

Анализ ежедневных площадей заливания районов дельты Волги в половодье с использованием спутниковых данных

Н. С. Зилитинкевич

Институт водных проблем РАН, Москва, 119333, Россия
E-mail: vodanavolge@mail.ru

Исследованы половодья разной водности в дельте Волги (ДВ). Дельта Волги имеет большое хозяйственное значение, активно используется сельским, рыбным, коммунальным хозяйством, водным транспортом, а также является высокопродуктивным нерестилищем. В работе рассчитаны ежедневные площади заливания районов ДВ за половодья разной водности за каждый год периода 2013–2016 гг. с применением большого количества данных ДЗЗ (спутников Landsat-7, Landsat-8, Sentinel-2). Выполнен сравнительный анализ районов ДВ и половодий разной водности (многоводного, маловодного, средневодного) по характеристикам хода ежедневных площадей заливания района в половодье (срокам прохождения половодья, его продолжительности, максимальной площади заливания района, максимальному среднесуточному уровню воды в водотоках района, продолжительности фаз половодья: полки, подъёма, спада). Описано, как разные районы ДВ с разными ландшафтными и гидрографическими особенностями заливаются в половодья разной водности. Результаты работы позволяют выявить пространственно-временные закономерности и отличительные особенности половодий разной водности в районах ДВ. Все характеристики половодья, кроме продолжительности полки и спада, тесно связаны с его водностью так, что чем больше водность половодья, тем больше величина его характеристик. У районов с густой сетью не крупных водотоков разной величины площадь заливания в половодье больше, чем у районов, по которым протекают крупные водотоки с широкими глубокими руслами. С использованием ежедневных площадей заливания районов ДВ можно рассчитывать их водный баланс.

Ключевые слова: половодье, дельта Волги, площади заливания районов дельты, спутниковые данные

Одобрена к печати: 17.10.2025
 DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-245-259

Введение

Дельта Волги (ДВ) — это одна из крупнейших дельт мира со сложной гидрографической сетью, площадью 13 916 км². Она богата природными ресурсами. Исследования площадей заливания ДВ ($F_{\text{общ}}$) в половодье (П) необходимы:

- для оптимального управления водным режимом ДВ;
- планирования водохозяйственных и гидротехнических мероприятий;
- предупреждения и защиты от наводнений и маловодий;
- решения экологических проблем ДВ (перечислены ниже);
- оптимального использования водных ресурсов ДВ:
 - водообеспечения сельского, рыбного, коммунального, промышленного хозяйства;
 - развития сухопутного и водного транспорта;
 - сохранения или изменения уникального и ценного видового состава флоры и фауны.

Важная особенность водного режима ДВ — сильное заливание в период П. Большие объёмы воды в период П накапливаются на обширных пространствах дельты. Поэтому ДВ — это крупное нерестилище ценных пород рыб. В маловодные годы обводнение ДВ для рыбного хозяйства недостаточное, не полностью обеспечиваются судоходные глубины. В многоводные П в ДВ создаётся угроза затоплений и подтоплений объектов хозяйства населения, прорыва дамб, размыва дорог, размыва и обрушения береговых склонов (Болгов и др., 2017; Бухарицин и др., 2017).

Зарегулирование режима стока р. Волги, пастбищное рыбководство, работы по дноуглублению в водотоках дельты, строительство искусственных дамб — всё это привело к деградации района Западных подстепных ильменей. Там гибнет большое количество рыбы, происходит опустынивание и засоление земель (Болгов и др., 2017; Бухарицин и др., 2017; Валов, Бармин, 2014; Шинкаренко и др., 2021, 2023).

База накопленных знаний об особенностях $F_{\text{общ}}$ в **П** и методах их изучения сформировала сегодняшние представления о закономерностях процессов заливания ДВ в **П** (Байдин, 1967; Болгов и др., 2014, 2017; Горелиц, Полонский, 1997; Полонский, Горелиц, 2003; Полонский, Остроумова, 2005, 2011; Рыбак, 1973; Шинкаренко и др., 2021, 2023). Ранее ДВ редко охватывалась космической съёмкой, а в настоящее время — значительно чаще, появилось большое количество спутниковых данных. Поэтому цель данной работы — изучить в разных районах ДВ пространственно-временные закономерности и отличительные особенности половодий, которые принадлежат к разным классам водности: многоводное (МН), маловодное (МЛ), средневодное (СР). Задачи настоящего исследования — дополнить современные работы, характеризующиеся точными расчётами $F_{\text{общ}}$ (Зилитинкевич, 2024а; Шинкаренко и др., 2021, 2023), а именно:

- рассчитать ежедневные $F_{\text{общ}}$ районов ДВ за **П** разной водности (МН, МЛ, СР) с применением космоснимков;
- сравнить разные районы и **П** разной водности по характеристикам хода ежедневных $F_{\text{общ}}$ районов ДВ (срокам прохождения **П**, его продолжительности, максимальной площади заливания района, максимальному среднесуточному уровню воды в водотоках района, продолжительности фаз **П**: полки, подъёма, спада).

Методика расчёта ежедневных площадей заливания района дельты Волги в половодье

Районирование дельты Волги и исследуемые районы дельты Волги

В работе использовано районирование В. Ф. Полонского (2003), разделяющее ДВ на 16 районов по 5 признакам: ландшафтные и гидрографические особенности; географическое положение; степень антропогенной освоенности; расчленённость дельты дамбами и дорогами; характеристики заливания в **П** (рис. 1, см. с. 247).

Сделан расчёт ежедневных $F_{\text{общ}}$ районов Р1, Р7, Р11, так как имеется большое количество космоснимков этих районов, достаточное для того, чтобы охватить все основные изменения хода каждой фазы **П**. С района Р1 начинается ДВ. Его территория расположена в верхней зоне ДВ вдоль русла р. Волги на участке от вершины дельты до г. Астрахани. В районе Р1 сосредоточена наибольшая часть речного стока воды. В р. Волге в верхней части района Р1 речной сток воды составляет 54–65 % от суммарного речного стока воды, поступающего в ДВ, так как в этот район поступает вода р. Волги в вершине ДВ (карты ДВ: (Алексеевский и др., 1997); <https://www.google.com/earth/>). Территория района Р7 расположена в верхней зоне ДВ вдоль водотоков рек Бузан, Шмагина, Белый Ильмень на участке от вершины ДВ до с. Новый Рычан. Район Р7 начинается в месте отделения от р. Волги рукава Бузана. В истоке р. Бузан речной сток воды составляет 29–36 % от суммарного речного стока воды, поступающего в ДВ (карты ДВ: (Алексеевский и др., 1997); <https://www.google.com/earth/>). Территория района Р11 расположена в средней зоне ДВ вдоль водотоков рек Бузан, Кривой Бузан, Большая Сумница на участке от с. Красный Яр до истока р. Широкая. Река Бузан — это крупнейший из пяти крупных магистральных рукавов р. Волги. Речная система Бузана наиболее крупная в ДВ (занимает 43 % площади ДВ) (карты ДВ: (Алексеевский и др., 1997); <https://www.google.com/earth/>).

Достаточное количество космоснимков **П** мы имеем в том случае, когда число дат космической съёмки составляет: больше 12 % от числа всех дат МН **П**; больше 14 % от числа всех дат СР **П**; больше 17 % от числа всех дат МЛ **П**. В противоположном случае мы имеем недо-

статочное количество космоснимков Π . На *рис. 4* далее показан ход ежедневных $F_{\text{общ}}$ районов за Π разной водности. На графиках хода ежедневных $F_{\text{общ}}$ районов за Π каждая точка — это каждый день Π . Для построения хода ежедневных $F_{\text{общ}}$ районов за Π без погрешности требуются космоснимки районов за каждый день Π , т.е. в количестве 100 % от числа всех дат Π . По графикам хода ежедневных $F_{\text{общ}}$ районов за Π разной водности определяются точки — дни Π , которые охватывают все основные изменения каждой фазы Π : подъёма, полки, спада. Это те точки, через которые можно провести интерполяционные линии, отображающие направление распространения данных на графике. Так, за МН Π 2013 и 2016 гг. минимальное количество дней космической съёмки составляет 12 % от числа всех дат этих Π , за СР Π 2014 г. — 14 % от числа всех дат этого Π , за МЛ Π 2015 г. — 17 % от числа всех дат этого Π .

