

Исследование возможностей определения структурных характеристик растительных сообществ с доминированием тростника по данным спутниковой съёмки высокого разрешения, наземных измерений и БПЛА

С. С. Шинкаренко¹, С. А. Баргалева¹, Н. В. Литвинова²

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

² Астраханский государственный природный биосферный заповедник
Астрахань, 414021, Россия

E-mail: shinkarenko@d902.iki.rssi.ru

Растительные сообщества с доминированием тростника (*Phragmites altissimus* (Benth.) Mabilie, *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) широко распространены в пойменных и дельтовых ландшафтах. Несмотря на важную биосферную роль и потенциал промышленного использования тростников, вопросам картографирования и оценки их состояния в России уделяется недостаточно внимания. Цель исследования заключается в изучении возможностей картографирования фитомассы и высоты растительности в сообществах с доминированием тростника в дельте Волги по спутниковым данным Sentinel-1/2 на основе выборочных наземных измерений и аэросъёмки, выполняемой беспилотным летательным аппаратом. Установлены аллометрические соотношения высоты, диаметра стеблей тростника и фитомассы для 92 пробных площадей на территории Астраханского заповедника в дельте Волги, которые позволили использовать аэросъёмку для получения опорных данных фотограмметрическими методами. Использование рассчитанной фотограмметрически на основе аэросъёмки высоты растительности на 27 тестовых полигонах, разновременных спутниковых данных и метода непараметрической регрессии Random Forest позволило получить достаточно высокую точность при картографировании высоты (коэффициент детерминации $R^2 = 0,80$, среднеквадратическая ошибка (СКО) 0,46 м) и фитомассы ($R^2 = 0,65$, СКО = 12,6 т/га) сообществ с доминированием тростников в дельте Волги. Таким образом, использованный подход является достаточно эффективным для картографирования фитомассы тростниковых сообществ в дельте Волги и аналогичных ландшафтах.

Ключевые слова: водно-болотные угодья, Астраханская область, дельта Волги, фитомасса, Sentinel-2, тростник

Одобрена к печати: 10.09.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-188-202

Введение

Значительные площади пойменных и дельтовых ландшафтов заняты высокопродуктивной околосводной растительностью, в том числе тростниками. Особенно они распространены в дельтах крупных рек: Волги, Дона, Кубани, Терека, Днепра и др. Растительные сообщества с доминированием тростников служат местообитанием множества животных, поэтому играют огромную роль в сохранении биоразнообразия водно-болотных угодий. Ежегодный прирост фитомассы тростников может составлять от 5–7 т/га сухой массы (Бармин, Голуб, 2000) до 50 т/га и более (Eller et al., 2020; Köbbing et al., 2013). Тростники могут являться источником сырья для целлюлозно-бумажной и химической промышленности, строительства, энергетики (Baibagyssov et al., 2020; Köbbing et al., 2013). Тем не менее, этот потенциал в России в настоящее время практически не используется (Соколова и др., 2020). При активной промышленной заготовке биомассы тростников происходит снижение их продуктивности, что проявляется в уменьшении высоты и густоты растений (Бармин, Голуб, 2000). Поэтому перед разработкой соответствующих планов освоения тростниковых зарослей необходимо проведение работ по оценке их потенциала для заготовки биомассы (Яновский, Созинов, 2017). Значительная фитомасса тростников и другой околосводной растительно-

сти, которая прирастает ежегодно, создаёт условия для возникновения и распространения ландшафтных пожаров. В дельте Волги практически каждый год выгорают сотни тысяч гектаров водно-болотных угодий с сообществами тростника (Шинкаренко и др., 2021; 2022б), что приводит к уничтожению местообитаний животных и растений, гидрохимическим изменениям, обширным задымлениям, эмиссиям парниковых газов и других продуктов горения (Шинкаренко и др., 2022а). Гидрологические изменения, связанные с динамикой стока Волги и колебаниями уровня Каспийского моря, приводят к увеличению площадей, занятых сообществами с доминированием рогоза и тростника в дельте Волги (Гинзбург и др., 2021; Новикова и др., 2000; Чувашов и др., 2024; Шинкаренко и др., 2023), что в совокупности с ухудшениями условий обводнения может привести к росту горимости (Шинкаренко и др., 2022б).

