютной ошибкой (MAE) = 12 см, сред-

неквадратичной ошибкой ($RMSE$) = 14 см. Разность между средними значениями двух сравниваемых переменных или смещение (B) = 11 см.

Между значениями ежедневных H_p за исследуемое половодье 2016 и за половодье аналог 2013 наблюдалась тесная корреляционная связь (коэффициент корреляции Пирсона (r) = 0.981 ($P < 0.0001$)). Линейная регрессионная модель, описывающая связь между этими двумя переменными, характеризовалась коэффициентом детерминации (R^2) = 0.962, средней абсолютной ошибкой (MAE) = 15 см, среднеквадратичной ошибкой ($RMSE$) = 16 см. Разность между средними значениями двух сравниваемых переменных или смещение (B) = 8 см. Все статистические оценки были получены с помощью программы Matlab.

Была построена ветвь пиков половодий разных лет с использованием $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ района. Для этого соединялись линиями интерполяции точки пиков половодий многоводных лет (1986, 1991, 1998, 2007, 2013 (можно брать и другие многоводные годы, не забыв взять экстремально многоводный год)), а также точки пиков половодий других по водности лет для наглядности (средневодного 2014 и маловодного 2015 (можно брать и другие годы средней и малой водности)) (рис. 5б). Ветвь пиков половодий разных лет описывается уравнениями линий интерполяции (величина достоверности аппроксимации более 0.94), из которых она состоит. Эти уравнения имеют вид: $F_{\text{общ}} = f(H_p)$. По одному из этих уравнений была рассчитана $F_{\text{общ}}$ района за дату пика половодья 2016 г. Для этого было подставлено в это уравнение значение H_p на репрезентативном для района г/п за дату пика половодья 2016. Так была получена точка пика половодья 2016 на графике $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ (рис. 5б).

Была построена ветвь подъема половодья 2016 с использованием $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ района. Для этого соединялись линиями интерполяции (величина достоверности аппроксимации более 0.94) точки подъема половодий 2001, 2013, 2016 друг с другом, с точкой $H_{\text{ввп}}$ и с рассчитанной точкой пика половодья 2016 (рис. 5б).

Была построена ветвь спада половодья 2016 с использованием $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ района. Для этого соединялись линиями интерполяции (величина достоверности аппроксимации более 0.94) точки спада половодий 2001, 2013, 2016 друг с другом, с рассчитанной точкой пика половодья 2016 и с точкой межени одного из многоводных лет (2013), которая соответствует наименьшему H_p на репрезентативном для района г/п (рис. 5б).

По точкам межени многоводных лет (2013, 2016), ветвям спада и подъема половодья была построена петля половодья 2016 г. (рис. 5б).