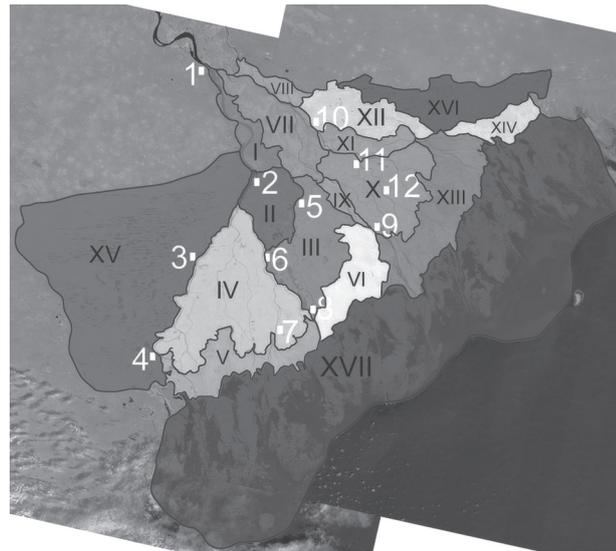


Рис. 1. Районирование ДВ на основе съёмки спутника Landsat-7. I–XVI — номера районов, XVII — мелкая зона устьевое взморья ДВ. Белые прямоугольники — гидрологические посты (г/п): 1 — с. Верхнее Лебяжье, 2 — г. Астрахань, 3 — с. Икряное, 4 — с. Оля, 5 — с. Килинчи, 6 — г. Камызяк, 7 — с. Караульное, 8 — с. Каралат, 9 — с. Зеленга, 10 — с. Красный Яр, 11 — пос. Володарский, 12 — с. Большой Могой

Расчёт ежедневных $F_{\text{общ}}$ районов P1, P7, P11 сделан за Π разной водности (МН, МЛ, СР) 2013, 2014, 2015, 2016 гг. по следующим причинам:

- Половодья, формирующиеся в условиях зарегулированного режима стока р. Волги (1961 – настоящее время), классифицируются по водности: МН, МЛ, СР, экстремально (Э) МЛ, Э МН.
- В выбранные Π 2013, 2014, 2015, 2016 гг. проводилась частая космическая съёмка исследуемых районов P1, P7, P11, и эти Π принадлежат к разным классам водности (МН Π 2013 и 2016 гг., МЛ Π 2015 г., СР Π 2014 г.).
- Это позволило выявить отличительные особенности Π разной водности по характеристикам.

В работе исследуются Π , относящиеся к разным классам водности, за 56-летний период с 1961 по 2016 г. Режим стока р. Волги является зарегулированным с 1961 г. по настоящее время. Были выбраны Π 2013, 2014, 2015, 2016 гг., так как большое количество космоснимков ДВ появилось после 2013 г., а до 2013 г. их было мало, поскольку космическая съёмка дельты в то время проводилась редко. На *рис. 2а* (см. с. 248) показана водность Π всех лет с 1988 по 2016 г. (по двум годам нет данных). Частота СР Π — 15 Π за 27 лет, частота МЛ — 4 Π за 27 лет, частота МН — 8 Π за 27 лет. На *рис. 2б* показана водность всех лет с 1961 по 2016 г. Частота СР лет — 18 лет за 56 лет, частота МЛ лет — 21 год за 56 лет, частота МН лет — 17 лет

за 56 лет. На *рис. 2в* показана водность весенне-летних периодов всех лет с 1961 по 2016 г. Частота СР весенне-летних периодов — 18 периодов за 56 лет, частота МЛ весенне-летних периодов — 19 периодов за 56 лет, частота МН весенне-летних периодов — 19 периодов за 56 лет.

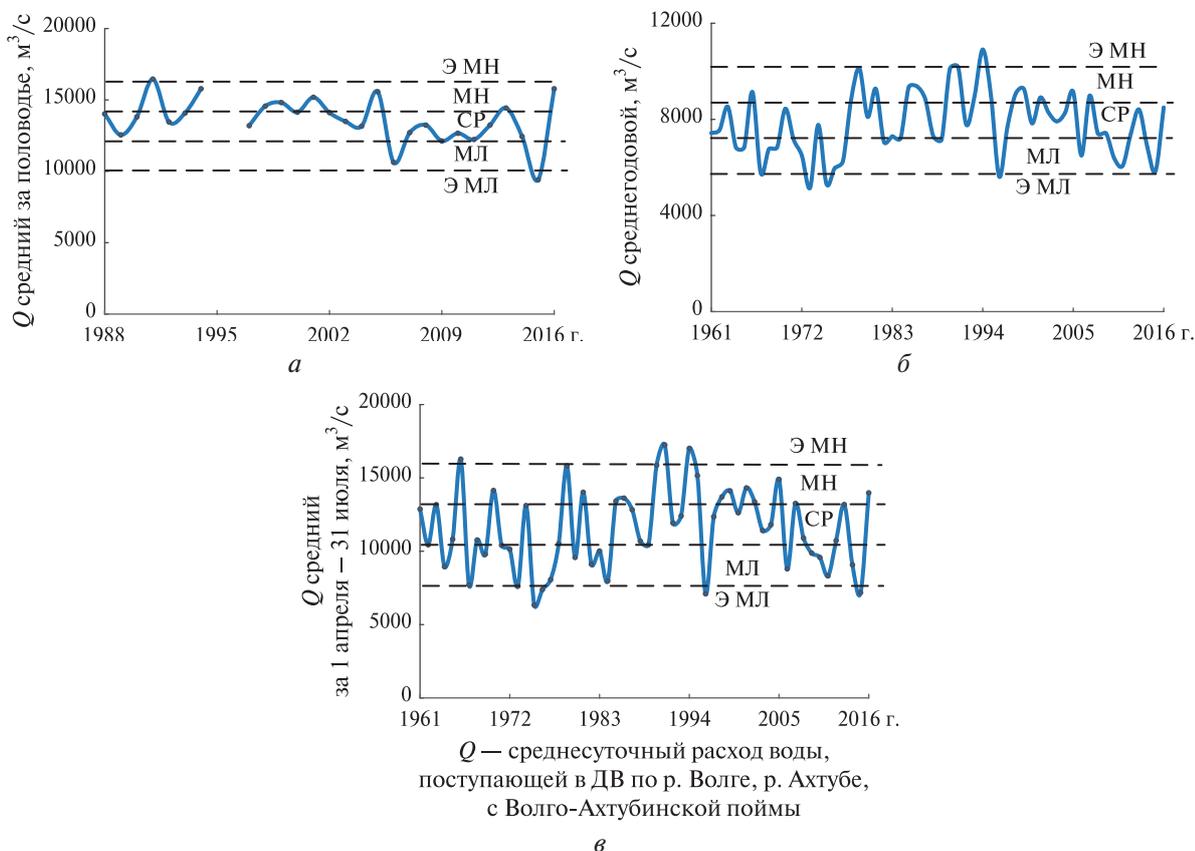


Рис. 2. Водность П всех лет с 1988 по 2016 г. (*а*), водность всех лет с 1961 по 2016 г. (*б*), водность весенне-летних периодов с 1 апреля по 31 июля всех лет с 1961 по 2016 г. (*в*)

Исходные данные

Исходный материал для расчёта ежедневных $F_{\text{общ}}$ районов Р1, Р7, Р11:

- космоснимки спутников Landsat-7 (разрешение 30 м), Landsat-8 (разрешение 30 м), Sentinel-2 (разрешение 20 м) районов Р1, Р7, Р11 ДВ (взяты с сайтов <https://earthexplorer.usgs.gov/> и <https://www.copernicus.eu/en>);
- данные по среднесуточным уровням воды на г/п в водотоках H_p районов Р1, Р7, Р11 (см. *рис. 1*), полученные из Государственного водного кадастра.