Несмотря на важность тростниковых сообществ, методы их картографирования развиты недостаточно. В России отсутствуют сведения об актуальных площадях, занятых этим типом растительности, а также и об их состоянии (Шинкаренко, Барталев, 2023б). Для европейской части России приводится оценка площади тростников в 1,7 млн га (Köbbing et al., 2013). Таким образом, разработка методов определения фитомассы тростниковых растительных сообществ на территории страны крайне актуальна и требует проведения специальных исследований.

Сбор опорных данных о фитомассе тростников характеризуется крайне высокой трудоёмкостью, поэтому перспективным направлением для этих целей становится использование аэросъёмки, в том числе с применением лидаров, мульти- и гиперспектрометров (Lu et al., 2022; Luo et al., 2017). По материалам лазерного сканирования или аэросъёмки в видимом диапазоне возможно определение высоты растительности фотограмметрическими методами, данные о которой в дальнейшем используются для расчёта фитомассы и других характеристик на основе аллометрических соотношений (Голуб, Николайчук, 2021; Asaeda, Karunaratne, 2000). Значительные фитомасса и высота тростников, высокая влажность вегетативных органов, переувлажнённая почва и сильное влияние на отражённое излучение участков открытой водной поверхности приводят к тому, что традиционно используемые для картографирования фитомассы травянистой растительности вегетационные индексы на основе спутниковых данных не позволяют получить высокую точность (Li et al., 2019; Wang S. et al., 2022; Zhao et al., 2022). В этой связи при изучении тростниковой растительности предпочтение может отдаваться использованию данных в отдельных спектральных каналах (Luo et al., 2017), а также активным методам дистанционного зондирования Земли (Zhao et al., 2022).

Цель настоящего исследования заключается в изучении возможностей картографирования фитомассы и высоты растительности в сообществах с доминированием тростника в дельте Волги по спутниковым данным Sentinel-1/2 на основе выборочных наземных измерений и аэросъёмки, выполняемой беспилотным летательным аппаратом.

Материалы и методы исследований

Наземные данные

Исследования проводились в дельте Волги в Астраханской области на территории двух участков Астраханского государственного природного биосферного заповедника (АГПЗ), а именно: Трёхизбинского участка в центральной части дельты (с 25 по 29 сентября 2023 г.) и Обжоровского участка — в восточной части (с 7 по 10 ноября 2023 г.). На территории исследованных участков АГПЗ преобладают тростниковые растительные сообщества, на которые приходится не менее 75 % площади. Расположение участков заповедника и пробных площадей показано на *рис. 1* (см. с. 190). Исследования включали: геоботаническое описание растительности (видовой состав и обилие видов, ярусность, высота, жизненность, фенологическая фаза, истинное проективное покрытие) на площадках 10×10 м, а также укусы для определения фитомассы на площадках 0,25 м². Кроме фитомассы на укусных площадках

определялось количество растений, диаметры стеблей с разделением на прирост текущего года, старник (побеги прошлых лет) и опад. Преобладающими видами в исследованных растительных сообществах были тростники гигантский (*Phragmites altissimus* (Benth.) Mabilie, согласно международной базе данных Plants of the World Online — *Phragmites australis* subsp. *isiacus* (Arcang.) ined.) и южный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) (Папченков, 2008), доля которых в фитомассе составила не менее 90 %. Далее по тексту под тростниковой растительностью понимаются сообщества с доминированием этих видов тростников.