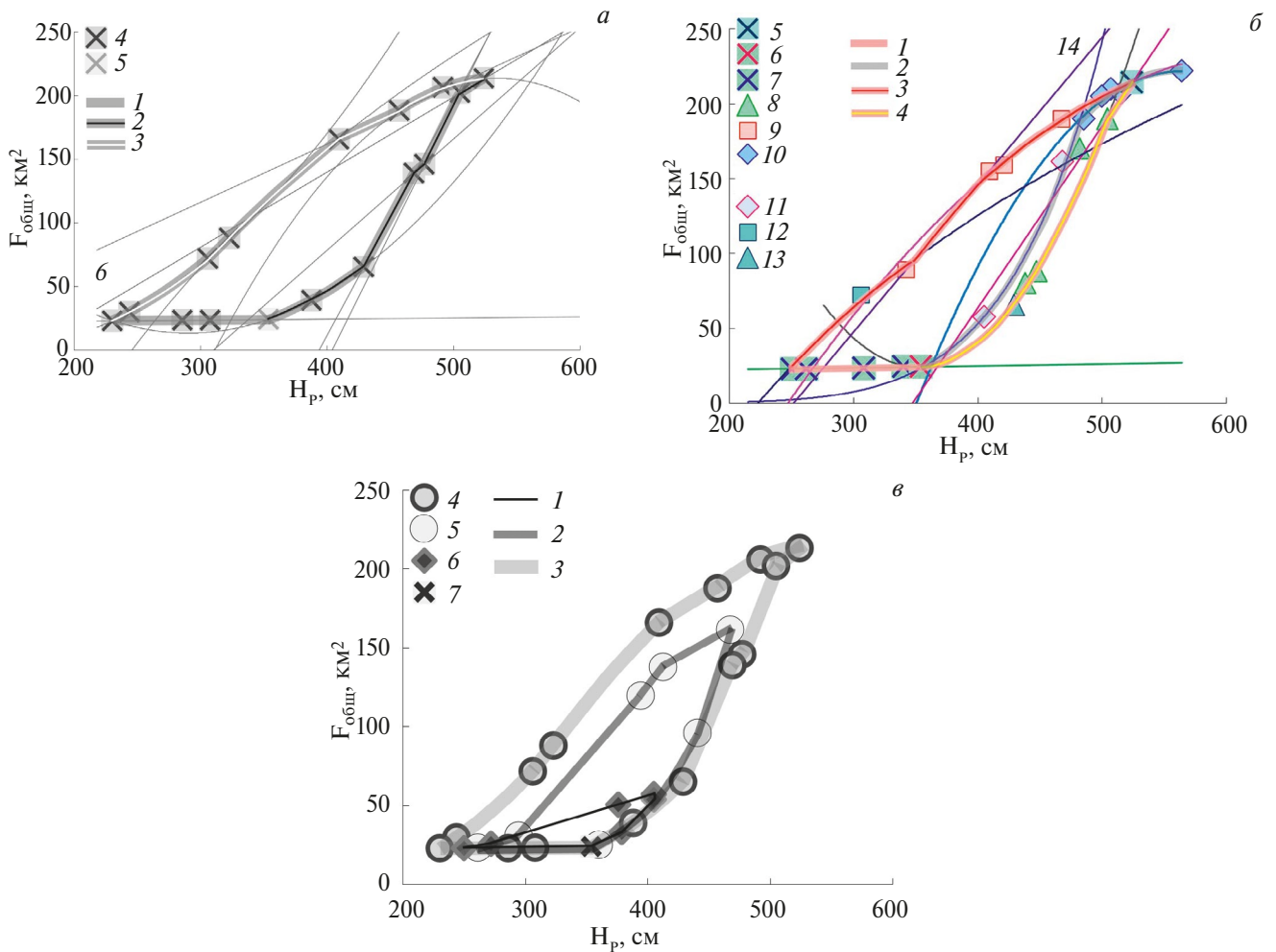


Рис. 5. а – петля многоводного половодья 2016 г. (1), построенная по методике 1 для района; ветвь подъема половодья 2016 г. (2); ветвь спада половодья 2016 г. (3); точки половодья и межени 2016 г. (4), полученные с космоснимков; точка $H_{ввп}$ (5); линии интерполяции, соединяющие точки половодья и межени 2016 г. (6). б – петля многоводного половодья 2016 г. (1), построенная по методике 2 для района; ветвь пиков половодий разных лет (2); ветвь спада половодья 2016 г. (3); ветвь подъема половодья 2016 г. (4); точка пика половодья 2016 г., рассчитанная по уравнению ветви пиков половодий разных лет (5); точка $H_{ввп}$ (6); точки межени многоводных лет (7); точки подъема половодий 2001, 2013 гг. (8); точки спада половодий 2001, 2013 гг. (9); точки пиков половодий многоводных лет (10); точки пиков половодий средневодного 2014 г. и маловодного 2015 г. (11); точка спада половодья 2016 г. (12); точка подъема половодья 2016 г. (13); линии интерполяции, соединяющие точки половодий и межени разных лет (14). в – петли половодий: маловодного 2015 г. (1); средневодного 2014 г. (2); многоводного 2016 г. (3). Все петли построены по методике 1 для района. Точки половодья и межени 2016 г. (4); точки половодья и межени 2014 г. (5); точки половодья и межени 2015 г. (6); точка $H_{ввп}$ (7).

Построение хода ежедневных значений $F_{общ}$ района

Построение хода ежедневных значений $F_{общ}$ района за весь период маловодного, средневодного и многоводного половодий выполняется по одному и тому же алгоритму. Методика продемонстрирована на многоводном половодье 2016 г.

Полученные две петли многоводного половодья 2016 для района по методикам 1 и 2 (рис. 5а и 5б) состоят из интерполяционных линий, по которым они построены. Каждая интерполяционная линия опи-

сывается уравнением (линейным или полиномиальным, или логарифмическим...). Эти уравнения имеют вид: $F_{общ} = f(H_p)$. Примеры этих уравнений:

$$F_{общ} = 0.009652H_p + 20.503468 \text{ (линейное уравнение),}$$

$$F_{общ} = 0.002352H_p^2 - 0.615204H_p + 39.998292 \text{ (полиномиальное уравнение),}$$

$$F_{общ} = 325.926173\ln(H_p) - 1794.193823 \text{ (логарифмическое уравнение).}$$

Коэффициенты в уравнениях округлены до разряда миллионных. Так как при таком округлении линии интерполяции, описанные этими уравнениями, проходят по точкам, рассчитанным по этим уравнениям, с величиной достоверности аппроксимации равной 1. Эта величина немного понижается с уменьшением количества знаков после запятой у коэффициентов (Елисеева, 2014).