Диапазон космических съёмок по годам: 2013–2016 (4 года), по датам: 1 апреля–1 сентября (охватывает все фазы П разной водности и фазу межени).

Большое количество космоснимков ДВ появилось после 2013 г., а до 2013 г. их было мало, так как космическая съёмка дельты в то время проводилась редко. В разные годы спутники проводили космическую съёмку дельты Волги с различными интервалами во времени. С 1986 по 2012 г. ДВ лишь иногда охватывалась космической съёмкой с разрешением 30 м (Landsat-5, Landsat-7). С 2013 г. увеличилась частота её космической съёмки с разрешением 30 м (Landsat-7, Landsat-8), а с 2015 г. космическая съёмка спутниками ДВ стала ещё чаще осуществляться с разрешением 30 и 20 м (Landsat-7, Landsat-8, Sentinel-2). Поэтому методика расчёта ежедневных $F_{\text{общ}}$ разбивается на две: 1 — методика с использованием количе-

ства космоснимков, достаточного для того, чтобы охватить все основные изменения хода каждой фазы **П**; 2 — методика с использованием количества космоснимков, недостаточного для того, чтобы охватить все основные изменения хода каждой фазы **П**. Проверка точности методик 1 и 2 была проведена с применением статистического анализа и оценена как высокая (Зилитинкевич, 2024а).

В период до 2016 г. одни районы дельты удастся рассчитать по методике 1, другие — по методике 2, а есть районы, по которым безоблачные качественные космоснимки дельты отсутствуют, и нет возможности рассчитать ни по одной из методик. Из-за увеличения частоты космических съёмок дельты с 2017 г. стало можно рассчитывать большинство районов по методикам 1 и 2 (большая часть районов по методике 1). А с запуском спутника Landsat-9 в 2021 г. дельта стала почти полностью охватываться космической съёмкой (достаточной для того, чтобы охватить все основные изменения хода каждой фазы **П**): в среднем раз в 6–7 дней на 60–87 % в зависимости от облачности. Поэтому большинство районов ДВ доступны для исследований. В ДВ есть районы, исследование которых в **П** представляет большую сложность, есть районы, исследование которых в **П** представляет среднюю сложность (Зилитинкевич, 2024а, б).

Определение площадей заливания

Площади заливания $F_{\text{общ}}$ районов P1, P7, P11 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. Разработан спектральный индекс для отделения воды от суши на космоснимках — модифицированный нормализованный относительный индекс воды MNDWI (*англ.* Modified Normalized Difference Water Index) (Xu, 2006):

$$\text{MNDWI} = (\text{Green} - \text{SWIR}) / (\text{Green} + \text{SWIR}),$$

где Green — это коэффициент отражения объектом электромагнитного излучения зелёного спектрального канала, SWIR — это коэффициент отражения объектом электромагнитного излучения коротковолнового инфракрасного спектрального канала. Индекс MNDWI выделяет воду на космоснимках с разрешением не менее 40 м с высокой точностью (Buma et al., 2018; Du et al., 2016; Kwang et al., 2017; Szabó et al., 2016; Xu, 2006). В работе (Зилитинкевич, 2024б) подробно описан MNDWI как индекс отделения воды от суши на космоснимках, подходящий для условий периода **П** в ДВ. В публикации (Зилитинкевич, 2024а) детально рассмотрено применение спектрального алгоритма (Xu, 2006) в районе ДВ для выделения залитых водой участков на космоснимках в **П**. По алгоритму (Xu, 2006) в настоящей работе $F_{\text{общ}}$ рассчитывались за 104 даты **П** в ДВ, а значит было использовано 104 космоснимка.

Построение петли половодья

Петля **П** состоит из линий интерполяции, последовательно соединяющих все точки на графике зависимости $F_{\text{общ}}$ от H_p , на котором каждая точка получена за конкретную дату половодья. Петли **П** для каждого года по каждому району строились методом В. Ф. Полонского и Л. П. Остроумовой (2005) (если космическая съёмка охватила все основные изменения хода каждой фазы **П**, дату пика **П**, дату выхода воды за пределы русел водотоков) и методом Н. С. Зилитинкевич (2024а) (если космическая съёмка не охватила все основные изменения хода каждой фазы **П**, дату пика **П**, дату выхода воды за пределы русел водотоков) с использованием графиков зависимости $F_{\text{общ}}$ от H_p : $F_{\text{общ}} = f(H_p)$. Из ежегодников брались H_p на г/п районов, соответствующие по дате (число, месяц, год) космической съёмки рассчитанным по космоснимкам по алгоритму (Xu, 2006) $F_{\text{общ}}$. Все точки фазы межени и всех фаз **П** на графиках $F_{\text{общ}} = f(H_p)$, полученные с использованием космоснимков и ежегодников, соединялись

линиями интерполяции. Точки и их количество на каждом графике $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ подбирались для проведения линий интерполяции с помощью гидрографа ежедневных H_p на г/п районов, построенного за П. На гидрографе выявлялись все основные изменения хода каждой фазы П, переход от фазы межени к фазе подъёма П, пик П. Точки для каждой линии интерполяции подбирались в соответствии с этими изменениями. По линиям интерполяции прокладывались петли П каждого года по каждому району.

Методика расчёта ежедневных $F_{\text{общ}}$ разбивается на две: 1 — методика с использованием количества космоснимков достаточного для того, чтобы охватить все основные изменения хода каждой фазы П; 2 — методика с использованием количества космоснимков недостаточного для того, чтобы охватить все основные изменения хода каждой фазы П. На рис. 3 показаны петли П разной водности на графиках зависимости $F_{\text{общ}}$ от H_p в районах ДВ. Если даты космической съёмки охватывают все основные изменения каждой фазы П (подъёма, полки, спада), то каждая точка на графиках зависимости $F_{\text{общ}}$ от H_p соответствует дате космической съёмки и петля П строится по методике 1. Если даты космической съёмки охватывают не все основные изменения каждой фазы П (подъёма, полки, спада), то не все точки на графиках зависимости $F_{\text{общ}}$ от H_p соответствуют дате космической съёмки и петля П строится по методике 2. По методике 2 петля П для района строится с использованием космоснимков, полученных за П, сходные с исследуемым по водности и форме гидрографа ежедневных H_p . Проверкой сходства служит статистический анализ, который показывает линейную связь между исследуемым и сходным половодьем (Зилитинкевич, 2024а).