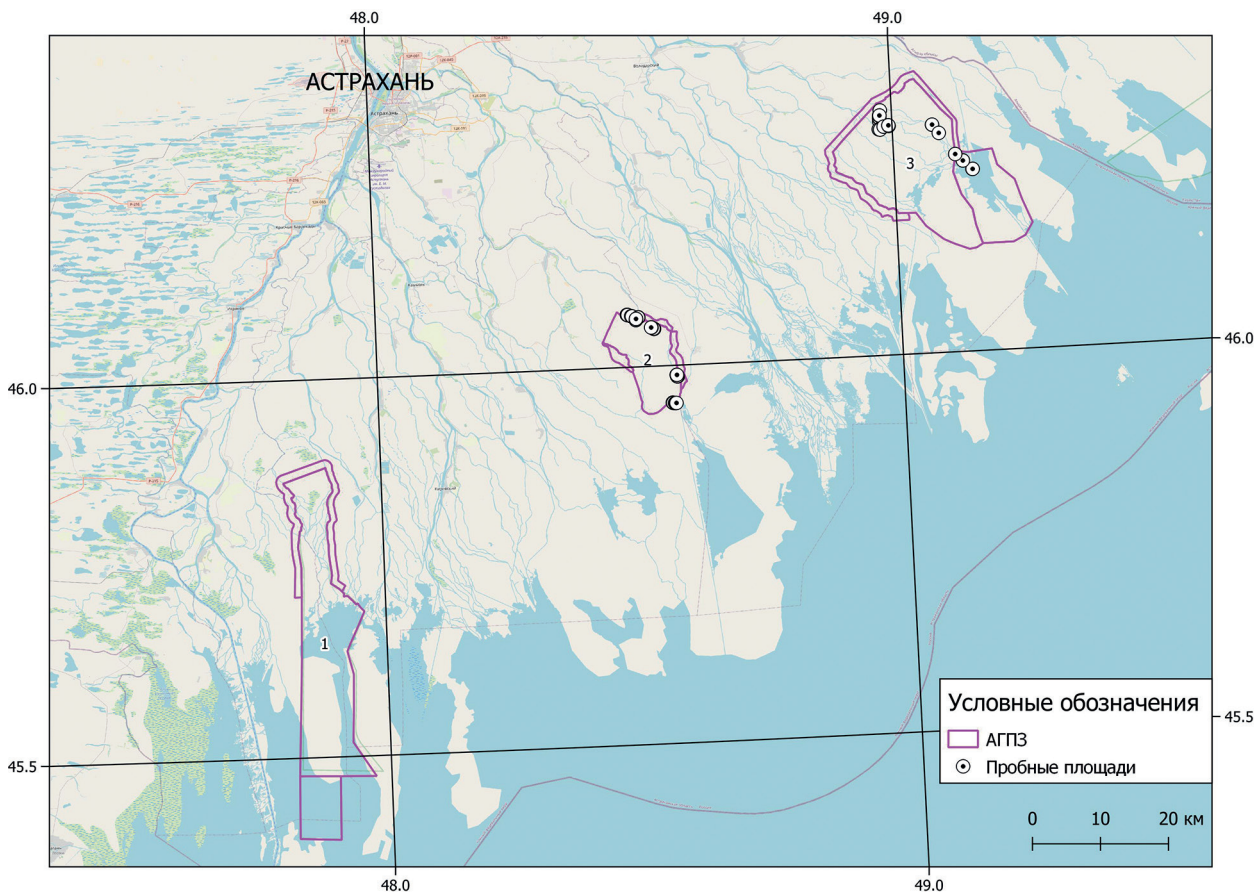


Рис. 1. Расположение тестовых полигонов. Участки Астраханского заповедника: 1 — Дамчикский, 2 — Трёхизбинский, 3 — Обжоровский

Исследования проводились на 92 стандартных геоботанических площадках (пробных площадках) с определением фитомассы (с разделением тростников и другой растительности, а также отдельно для прироста текущего года и старника), высоты и диаметра стебля каждого экземпляра тростника на укосных площадках $0,25 \text{ м}^2$. Измерена высота около 1,5 тыс. отдельных побегов тростника, в том числе почти для 0,8 тыс. растений определены диаметры в основании стеблей. Средняя высота тростниковой растительности составила 2,2 м, достигая на отдельных участках 6–7 м. Общая сырая фитомасса колебалась в диапазоне 5–180 т/га (в том числе до 160 т/га тростника) в зависимости от условий: по мере продвижения к Каспийскому морю высота и фитомасса растительности увеличивались из-за уменьшения глубины залегания грунтовых вод. В то же время снижалась густота (плотность распределения) побегов тростника, при этом значимой связи между густотой, фитомассой, истинным проективным покрытием и высотой стеблей не установлено. Как правило, более высокие побеги имеют меньшую плотность распределения.

Поскольку наземные исследования на разных участках заповедника проводились с перерывом в полтора месяца, а фитомасса определялась в сыром и воздушно-сухом состоянии, то

одновременное использование данных с двух участков заповедника может вносить неопределённость из-за разного состояния растительности при взвешивании. Кроме влажности растительности на двух участках различается и соотношение стеблей и листьев в фитомассе укосов, так как в ноябре значительная часть листьев тростника уже облетела и была отнесена к опадку. По этой причине приводятся закономерности для Трёхизбинского и Обжоровского участков отдельно.