По этим уравнениям были рассчитаны ежедневные $F_{\text{общ}}$ района за весь период половодья 2016 с использованием петли, построенной по методике 1. И также было рассчитано тоже самое с использованием петли, построенной по методике 2. Для этого подставлялись в уравнения интерполяционных линий значения ежедневных H_p на репрезентативном для района г/п пос. Володарский (рис. 6).

Ход ежедневных $F_{\text{общ}}$ района, построенный за половодье 2016, отображает ход этого половодья в районе (рис. 6).

Проверка точности методики 1

Проведена проверка точности методики 1 по многоводному половодью 2018 г., так как за это половодье имеется большое количество космоснимков ДВ. Для проверки точности методики 1 были рассчитаны $F_{\text{общ}}$ района с привлечением 15 космоснимков половодья 2018 (с 1 апреля по 18 июля), не использованных в примененной к этому половодью методике 1 ($F_{\text{факт}}$). Рассчитывались $F_{\text{факт}}$ района по спектральному алгоритму для выделения покрытых водой участков на космоснимках (Ху, 2006)

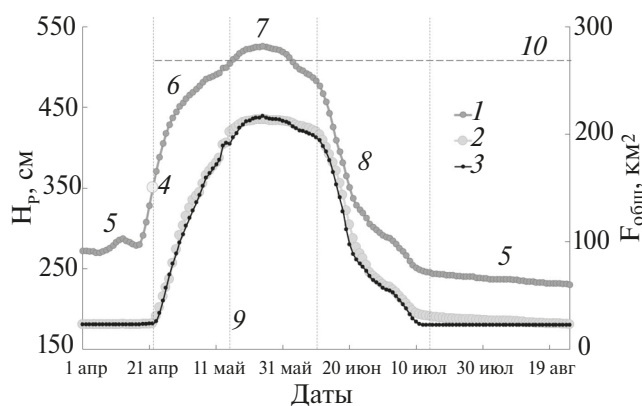


Рис. 6. Гидрографы, построенные за половодье 2016 г. (с 1 апреля по 25 августа) для района: ежедневных H_p на г/п Володарский (1); ежедневных $F_{\text{общ}}$ района, полученных по методике 1 (2); ежедневных $F_{\text{общ}}$ района, полученных по методике 2 (3). Все гидрографы включают фазу межени. Точка $H_{\text{ввп}}$ (4). Пунктирные линии, разделяющие гидрографы по фазам водного режима (9): межень (5), подъем половодья (6), пик и полка половодья (7), спад половодья (8). Пунктирная линия, которая показывает максимальную $F_{\text{общ}}$ района, равную его площади (269 км^2) (10).

с помощью программы ENVI 5.3. Значения $F_{\text{факт}}$ были приняты за эталон. Было выполнено сравнение значений $F_{\text{общ}}$ района за 15 дат половодья 2018, полученных по методике 1, и значений $F_{\text{факт}}$ района за эти же 15 дат. Для этого был проведен статистический анализ (Елисеева, 2014) с помощью программы Matlab.

Общее число анализируемых значений точек составило 15. Между 15 значениями $F_{\text{общ}}$, полученными по методике 1, и 15 значениями $F_{\text{факт}}$ наблюдалась очень тесная корреляционная связь (коэффициент корреляции Пирсона (r) = 0.999 ($P < 0.0001$)). Линейная регрессионная модель, описывающая связь между этими двумя переменными, характеризовалась коэффициентом детерминации (R^2) = 0.998, средней абсолютной ошибкой (MAE) = 1.97 км^2 , среднеквадратичной ошибкой ($RMSE$) = 2.35 км^2 . Разность между средними значениями двух сравниваемых переменных или смещение (B) = 0.52 км^2 . Полученная модельная оценка, описывающая связь между двумя рассматриваемыми параметрами, позволяет утверждать о достаточном качестве методики 1 (Елисеева, 2014). Из этого следует, что методика 1 позволяет рассчитывать ход ежедневных значений $F_{\text{общ}}$ района с высокой точностью.