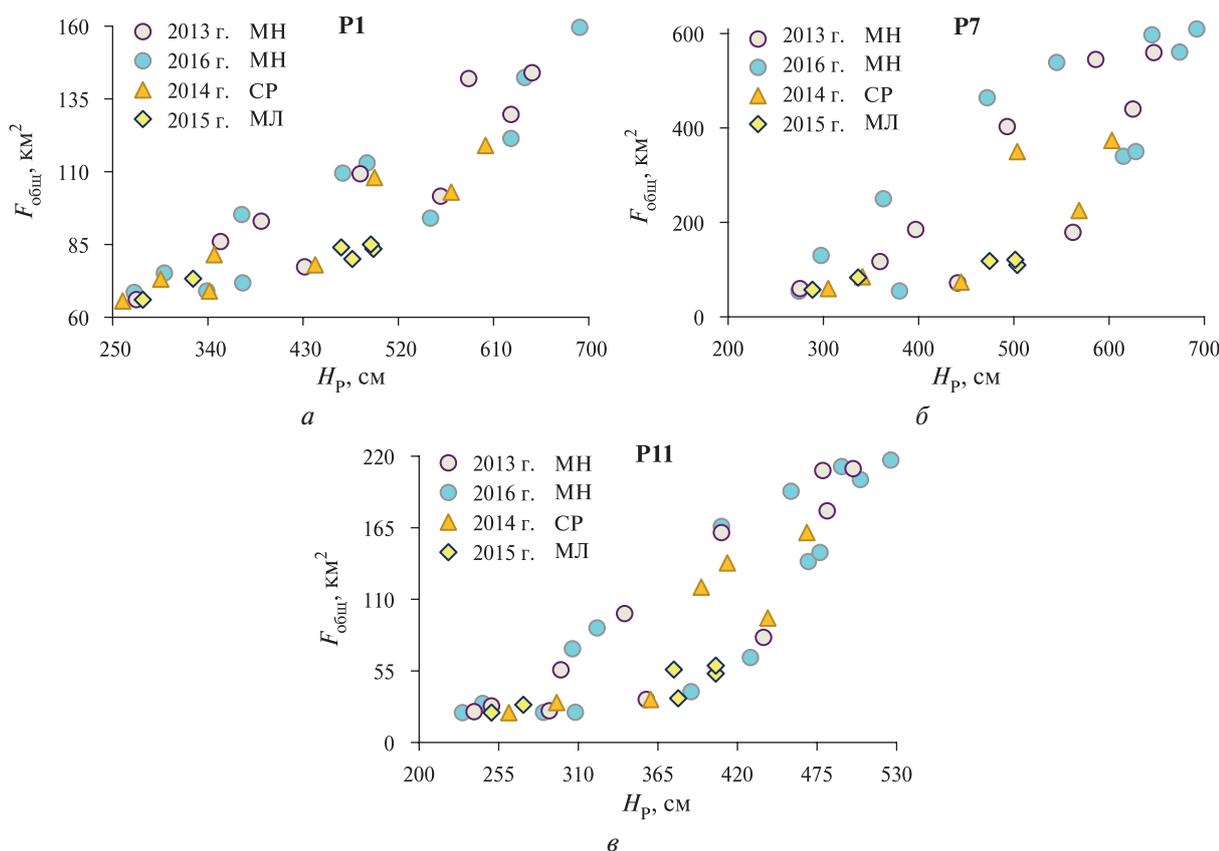


Рис. 3. Петли П разной водности 2013, 2014, 2015, 2016 гг. в районах: а — P1; б — P7; в — P11

Расчёт ежедневных площадей заливания районов

Ежедневные $F_{\text{общ}}$ районов рассчитывались методом Полонского и Остроумовой (2005). В уравнение каждой интерполяционной линии петли П района на графике $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ подставлялись ежедневные H_p на г/п района. Так рассчитывались ежедневные $F_{\text{общ}}$ района

за **П** и за фазу межени. Точность расчёта ежедневных $F_{\text{общ}}$ районов за **П** и за фазу межени с помощью вышеописанной петли **П** оценена в работе (Зилитинкевич, 2024а) как высокая. Метод требует космоснимки с разрешением не менее 40 м. Ведь гидрографическая сеть ДВ сложна и изменчива. Особую сложность и изменчивость она приобретает в период **П**. В ДВ множество рукавов, протоков, крупных и мелких озёр. В период **П** появляются и исчезают водотоки, наполняются и усыхают ерики, среди которых много мелких водотоков и ериков. Площади заливания $F_{\text{общ}}$ районов ДВ ежедневно увеличиваются на подъёме **П**, уменьшаются на спаде и стабилизируются в период полки **П** (Байдин, 1962). Всё это можно отследить только по космоснимкам с разрешением не менее 40 м (Зилитинкевич, 2024б).

Результаты

Петли половодий разной водности в районах дельты Волги

Петли **П** разной водности (МН 2013 г., СР 2014 г., МЛ 2015 г., МН 2016 г.) в районах Р1, Р7, Р11 на $F_{\text{общ}} = f(H_p)$ состоят из отрезка межени, ветви подъёма **П** и ветви спада **П** (см. рис. 3).

В районах Р1, Р7, Р11 у **П** разной водности (2013, 2014, 2015, 2016):

- В каждом районе у **П** разной водности ветви подъёма различаются по конфигурации; ветви спада **П** различаются по конфигурации; петли **П** различаются по ширине.
- При каждом **П** у разных районов ветви подъёма **П** различаются по конфигурации; ветви спада **П** различаются по конфигурации; петли **П** различаются по ширине.
- В каждом районе у **П** разной водности чем больше водность **П**, тем больше длина ветвей подъёма и спада **П**; самая узкая петля у МЛ **П** 2015 г., самая широкая петля у МН **П** 2016 г. (так как в МЛ **П** заливание и усыхание районов происходит быстрее, чем в МН **П**).
- В каждом районе у **П** разной водности в начале подъёма **П** направления движения ветвей подъёма определяются одним и тем же углом поворота траектории; в начале спада **П** направления движения ветвей спада определяются разными углами поворота траектории. Потому что в каждом районе у **П** разной водности подъём **П** начинается при одном и том же H_p , при котором начинается выход воды за пределы русел на сушу; спад **П** начинается при разных H_p , которые наступают после фазы полки **П**.

Характеристики половодий разной водности в районах дельты Волги

На рис. 4 (см. с. 252) показан ход ежедневных $F_{\text{общ}}$ районов Р1, Р7, Р11 за **П** разной водности, полученный по вышеописанной методике. Это позволило впервые провести точный сравнительный анализ разных районов и **П** разной водности по характеристикам хода ежедневных $F_{\text{общ}}$ районов ДВ.

Сравнительный анализ хода ежедневных $F_{\text{общ}}$ районов Р1, Р7, Р11 в **П** МН₁ 2013 г., МН₂ 2016 г., СР 2014 г., МЛ 2015 г. заключается в следующем (таблица, рис. 5–7, см с. 253–255). В районах Р1, Р7, Р11 МН₁ **П** начинается в начале апреля и заканчивается в конце июля, МН₂ **П** начинается в начале (или перед началом) третьей декады апреля и заканчивается в начале третьей декады июля. Маловодное половодье начинается в начале мая и заканчивается в самом конце июня, СР **П** начинается в конце апреля. В районах Р1, Р7 (районы верхней зоны ДВ) СР **П** заканчивается в начале третьей декады июля, а в районе Р11 (район средней зоны ДВ) — в конце июня, так как в районах Р1, Р7 русла основных водотоков более широкие, чем в районе Р11, и в эти районы распределяется наибольшая часть речного стока, поступающего в ДВ (описано выше в разделе «Районирование дельты Волги и исследуемые районы дельты Волги»). Все характеристики **П** (таблица), кроме продолжительности полки и спада, тесно связаны с его водностью так, что чем больше водность **П**, тем больше величина его характеристик. Продолжительность полки **П** может быть разная независимо от водности **П**. Продолжительность спада **П** у МН **П** больше, чем у МЛ **П**, но может оказаться как больше, так и меньше, чем у СР **П**.