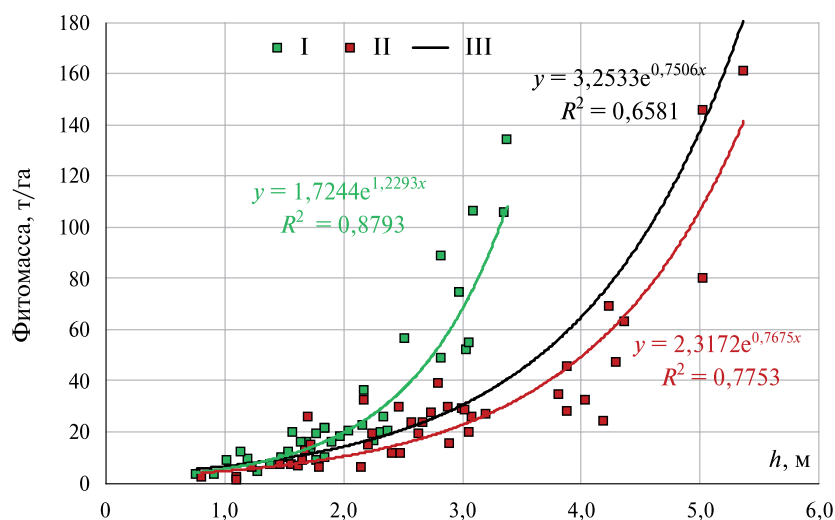


Рис. 2. Соотношение сырой фитомассы и средних высот стеблей тростника на пробных площадях: I — Обжоровский участок, II — Трёхизбинский участок, III — все измерения

Установлены значимые связи между фитомассой и измеренными на пробных площадках $0,25 \text{ м}^2$ средними величинами высоты (рис. 2), диаметра, площади сечения и объёма стеблей тростников. Фитомасса тростников в воздушно-сухом состоянии составляет примерно 60 % от сырой, их взаимосвязь характеризуется линейной зависимостью с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,98$. Таким образом, трудоёмкая процедура прямого измерения фитомассы тростниковой растительности может быть заменена её расчётом через аллометрические соотношения по измеренной высоте и диаметру как в сыром, так и воздушно-сухом состояниях. Связь фитомассы со средней высотой тростниковой растительности открывает возможность использования фотограмметрических методов определения высоты по материалам аэросъёмки, что позволяет существенно увеличить объём опорных данных.

Аэросъёмка беспилотным летательным аппаратом

Аэросъёмка (АФС) выполнялась в видимом диапазоне с высоты 50 м с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА) DJI Mavic Air с продольным и поперечным перекрытием кадров 80 %. Работы проводились на 27 тестовых полигонах площадью 3–11 га с тремя-четырьмя пробными площадями каждый (18 тестовых полигонов общей площадью 97 га на Трёхизбинском участке Астраханского заповедника и 9 тестовых полигонов общей площадью 48 га на Обжоровском). Последовательность обработки данных аэросъёмки с помощью программного обеспечения Agisoft Photoscan показана на рис. 3 (см. с. 192). На основе фотограмметрической обработки материалов аэросъёмки получено плотное облако точек и цифровая модель местности (ЦММ) пространственного разрешения 3,5 см. Далее с помощью фильтрации растительности была построена цифровая модель рельефа (ЦМР), вычитанием которой из ЦММ местности рассчитаны значения высоты растительного покрова. Подобный подход достаточно успешно применяется для определения высоты растительности, в том числе тростников (Lu et al., 2022).