Проверка точности методики 2

Проведена проверка точности методики 2 по многоводному половодью 2016 г., так как за это половодье имеется большое количество космоснимков ДВ. Для проверки точности методики 2 были рассчитаны $F_{\text{общ}}$ района с привлечением 15 космоснимков половодья 2016 (с 12 апреля по 16 июля), не использованных в примененной к этому половодью методике 2 ($F_{\text{факт}}$). Рассчитывались $F_{\text{факт}}$ района по спектральному алгоритму для выделения покрытых водой участков на космоснимках (Ху, 2006) с помощью программы ENVI 5.3. Значения $F_{\text{факт}}$ были приняты за эталон. Было выполнено сравнение значений $F_{\text{общ}}$ района за 15 дат половодья 2016, полученных по методике 2, и значений $F_{\text{факт}}$ района за эти же 15 дат. Для этого был проведен статистический анализ (Елисеева, 2014) с помощью программы Matlab.

Общее число анализируемых значений точек составило 15. Между 15 значениями $F_{\text{общ}}$, полученными по методике 2, и 15 значениями $F_{\text{факт}}$ наблюдалась очень тесная корреляционная связь (коэффициент корреляции Пирсона (r) = 0.991 ($P < 0.0001$)). Линейная регрессионная модель, описывающая связь между этими двумя переменными, характеризовалась коэффициентом детерминации (R^2) = 0.982, средней абсолютной ошибкой (MAE) = 7.8 км^2 , среднеквадратичной ошибкой ($RMSE$) = 12.4 км^2 . Разность между средними значениями двух сравниваемых переменных или смещение (B) = 5.6 км^2 . Полученная модельная оценка, описывающая

связь между двумя рассматриваемыми параметрами, позволяет утверждать о достаточном качестве методики 2 (Елисеева, 2014). Из этого следует, что методика 2 позволяет рассчитывать ход ежедневных значений $F_{\text{общ}}$ района с хорошей точностью, но с более низкой точностью, чем методика 1.

Проверка точности методики 2 с помощью методики 1

Было выполнено сравнение значений ежедневных $F_{\text{общ}}$ района за весь период половодья 2016 (с 1 апреля по 25 августа), полученных по методике 1 и по методике 2 (рис. 6). Для того чтобы проверить точность методики 2 с помощью методики 1 был проведен статистический анализ (Елисеева, 2014) с помощью программы Matlab.

Общее число анализируемых значений точек составило 147. Между 147 значениями $F_{\text{общ}}$, полученными по методике 1, и 147 значениями $F_{\text{общ}}$, полученными по методике 2, наблюдалась очень тесная корреляционная связь (коэффициент корреляции Пирсона (r) = 0.999 ($P < 0.0001$)). Линейная регрессионная модель, описывающая связь между этими двумя переменными, характеризовалась коэффициентом детерминации (R^2) = 0.997, средней абсолютной ошибкой (MAE) = 2.95 км², среднеквадратичной ошибкой ($RMSE$) = 3.9 км². Разность между средними значениями двух сравниваемых переменных или смещение (B) = 3.68 км². Полученная модельная оценка, описывающая связь между двумя рассматриваемыми параметрами, позволяет утверждать о достаточном качестве методики 2 (Елисеева, 2014). Из этого следует, что методика 2 позволяет рассчитывать ход ежедневных значений $F_{\text{общ}}$ района с хорошей точностью.

Петли многоводного, маловодного и средневодного половодий

На рис. 5в видно, что у лет с разной водностью ветви подъема и спада половодья идут по разным траекториям. Длина траекторий ветвей спада и подъема половодья зависит от водности половодья — чем больше водность, тем больше длина траекторий. В начале подъема половодья направления движения ветвей подъема у половодий с разной водностью определяются одним и тем же углом поворота траектории. В начале спада половодья направления движения ветвей спада у половодий с разной водностью определяются разными углами поворота траектории. Это связано с тем, что спад половодья начинается после фазы половодья, которая у лет с разной водностью сопровождается разными H_p (на г/п пос. Володарский), а подъем половодья у лет с разной водностью начинается при одном и том же $H_{\text{ввп}}$ (на г/п пос. Володарский). Самая узкая петля у маловодного половодья 2015,

самая широкая петля у многоводного половодья 2016, петля средней ширины у средневодного половодья 2014. Это объясняется тем, что на спаде половодья при одних и тех же H_p на репрезентативном для района г/п в более многоводное половодье $F_{\text{общ}}$ района больше, чем в менее водное половодье (рис. 5в).