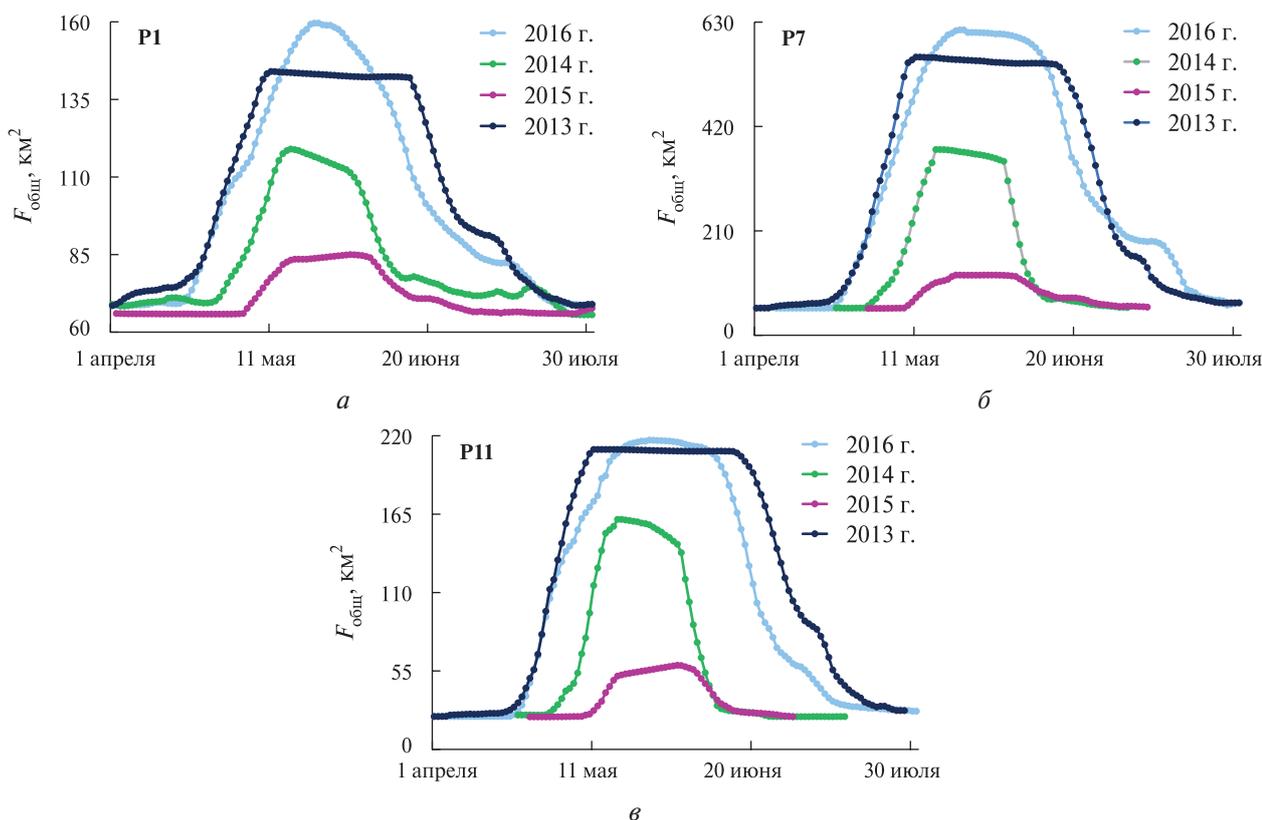


Рис. 4. Ход ежедневных $F_{общ}$ за П разной водности 2013, 2014, 2015, 2016 гг. в районах: а — P1; б — P7; в — P11

Характеристики половодий разной водности в районах P1, P7, P11 ДВ

Год	Тип	Район	Сроки прохождения	Продолжительность П, дни				$F_{общ макс.}$		Площадь, км ²	$H_{P макс.}$, см		
				всего	полка	подъём	спад	км ²	доля, %				
2013	МН ₁	P1	03.04–25.07	113	38	35	40	144	от F_{P1}	48	F_{P1}	303	647
		P7	05.04–25.07	111	38	33	40	560	от F_{P7}	76	F_{P7}	737	647
		P11	05.04–25.07	111	39	33	39	210	от F_{P11}	78	F_{P11}	269	500
2014	СР	P1	26.04–20.07	85	17	18	50	119	от F_{P1}	39	F_{P1}	303	603
		P7	28.04–20.07	83	17	18	48	374	от F_{P7}	51	F_{P7}	737	603
		P11	29.04–24.06	56	18	15	23	161	от F_{P11}	60	F_{P11}	269	468
2015	МЛ	P1	04.05–30.06	57	22	10	25	85	от F_{P1}	28	F_{P1}	303	497
		P7	08.05–29.06	52	16	12	24	121	от F_{P7}	16	F_{P7}	737	504
		P11	08.05–24.06	47	19	9	19	59	от F_{P11}	22	F_{P11}	269	405
2016	МН ₂	P1	18.04–21.07	94	17	28	49	160	от F_{P1}	53	F_{P1}	303	692
		P7	20.04–21.07	92	17	26	49	614	от F_{P7}	83	F_{P7}	737	692
		P11	20.04–20.07	91	17	26	48	217	от F_{P11}	81	F_{P11}	269	526

Район P1 верхней зоны ДВ площадью 303 км² узкий и вытянутый вдоль русла р. Волги (см. рис. 1, 6, 7). Его гидрографическая сеть состоит из русла р. Волги, протоков, образующихся в результате дробления рукавов, пойменных и дельтовых озёр на луговых равнинах. В пик МЛ П район P1 заливается на 28 % от всей своей площади, не затапливается 72 % района. В пик МН П район P1 заливается на 53 % от всей своей площади, не затапливается 47 %

района. В период **II** интенсивно затопляются межрусловые острова, разделённые мигрирующими водотоками, и понижения рельефа возле русла р. Волги.