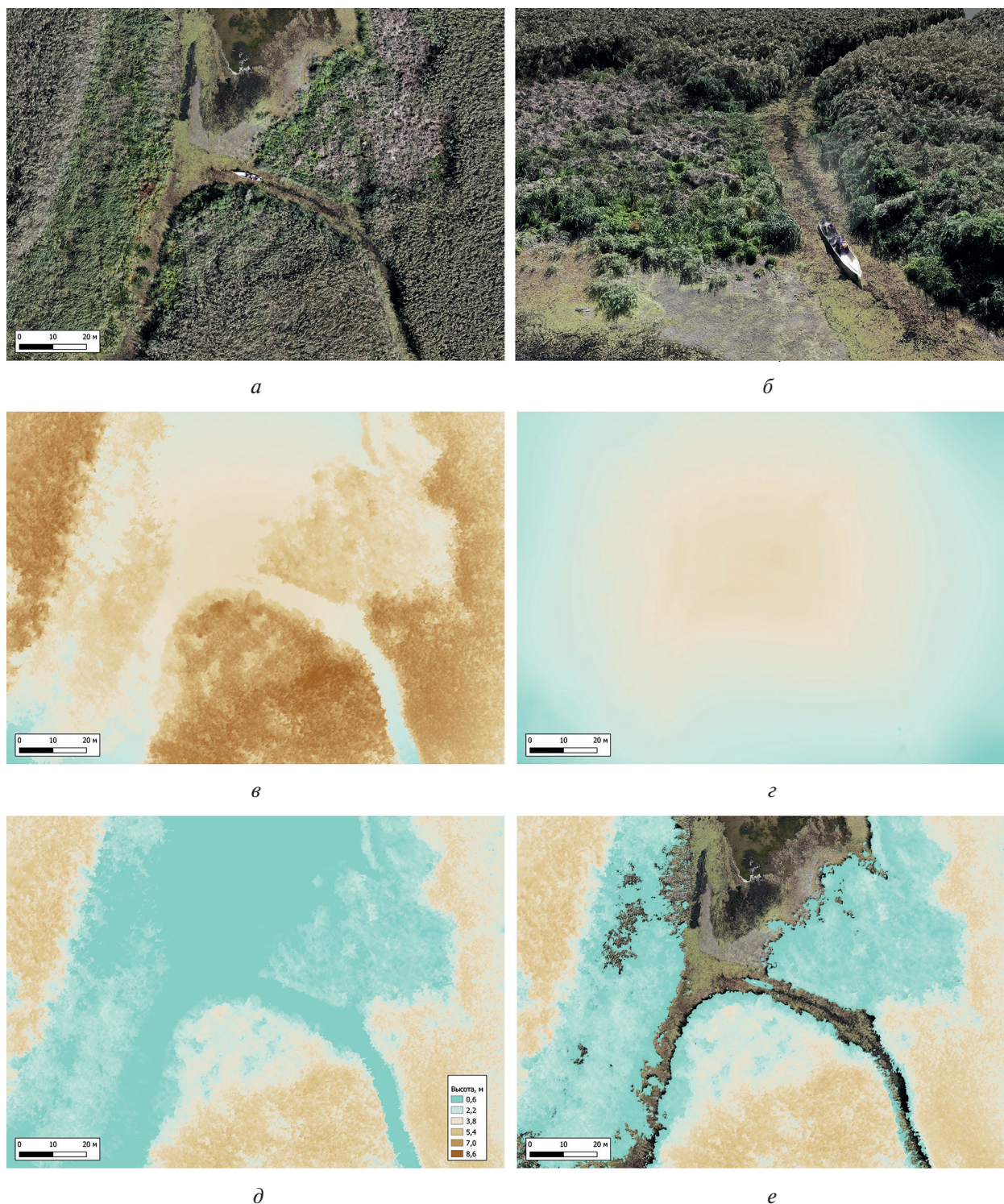


Рис. 3. Схема обработки данных аэросъёмки БПЛА: *а* — фрагмент ортофотоплана; *б* — 3D-модель; *в* — ЦММ; *г* — ЦМР; *д* — разность ЦММ и ЦМР; *е* — выделенный растительный покров

При использовании данного метода обработки материалов аэросъёмки к растительному покрову кроме вегетирующих растений относится и старник, что усложняет дальнейшее сопоставление высоты по данным аэросъёмки со спектрально-отражательными характеристиками по спутниковым данным. При значительных запасах старника создание ЦМР автоматизированными фотограмметрическими методами затруднено, поскольку растительный полог высокой сомкнутости воспринимается как поверхность почвы. По этой причине аэро-

съёмка выполнялась преимущественно на участках, где отсутствовала прошлогодняя растительности из-за пожаров весной 2023 г. Выгоревшие площади при этом предварительно определялись по спутниковым изображениям Landsat и Sentinel-2 по ранее апробированной методике (Шинкаренко и др., 2022б).