Ход многоводного, маловодного и средневодного половодий

Рис. 7 позволяет сравнить ход половодий разной водности в рассматриваемом районе. Все гидрографы ежедневных $F_{\text{общ}}$ района, изображенные на этом рисунке, построены с использованием вышеописанных петель. На рис. 6 можно увидеть долю $F_{\text{общ}}$ района от площади района в разные фазы половодья при половодьях разной водности.

В таблице 4 приведены характеристики половодий разной водности в исследуемом районе. Маловодное половодье 2015 начинается на 10 дней позже средневодного 2014 и на 19 дней позже многоводного 2016, а заканчивается на 2 дня позже средневодного и на 28 дней раньше многоводного. Средневодное половодье длится в 1.2 раза дольше маловодного, многоводное половодье длится в 2.3 раза дольше маловодного. Продолжительность полки маловодного половодья на 2 дня короче продолжительности полки средневодного и на 11 дней короче продолжительности полки многоводного. Продолжительность фазы подъема маловодного половодья в 2.3 раза короче продолжительности фазы подъема средневодного и в 3.8 раз короче продолжительности фазы подъема многоводного.

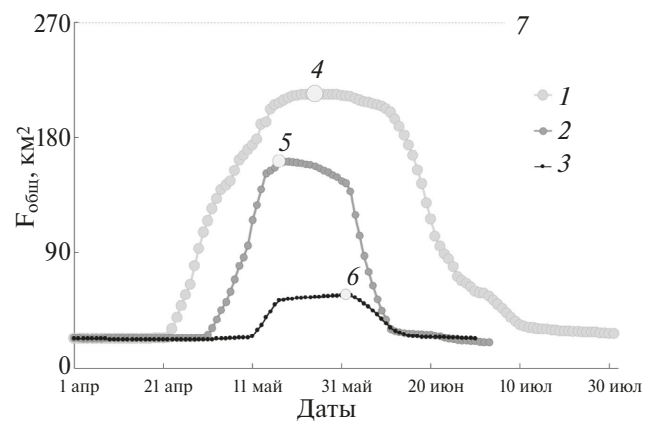


Рис. 7. Гидрографы ежедневных $F_{\text{общ}}$ района за половодья: 2016 г. (с 1 апреля по 31 июля) (1); 2014 г. (с 1 апреля по 30 июня) (2); 2015 г. (с 1 апреля по 30 июня) (3). Все гидрографы включают фазу межени. $F_{\text{общ}}$ района при пике половодья: 2016 г. (213 км²) (4), 2014 г. (161 км²) (5) и 2015 г. (57 км²) (6). Пунктирная линия, которая показывает максимальную $F_{\text{общ}}$ района, равную его площади (269 км²) (7).

Таблица 4. Характеристики половодий разной водности в районе 11 дельты Волги

Год	Тип половодья	Даты наступления и окончания половодья	Продолжительность половодья, дни	Продолжительность полки половодья, дни	$F_{\text{общ}}$ максимальная района в км ²	$F_{\text{общ}}$ максимальная района в % от площади района (269 км ²)	H_p максимальный, см (на г/п пос. Володарский)	Продолжительность фазы подъема половодья, дни	Продолжительность фазы спада половодья, дни
2015	маловодное	11 мая – 15 июня	35 дней	16 дней	57 км ²	21%	405 см	6 дней	11 дней
2014	средневодное	1 мая – 13 июня	43 дня	18 дней	161 км ²	60%	468 см	14 дней	12 дней
2016	многоводное	22 апреля – 13 июля	82 дня	27 дней	213 км ²	79%	526 см	23 дня	31 день

Продолжительность фазы спада маловодного половодья на 1 день короче продолжительности фазы спада средневодного и в 2.8 раз короче продолжительности фазы спада многоводного. $F_{\text{общ}}$ максимальная района в многоводное половодье в 3.7 раз больше $F_{\text{общ}}$ максимальной в маловодное и в 1.3 раза больше $F_{\text{общ}}$ максимальной в средневодное (рис. 7). H_p максимальный (на г/п пос. Володарский) в многоводное половодье в 1.3 раза (на 121 см) больше H_p максимального в маловодное и в 1.1 раза (на 58 см) больше H_p максимального в средневодное (табл. 4).