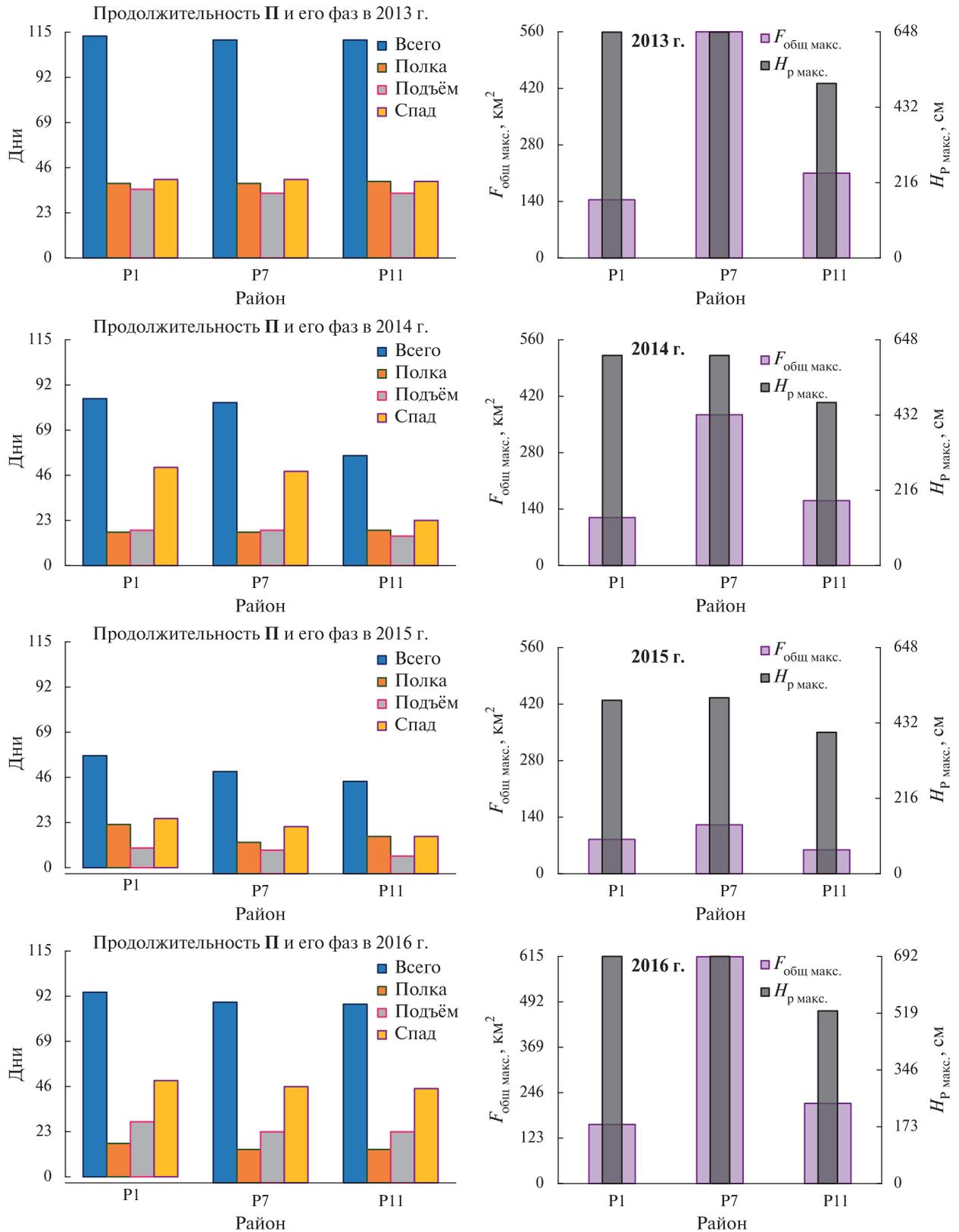


Рис. 5. Графики характеристик II разной водности (МН 2013 г., СР 2014 г., МЛ 2015 г., МН 2016 г.) в районах P1, P7, P11 ДВ, выполненные по II

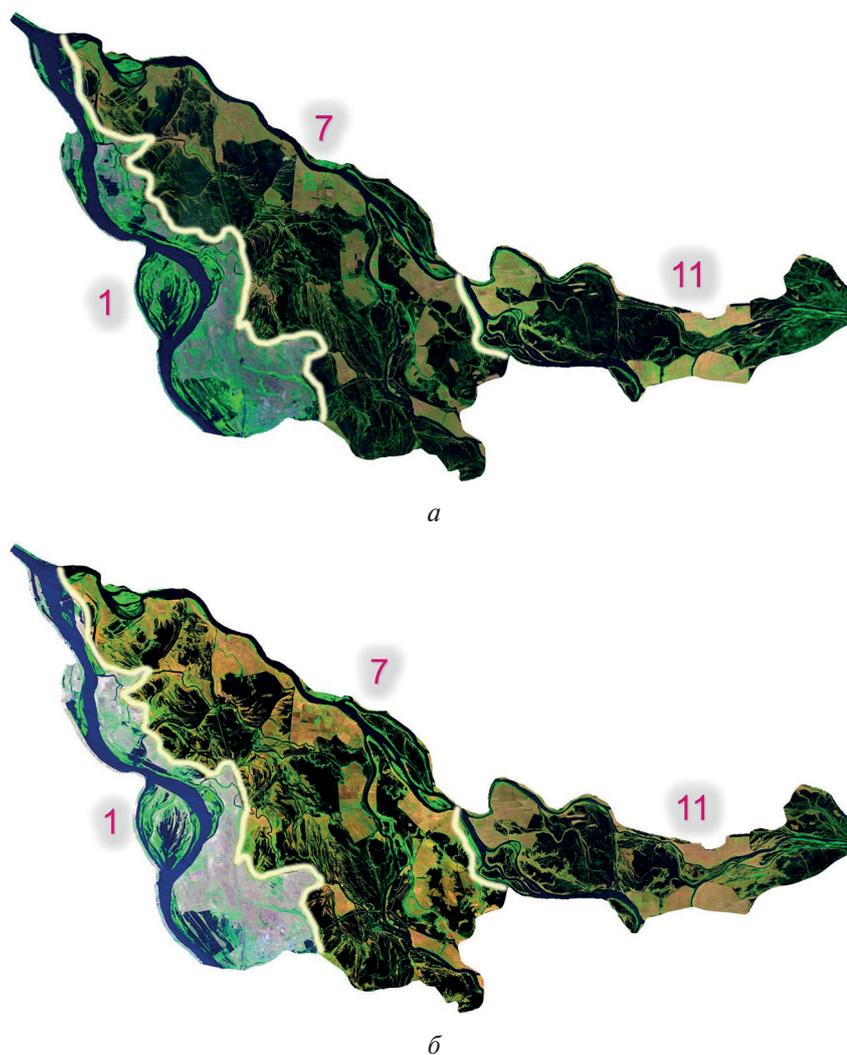


Рис. 6. Снимки спутника Landsat-8: *а* — пик МН₁ П 2013 г., районы Р1 (22 мая), Р7, Р11 (23 мая) (полка П); *б* — пик СР П 2014 г., районы Р1 (изменены яркость и контрастность), Р7, Р11 (17 мая) (полка П). Жёлтыми линиями показаны границы районов

Район Р7 крупнейший район верхней зоны ДВ площадью 737 км² (см. рис. 1, 6, 7). По его правому краю протекает крупный рукав р. Волги — р. Бузан. Обширные пространства района Р7 занимают луга и пойменные леса. Территорию района Р7 занимает пойменно-дельтовая равнина, пересечённая сетью речных рукавов и соединяющих их протоков и ериков. Здесь крупные водотоки имеют свою разветвлённую речную систему, встречаются временные и постоянные мелководные водотоки. Разливы половодных вод в пик МН П здесь покрывают 83 % от всей площади района, остаются острова суши, занимающие 17 % района. В пик МЛ П район Р7 заливается на 16 %, становясь прорезанным водотоками различной ширины, понижения рельефа заливаются возле русел водотоков, не затопливается 84 % района.

Одна четверть территории района Р11 площадью 269 км² (см. рис. 1, 6, 7) находится в верхней зоне ДВ, остальная его часть — в средней зоне ДВ. По его краям в западной части протекают реки Бузан и Кривой Бузан. Район Р11 представляет собой пойменно-дельтовую равнину, прорезанную крупными водотоками. Здесь встречаются временные и постоянные мелководные водотоки, временные и постоянные водные объекты, образующиеся в результате дробления рукавов. Разливы половодных вод в пик МН П здесь покрывают 81 % от всей площади района, 19 % района не затопливается. В пик МЛ П район Р11 заливается на 22 % в западной части, возле центральной части района и в восточной части возле края района, на 78 % район остаётся незатопленным.