Кроме влияния прошлогодней растительности к неопределённости при расчёте высоты по данным АФС приводит сложность допривязки ортофотопланов, связанная с недостаточной площадью открытых поверхностей и значительной высотой тростниковой растительности, затрудняющей выставление необходимого количества наземных опорных знаков. Из-за этого точность позиционирования полученных материалов АФС составила 2–3 м. Значительная густота тростниковой растительности также затрудняет и создание ЦМР, поскольку для этого требуется референц-поверхность, высотные отметки которой вычисляются по открытым участкам без растительности. В условиях исследуемых ландшафтов участки без тростниковой растительности были представлены противопожарными прокосами, грунтовыми дорогами, постоянными и временными водоёмами, высотные отметки которых могли не соответствовать уровням почвы под пологом растительности. Совокупность этих факторов приводит к существенной неопределённости при прямом сопоставлении высот растительности по данным АФС и наземным измерениям не только на укосных площадках 0,25 м², но и на пробных площадях 10×10 м. В результате усреднения значений высоты и фитомассы тростниковой растительности по тестовым полигонам получены оценки точности определения этих характеристик по АФС (рис. 4). Для Трёхизбинского участка сила связей значительно выше, чем на Обжоровском. Это может быть связано с фенологическими различиями состояния растительности, так как аэросъёмка и наземные измерения проводились в сентябре и ноябре соответственно. Высота полога растительности по данным аэросъёмки систематически меньше, чем измеренная. Это связано с тем, что полог в значительной степени сформирован листьями тростников, соответственно, имеет меньшую высоту в сравнении с отдельными стеблями. Тем не менее, достаточно высокая точность определения высот по АФС и наличие значимой связи между высотами и фитомассой растительности свидетельствуют о перспективности применения АФС как источника опорной информации при дальнейшем картографировании высоты тростниковой растительности по спутниковым данным.

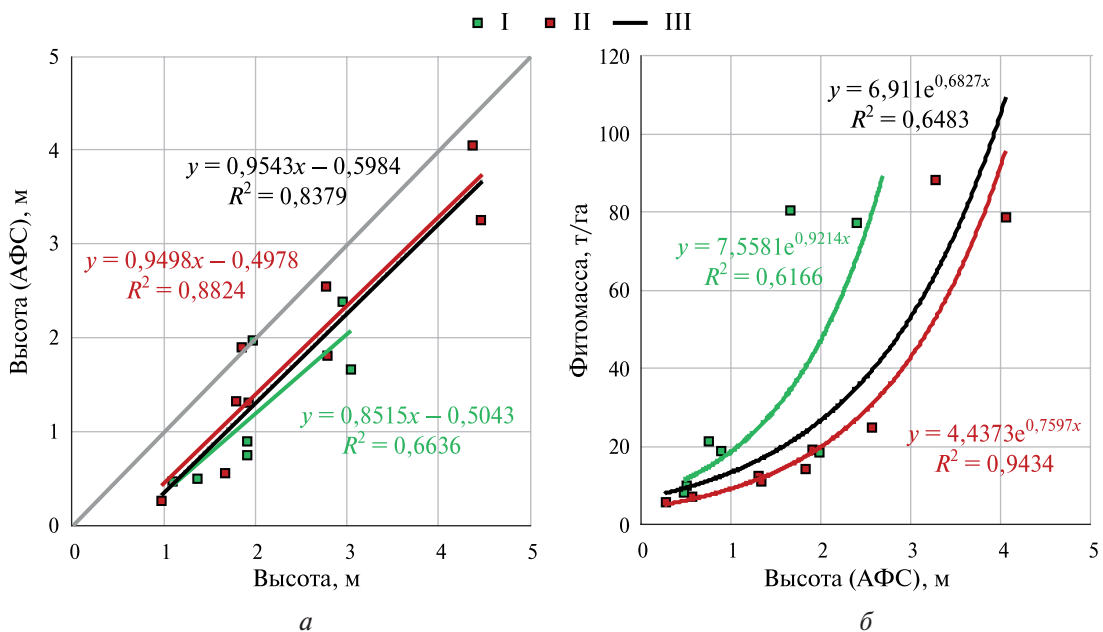


Рис. 4. Соотношение наземно измеренной высоты и высоты по данным аэросъёмки (а), а также сырой фитомассы и высоты по данным аэросъёмки (б). I — Обжоровский участок, II — Трёхизбинский участок, III — все измерения; усреднение по тестовым полигонам, где весной 2023 г. были пожары

Определение структурных характеристик тростниковой растительности по спутниковым данным