Ограничение применения методики 1 – недостаточное количество космоснимков для того, чтобы охватить все основные изменения хода каждой фазы половодья (охват района дельты космической съемкой с большими интервалами во времени, облака являются помехой космической съемке). После 2013 года дельта стала активно охватываться космической съемкой. За половодья, прошедшие после 2013, имеется достаточное количество безоблачных качественных космоснимков (не всей дельты, а отдельных ее районов) высокого разрешения для того, чтобы охватить все основные изменения хода каждой фазы половодья (табл. 1, табл. 3). Эти снимки имеются в свободном доступе.

Ограничение применения методики 2: у нетипичных по гидрологическим условиям годам отсутствуют годы аналоги; годы аналоги нашлись, но мало охвачены космической съемкой; год аналог нашелся, но снимки половодья года аналога попали под облака.

Одни районы дельты удастся рассчитать по методике 1, другие – по методике 2, а есть районы дельты, по которым безоблачные качественные космоснимки дельты отсутствуют, их не удастся

рассчитать ни по одной из методик. Из-за увеличения частоты космических съемок дельты с 2017 года стало можно рассчитывать большинство районов по методикам 1 и 2 (большая часть районов по методике 1). А с запуском спутника Landsat-9 в 2021 дельта стала почти полностью охватываться частой космической съемкой.

Перспективы развития методики 1 и 2 – получение доступа к большему количеству спутниковых данных высокого разрешения; получение доступа к спутниковым данным, для которых облака не являются помехой, и освоение техник работы с такими данными; установка в дельте большего количества постоянно действующих г/п, установка в дельте временно действующих г/п в период половодья.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика расчета ежедневных площадей заливания ДВ для половодий разной водности (многоводного, маловодного, средневодного). Для расчета площадей заливания дельты требуются космические снимки ДВ высокого разрешения и данные по H_p на гидрологических постах дельты. Методика разработана в двух модификациях: 1 – методика с использованием количества космоснимков достаточного для того, чтобы охватить все основные изменения хода каждой фазы половодья, 2 – методика с использованием количества космоснимков недостаточного для того, чтобы охватить все основные изменения хода каждой фазы половодья.

Результаты расчетов по данной методике позволяют выявить характеристики половодий разной водности (сроки прохождения, амплитуда, площадь

максимального заливания территории, продолжительность фазы подъема, фазы спада и фазы полки половодья) в исследуемом районе и провести их сравнительный анализ (рис. 7, табл. 4). Сравнение характеристик хода половодий разной водности выполнено впервые с высокой точностью благодаря современным спутниковым данным. На основе сравнительного анализа хода половодий разной водности, полученного по данной методике, удалось установить, что максимальная площадь заливания исследуемого района ДВ в маловодное половодье составляет 21% от площади района, в средневодное — 60%, в многоводное — 79%; многоводное половодье длится на 47 дней дольше маловодного и на 39 дней дольше средневодного; полка многоводного половодья длится в 1.5 раз дольше полки средневодного и в 1.7 раз дольше полки маловодного; разница между продолжительностью фазы спада и фазы подъема у маловодного половодья составляет 5 дней, у средневодного — 2 дня, у многоводного — 8 дней.

Полученный в данной работе ход ежедневных $F_{\text{общ}}$ рассматриваемого района ДВ для разных по водности половодий отображает ход заливания этого района, который необходимо учитывать при планировании народного хозяйства. С помощью данной методики можно выявить пространственно-временные закономерности процессов заливания разных районов ДВ при половодьях разной водности. Для этого следует использовать результаты расчетов, полученных по разработанной методике, и большое количество качественных безоблачных космоснимков (не всей дельты, а отдельных ее районов) высокого разрешения, взятых с сайтов <https://earthexplorer.usgs.gov/> и <https://www.copernicus.eu/en>.

Результаты расчетов по разработанной методике в сочетании с прогнозными метеорологическими моделями можно использовать для прогнозирования половодий. По результатам расчетов по данной методике можно рассчитывать водный баланс дельты Волги. При применении данной методики к дельтам других рек требуется учитывать их ландшафтные и гидрографические особенности при районировании.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарна академику Голицыну Георгию Сергеевичу за ценные советы и обсуждение результатов работы. Автор благодарна Полонскому Вадиму Федоровичу за руководство и поддержку на разных этапах работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

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

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

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.

Государственный водный кадастр. Раздел “Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек”.

Евдокимов С.И., Михалоп 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.: Издательство Юрайт, 2014. 674 с.