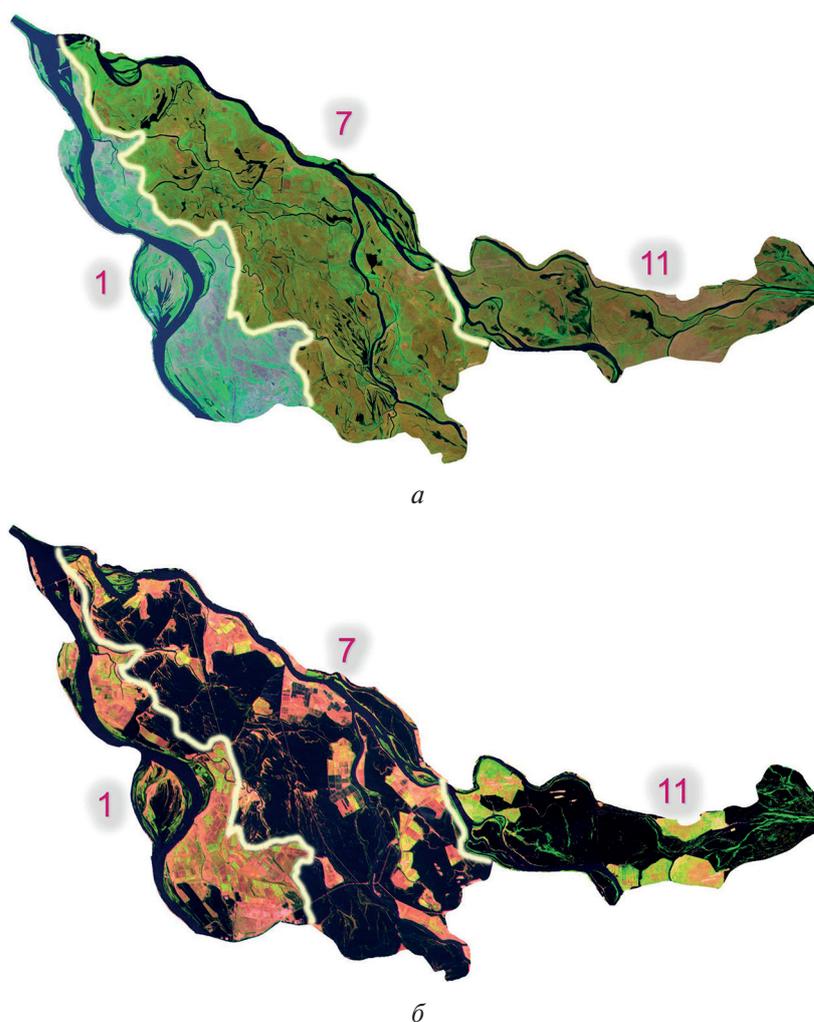


Рис. 7. Снимки спутников: *а* — Landsat-8, пик МЛ П 2015 г., районы P1 (изменены яркость и контрастность), P7, P11 (20 мая) (полка П); *б* — Sentinel-2, пик МН₂ П 2016 г., районы P1, P7 (изменены цвета), P11 (27 мая) (полка П). Жёлтыми линиями показаны границы районов

Выводы

Рассчитаны впервые точные ежедневные площади заливания ($F_{\text{общ}}$) районов P1, P7, P11 дельты Волги (ДВ) за четыре половодья (П) разной водности (два многоводных, одно маловодное, одно средневодное) периода 2013–2016 гг. методом Полонского и Остроумовой (2005) (если космическая съёмка охватила все основные изменения хода каждой фазы П, дату пика П, дату выхода воды за пределы русел водотоков) и методом Зилитинкевич (2024а) (если космическая съёмка не охватила все основные изменения хода каждой фазы П, дату пика П, дату выхода воды за пределы русел водотоков) с применением большого количества космоснимков (3 П в районе P11 рассчитаны не впервые (Зилитинкевич, 2024а)). Впервые выполнен точный сравнительный анализ хода ежедневных $F_{\text{общ}}$ районов P1, P7, P11 ДВ за 4 П разной водности по характеристикам (сроки П, площадь максимального заливания района, максимальный среднесуточный уровень воды на г/п, продолжительность П и его фаз: подъёма, спада, полки). Сравнивались П разной водности и различные районы по характеристикам хода ежедневных $F_{\text{общ}}$ районов. Точность метода расчётов оценена как высокая с применением статистического анализа в работе (Зилитинкевич, 2024а). Выявлены в районах P1, P7, P11 ДВ пространственно-временные закономерности и отличительные особенности П разной водности (два многоводных, одно маловодное, одно средневодное) периода 2013–2016 гг. по характеристикам хода ежедневных $F_{\text{общ}}$.

Экологические проблемы в ДВ остаются нерешёнными (перечислены во введении). Поэтому важно исследовать ход П разной водности в ДВ (от самых маловодных до самых многоводных). Это необходимо для оптимизации мероприятий, улучшающих обводнение ДВ; планирования водохозяйственных и гидротехнических работ; предупреждения и защиты от наводнений и маловодий и т. д. (перечислено во введении). Поэтому в ходе исследований ежедневных $F_{\text{общ}}$ районов ДВ нужно стремиться охватывать больше районов ДВ (включая районы, изучение которых в П представляет среднюю и большую сложность) и расширять период исследований.

Ежедневные $F_{\text{общ}}$ районов ДВ являются входными данными модели водного баланса ДВ Полонского и Остроумовой (2005), которая рассчитывает ежедневные параметры водного баланса районов ДВ.

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

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2025-0001 Государственного задания ИВП РАН.

Литература

1. Алексеевский Н. И., Афанасьева Н. А., Горелец О. В., Кирьянов С. В., Кортаев В. Н., Лупачев Ю. В., Михайлов В. Н., Полонский В. Ф., Серебренникова Н. А., Симонова О. А., Скрипунов Н. А., Филиппов Ю. Г. Устьевая область Волги: гидролого-морфологические процессы, режим загрязняющих веществ и влияние колебаний уровня Каспийского моря. М.: ГЕОС, 1997. 278 с.
2. Байдин С. С. Сток и уровни дельты Волги. М.: Гидрометеиздат, 1962. 337 с.
3. Байдин С. С. О заливаемости дельты Волги в условиях зарегулированного стока // Тр. ГОИН. 1967. Вып. 89. С. 67–71.
4. Болгов М. В., Красножон Г. Ф., Шаталова К. Ю. Компьютерная гидродинамическая модель Нижней Волги // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 1. С. 10–23. DOI: 10.7868/S0321059614010040.
5. 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.
6. Бухарицин П. И., Полонский В. Ф., Остроумова Л. П. Устойчивое водообеспечение Западных под-степных ильменей дельты Волги. Beau Bassin: Lambert Academic Publishing, 2017. 127 с.
7. Валов М. В., Бармин А. Н. Современные тенденции изменения гидрологических условий в дельте реки Волги // Международный научно-практич. конф. «Региональные проблемы водопользования в изменяющихся климатических условиях». Уфа: Аэтерна, 2014. С. 96–99.
8. 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.
9. Зилитинкевич Н. С. (2024а) Методика расчета ежедневных площадей заливания района дельты Волги в половодье с использованием спутниковых данных // Исслед. Земли из космоса. 2024. № 3. С. 78–93. DOI: 10.31857/S0205961424030065.
10. Зилитинкевич Н. С. (2024б) Обзор исследований площадей заливания и водного баланса дельты Волги в половодье // Исслед. Земли из космоса. 2024. № 5. С. 82–110. DOI: 10.31857/S0205961424050069.
11. Полонский В. Ф. Ландшафтное районирование дельты Волги с учетом ее хозяйственной освоенности и характера затопления в половодье // Тезисы докл. Всероссийского конгресса работников водного хозяйства. М., 2003. С. 209–210.
12. Полонский В. Ф., Горелиц О. В. Оценка регулирующей роли дельты Волги при пропуске половодья // Гидрометеоролог. аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. СПб.: Гидрометеиздат, 2003. С. 65–77.
13. Полонский В. Ф., Остроумова Л. П. Новая водно-балансовая модель дельты Волги, как средство для оптимального управления ее водным режимом // Эколог. системы и приборы. 2005. № 12. С. 37–48.
14. Полонский В. Ф., Остроумова Л. П. Исследование процессов затопления, расчет и оценка изменений составляющих водного баланса дельты Волги в половодье // Материалы Международ. науч. конф. «Изменение климата и водного баланса Каспийского региона». Астрахань, 2011. С. 119–127.
15. Рыбак В. С. Потери стока воды в Волго-Ахтубинской пойме и в дельте Волги // Тр. ГОИН. 1973. Вып. 116. С. 82–96.

16. Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Берденгалиева А. Н., Выприцкий А. А. Динамика площадей водоёмов Западного ильменно-бугрового района дельты Волги // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 285–290. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-285-290.
17. Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Богодухов М. А. и др. Классификация пойменных земель Нижней Волги на основе многолетних данных дистанционного зондирования и гидрологической информации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 119–135. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-119-135.
18. 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. Article 2082. 24 p. DOI: 10.3390/s18072082.
19. Du Y., Zhang Y., Ling F. et al. 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. Article 354. 19 p. DOI: 10.3390/rs8040354.
20. ENVI User's Guide. ENVI Version 4.7 and 4.7 SP1. Dec. 2009 Ed. ITT Visual Information Solutions Corporation, USA, 2009.
21. Kwang C., Osei E. M., Jnr, Amoah A. S. Comparing of Landsat 8 and Sentinel 2A using water extraction indexes over Volta River // J. Geography and Geology. 2017. V. 10. 7 p. DOI: 10.5539/jgg.v10n1p1.
22. Szabó S., Gácsi Z., Balázs B. Specific features of NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories // Acta Geographica Debrecina. Landscape and Environment Ser. 2016. V. 10. P. 194–202. DOI: 10.21120/LE/10/3-4/13.
23. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // Intern. J. Remote Sensing. 2006. V. 27. No. 14. P. 3025–3033. DOI: 10.1080/01431160600589179.