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

Козлова М.В., Сапожникова А.А., Землянов И.В., Горелиц О.В. Оценка состояния растительного покрова Волго-Ахтубинской долины на основе ДДЗЗ и анализа связи с параметрами гидрологического режима после зарегулирования стока Волги // Экологический сборник 5: труды молодых ученых Поволжья. Тольятти, 2015. С. 172–179.

Лебедева С.В. Динамика потока в многоукавном приливном устье крупной реки (на примере р. Северная Двина). Дис. канд. геогр. наук. Москва: МГУ, 2016. 211 с.

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.: Гидрометеоздат, 2003. С. 65–77.

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 3-5 октября 2007: “Водные ресурсы Волги: настоящее и будущее, проблемы управления”. Астрахань, 2008. С. 263–273.

Полонский В.Ф., Остроумова Л.П. Исследование процессов затопления, расчет и оценка изменений составляющих водного баланса дельты Волги в половодье // Материалы международной научной конференции 19-20 октября 2010: “Изменение климата и водного баланса Каспийского региона”. Астрахань, 2011. С. 119–127.

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

Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Берденгадиева А.Н., Выприцкий А.А. Динамика площадей водоемов Западного ильменно-бугрового района дельты Волги // Соврем. пробл. ДЗЗ из космоса. 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 // Современ. пробл. ДЗЗ из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 119–135.
- Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide. Atmospheric Correction Module Version 4.7. August 2009 Edition. ITT Visual Information Solutions Corporation, USA.
http://www.harrisgeospatial.com/portals/0/pdfs/envi/Flaash_Module.pdf
- 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.
- Claverie M., Ju J., Masek J.G., Dungan J.L., Vermote E.F., Roger J.-C. et al. The harmonized Landsat and Sentinel-2 data set // Remote Sens. Environ. 2018. V. 219. P. 145–161.
- 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.
- Elhag M. Consideration of Landsat-8 spectral band combination in typical Mediterranean forest classification in Halkidiki, Greece // Open Geosci. 2017. V. 9. P. 468–479.
- ENVI User's Guide. ENVI Version 4.7 & 4.7 SP1. December 2009 Edition. ITT Visual Information Solutions Corporation, USA.
http://www.harrisgeospatial.com/portals/0/pdfs/envi/ENVI_User_Guide.pdf
- 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.
- Jensen J.R. Introductory digital image processing: a remote sensing perspective. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2015. 544 p.
- 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.
- Siegmund A., Menz G. Fernes nah gebracht. Satelliten und luftbild einsatz zur analyse von umweltveränderungen im geographie unterricht // Geographie und Schule. 2005. Vol. 154. № 4. P. 2–10.
- 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.
- Zhang T.X., Su J.Y., Liu C.J., Chen W.H., Liu H., Liu G. Band selection in Sentinel-2 satellite for agriculture applications // Proc. 23rd Intern. conf. on Automation and Computing. Huddersfield, UK, 2017. P. 1–6.

Methods of Calculation of Daily Flooded Areas in the Volga Delta During the Flood Periods Based on the Remote Sensing Data

N. S. Zilitinkevich¹

¹Water Problems Institute of the RAS, Moscow, Russia

We developed methods for calculating the daily flooded areas in the Volga delta (VD) for the entire flood period using satellite data. The methodology is based on the construction of dependences of the flooding areas of the hydrographic network and interchannel spaces of VD (F_{total}) on the means of daily water levels in the channels of watercourses (H_p). F_{total} for individual flood dates were determined using satellite images. Data on H_p were taken at hydrological stations (h/s) on the same dates from the State Water Cadastre. These dependencies were used to calculate the daily flooding areas of DV with high accuracy for flood periods of different water contents (high-water, low-water and medium-water contents). This method was developed in two modifications: 1 – modification for the case of the sufficient number of satellite images to cover all the main changes in the course of each phase of the flood, 2 – modification for the case of the insufficient number of satellite images to cover all the main changes in the course of each phase of the flood. We conducted a comparative analysis of daily F_{total} obtained with high accuracy using modification 1 for floods of different water contents (high-water, low-water, medium-water contents). We revealed how floods of different water contents differ in characteristics including timing of passage, amplitude, area of maximum flooding area, duration of the rise phase, decline phase and flood plateau phase. Such calculations have never been conducted before. The results of calculations by this method allow us to identify the spatial-temporal patterns of the VD flooding under different types of water contents. Our method enables to predict the dynamics of floods and to calculate the water balance of the Volga delta.

Keywords: flood period, Volga delta, delta flooding areas, satellite images, spectral water index

REFERENCES

- 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.* Stok i urovni del'ty Volgi [Runoff and water levels of the Volga delta]. M.: Gidrometeoizdat, 1962. 337 p. (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).
- Gorelits O.V., Polonskiy V.F.* Zalivanie del'ty Volgi i vliyanie na nego izmeneniy urovniya 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).
- Gosudarstvennyy vodnyy kadastr. Razdel “Ezhegodnye dannye o rezhime i kachestve vod morey i morskikh ust'ev rek” [State Water Cadaster. Unit “Annual data on water regime and water quality of seas and sea mouths of rivers”]. (In Russian).
- Evdokimov S.I., Mikhailap 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 images 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).
- Kashkin V.B., Sukhinin A.I.* Distantionnoe zondirovanie Zemli iz kosmosa. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Remote sensing of the Earth from space. Digital image processing.] M.: Logos, 2001. 264 p. (In Russian).
- Kozlova M.V., Sapozhnikova A.A., Zemlyanov I.V., Gorelits O.V.* Otsenka sostoyaniya rastitel'nogo pokrova Volgo-Akhtubinskoy doliny na osnove DDZZ i analiza svyazi s parametrami gidrologicheskogo rezhima posle zaregulirovaniya stoka Volgi [Vegetation assessments of the Volga-Akhtuba floodplain based on remote sensing data and analysis of the parameters of hydrological regime after start of regulation of the Volga River runoff] // Ekologicheskyy sbornik 5: trudy molodykh uchenykh Povolzh'ya. Tol'yatti, 2015. P. 172–179. (In Russian).
- Lebedeva S.V.* Dinamika potoka v mnogorukavnom prilivnom ust'e krupnoy reki (na primere r. Severnaya Dvina) [Flow dynamics in highly braided tidal mouth of the large river (on the example of the Northern Dvina River)]. Dissertatsiya kandidata geograficheskikh nauk. Moskva: MGU, 2016. 211 p. (In Russian).
- Polonskiy V.F.* Landshaftnoe rayonirovanie del'ty Volgi s uchedom 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 khozyaystva. Moskva, 2003. P. 209–210. (In Russian).
- Polonskiy V.F., Gorelits O.V.* Otsenka reguliruyushey 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., 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: nastoyashee i budushee, problemy upravleniya”. Astrakhan', 2008. P. 263–273. (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).
- Rybak V.S.* O vozmozhnom zalivaniy del'ty Volgi pri rabote vododelitelya [Prediction of flooding of the Volga delta under the influence of water-separator] // Proceedings of State Oceanographic Institute. 1973. V. 116. P. 104–112. (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] // Sovremennyye 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 mnogoletnykh 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] // Sovremennyye problemy DZZ iz kosmosa. 2023. V. 20. № 3. P. 119–135. (In Russian).
- Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide. Atmospheric Correction Module Version 4.7. August 2009 Edition. ITT Visual Information Solutions Corporation, USA.
http://www.harrisgeospatial.com/portals/0/pdfs/envi/Flaash_Module.pdf
- 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.
- Claverie M., Ju J., Masek J.G., Dungan J.L., Vermote E.F., Roger J.-C. et al.* The harmonized Landsat and Sentinel-2 data set // Remote Sens. Environ. 2018. V. 219. P. 145–161.
- 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.
- Elhag M.* Consideration of Landsat-8 spectral band combination in typical Mediterranean forest classification in Halkidiki, Greece // *Open Geosci*. 2017. V. 9. P. 468–479.
- ENVI User's Guide. ENVI Version 4.7 & 4.7 SP1. December 2009 Edition. ITT Visual Information Solutions Corporation, USA. http://www.harrisgeospatial.com/portals/0/pdfs/envi/ENVI_User_Guide.pdf
- 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.
- Jensen J.R.* Introductory digital image processing: a remote sensing perspective. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2015. 544 p.
- 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.
- Siegmund A., Menz G.* Fernes nah gebracht. Satelliten und luftbild einsatz zur analyse von umweltveränderungen im geographie unterricht // *Geographie und Schule*. 2005. Vol. 154. № 4. P. 2–10.
- 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.
- Zhang T.X., Su J.Y., Liu C.J., Chen W.H., Liu H., Liu G.* Band selection in Sentinel-2 satellite for agriculture applications // *Proc. 23rd Intern. conf. on Automation and Computing*. Huddersfield, UK, 2017. P. 1–6.