Analysis of daily flooded areas in Volga delta during flood periods based on remote sensing data

N. S. Zilitinkevich

*Water Problems Institute RAS, Moscow 119333, Russia
E-mail: vodanavolge@mail.ru*

The flood periods with different water content in the Volga delta (VD) were investigated. The Volga delta is of great economic importance, it is actively used in agriculture, fishery, communal services, water transport. Also, it is a highly productive spawning area. We calculated daily flooded areas of VD regions for flood periods of different water content with high accuracy for each year from 2013 to 2016. We used a large amount of satellite remote sensing data (from Landsat-7, Landsat-8, Sentinel-2). We made comparative analysis of daily flooded areas of VD regions based on the flooding characteristics (dates of flood period, maximum flooded area, duration of flood, duration of flood phases, i.e. flood rising period, flood recession period, flood stabilization period, maximum daily average water levels in the watercourses) for flood periods of different water content and for different VD regions. We analyzed how different VD regions with various landscape and hydrographic features are flooded during the flood periods of different water content. The results of the work can be used to identify spatial-temporal patterns and distinctive features of floods with different water content in VD regions. All the flood characteristics except duration of flood stabilization and flood recession periods are positively related to water content of the flood. In regions with dense network of small watercourses of different sizes, during flood period, flooded area is larger than in regions with large watercourses with wide deep riverbeds. The use of daily flooded areas of VD regions calculated with high accuracy can help determine the water balance of VD regions.

Keywords: flood period, Volga delta, flooded areas of delta regions, remote sensing data

Accepted: 17.10.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-245-259

References

1. Alekseevskii N. I., Afanas'eva N. A., Gorelets O. V., Kir'yanov S. V., Korotaev V. N., Lupachev Yu. V., Mikhailov V. N., Polonskii V. F., Serebrennikova N. A., Simonova O. A., Skripunov N. A., Filippov Yu. G., *Ust'evaya oblast' Volgi: gidrologo-morfologicheskie protsessy, rezhim zagryaznyayushchikh veshchestv i vliyaniye kolebanii urovnya Kaspiiskogo morya* (The Volga River Mouth: Hydrological and morphological processes, regime of pollutants and fluctuations of the level of the Caspian Sea), Moscow: GEOS, 1997, 278 p. (in Russian).
2. Baydin S. S., *Stok i urovni del'ty Volgi* (Runoff and water levels of the Volga delta), Moscow: Gidrometeoizdat, 1962, 337 p. (in Russian).
3. Baydin S. S., The flooding of the Volga delta under conditions of regulated river runoff, *Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta*, 1967, Iss. 89, pp. 67–71 (in Russian).
4. Bolgov M. V., Krasnozhon G. F., Shatalova K. Yu., Computer hydrodynamic model of the Lower Volga, *Vodnye resursy*, 2014, V. 41, No. 1, pp. 10–23 (in Russian), DOI: 10.7868/S0321059614010040.
5. Bolgov M. V., Shatalova K. Yu., Gorelets O. V., Zemlyanov I. V., Water-ecological problems of Volga-Akhtuba floodplain, *Ekosystems: Ekology and dynamics*, 2017, V. 1, No. 3, pp. 15–37 (in Russian).
6. Bukharitsin P. I., Polonskiy V. F., Ostroumova L. P., *Ustoichivoe vodoobespechenie Zapadnykh podstepnykh il'menei del'ty Volgi* (Sustainable water supply of Western steppe ilmens of the Volga delta), Beau Bassin: Lambert Academic Publishing, 2017, 127 p. (in Russian).
7. Valov M. V., Barmin A. N., Current trends of changes of the hydrological conditions in the Volga delta, *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Regional'nye problemy vodopol'zovaniya v izmenyayushchikhsya klimaticheskikh usloviyakh"*, Ufa: Aehterna, 2014, pp. 96–99 (in Russian).
8. Gorelets O. V., Polonskiy V. F., The flooding of the Volga delta and effects of changes of the level of the Caspian Sea on the flooding, *Meteorologiya i gidrologiya*, 1997, No. 10, pp. 85–97 (in Russian).
9. Zilitinkevich N. S. (2024a), Methods of calculation of daily flooded areas in the Volga delta during the flood periods based on the remote sensing data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2024, No. 3, pp. 78–93 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961424030065.
10. Zilitinkevich N. S. (2024b), A review of studies on the assessment of flooded areas and water balance in the Volga delta during the flood periods, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2024, No. 5, pp. 82–110 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961424050069.
11. Polonskiy V. F., Landscape zoning of the Volga delta in view of economic development and features of the flooding, *Tezisy dokladov Vserossiiskogo kongressa rabotnikov vodnogo hozyaistva* (Abstracts of the reports of the All-Russia Congress of Water Resources Workers), Moscow, 2003, pp. 209–210 (in Russian).
12. Polonskiy V. F., Gorelets O. V., Assessment of the regulating role of the Volga delta during a flood, In: *Gidrometeorologicheskie aspekty problemy Kaspiiskogo morya i ego basseina*, Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 2003, pp. 65–77 (in Russian).
13. Polonskiy V. F., Ostroumova L. P., New water-balance model of the Volga delta as a tool for optimal regulation of water regime, *Ekologicheskie sistemy i pribory*, 2005, No. 12, pp. 37–48 (in Russian).
14. Polonskiy V. F., Ostroumova L. P., Processes of flooding, assessment and calculation of the dynamics of water balance components of the Volga delta during a flood, *Materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Izmeneniye klimata i vodnogo balansa Kaspiiskogo regiona"* (Proc. Intern. Scientific Conf. "Climate Change and Water Balance of the Caspian Region"), Astrakhan, 2011, pp. 119–127 (in Russian).
15. Rybak V. S., Losses of the water runoff in Volga-Akhtuba floodplain and the Volga delta, *Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta*, 1973, V. 116, pp. 82–96 (in Russian).
16. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Berdengalieva A. N., Vypritskii A. A., Dynamics of water bodies areas in the Western Ilmen Lake Region of the Volga Delta, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 4, pp. 285–290 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-285-290.
17. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Bogodukhov M. A. et al., The Lower Volga floodplain classification based on long-term hydrological and remote sensing data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 3, pp. 119–135 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-119-135.
18. 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, Article 2082, 24 p., DOI: 10.3390/s18072082.
19. Du Y., Zhang Y., Ling F. et al., 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, Article 354, 19 p., DOI: 10.3390/rs8040354.
20. *ENVI User's Guide. ENVI Version 4.7 and 4.7 SP1. Dec. 2009 Ed.* ITT Visual Information Solutions Corporation, USA, 2009.

21. Kwang C., Osei E. M., Jnr, Amoah A. S., Comparing of Landsat 8 and Sentinel 2A using water extraction indexes over Volta River, *J. Geography and Geology*, 2017, V. 10, 7 p., DOI: 10.5539/jgg.v10n1p1.
22. Szabó S., Gácsi Z., Balázs B., Specific features of NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories, *Acta Geographica Debrecina. Landscape and Environment Ser.*, 2016, V. 10, pp. 194–202, DOI: 10.21120/LE/10/3-4/13.
23. Xu H., Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery, *Intern. J. Remote Sensing*, 2006, V. 27, No. 14, pp. 3025–3033, DOI: 10.1080/01431160600589179.