В работе использовались разновременные данные Sentinel-2 разрешения 10 м (голубой, зелёный, красный, ближний инфракрасный диапазоны) и 20 м (коротковолновый инфракрасный 1,6 и 2,2 мкм) второго уровня обработки, прошедшие процедуру коррекции атмосферных искажений, а также радиолокационные данные Sentinel-1 разрешения 10 м. Даты спутниковых оптических изображений подбирались с учётом доступности безоблачных данных и сезонной динамики фитомассы тростниковой растительности, установленной по данным спутниковой системы MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Для изучаемого типа растительности характерно увеличение фитомассы после достижения максимальных значений вегетационного индекса (ВИ) NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) в конце июня – начале июля (*рис. 5*). При этом после достижения максимума NDVI и, соответственно, значений зелёной фитомассы рост стеблей тростника в высоту практически прекращается, а дальнейший прирост высоты и фитомассы достигается за счёт развития листьев и метёлок (Asaeda, Karunaratne, 2000). Кроме периода максимальных значений NDVI использовались данные на ближайшие к наземным измерениям даты (20 сентября и 30 октября) и в зимний период при наличии снежного покрова (9 декабря). Также применялись радиолокационные спутниковые изображения Sentinel-1 с апреля по ноябрь с периодом 12 дней. Спутниковые данные получены с помощью сервиса «Вега-Science» (Loupian et al., 2022), доступного в рамках центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лурия и др., 2015).

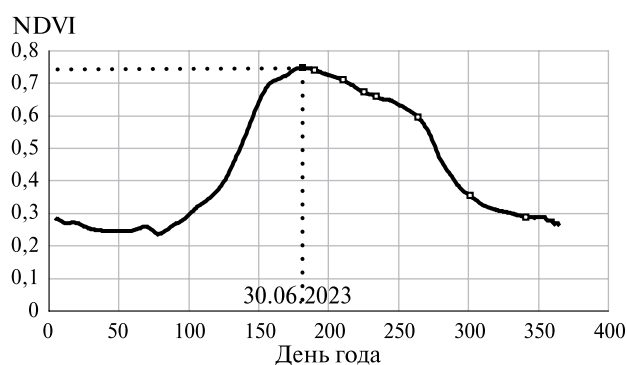


Рис. 5. Сезонный ход NDVI на тестовых полигонах в АГПЗ в 2023 г. по ежедневным данным MODIS (чёрный маркер — дата максимума NDVI, белые маркеры — даты использованных спутниковых изображений Sentinel-2)

Для каждого пикселя Sentinel-2 рассчитывались значения средней высоты растительности по данным аэросъёмки БПЛА. После этого полученные значения средней высоты сопоставлялись с коэффициентами спектральной яркости (КСЯ) и рассчитанными на их основе ВИ NDVI, EVI (*англ.* Enhanced Vegetation Index), IPVI (*англ.* Infrared Percentage Vegetation Index), NDWI (*англ.* Normalized Difference Water Index), SWVI (*англ.* Short-Wave Vegetation Index), NBR (*англ.* Normalized Burn Ratio). Кроме значений КСЯ и ВИ на даты спутниковых изображений применялись также их максимальные, минимальные и средние значения (кроме зимних). Использовались как стандартные методы регрессионного анализа, так и непараметрический метод Random Forest (случайный лес). Метод Random Forest с блоками подготовки спутниковых изображений, балансировки обучающей выборки, анализа точности регрессора реализован в виде скрипта на языке Python (Барталев, Хвостиков, 2023). Всего было проанализировано 12,9 тыс. пикселей Sentinel-2 размером 10×10 м (8,2 тыс. пикселей на территории Трёхизбинского участка и 4,7 тыс. пикселей на территории Обжоровского участка). При обучении алгоритма Random Forest использовалось 70 % выборки, ещё 30 % не были задействованы в обучении, а применялись для оценки точности.

Результаты и обсуждение

Сопоставление различных характеристик тростниковой растительности на пробных площадях позволило выявить аллометрические соотношения между высотой и диаметром стеблей (коэффициент корреляции $R = 0,92$, p -критерий значимости $< 0,001$), средней высотой и фитомассой (см. рис. 2, 4), суммами объёмов, поперечных сечений стеблей и фитомассы ($R = 0,99$ и $R = 0,91$ соответственно, $p < 0,001$). Наличие значимых закономерностей между характеристиками стеблей и фитомассой тростников в дальнейшем позволит уменьшить трудоёмкость сбора наземных данных, ограничив его подсчётом количества растений, измерением высоты и диаметра стеблей с выборочными взвешиваниями укосов.

Установленные в ходе наземных измерений аллометрические соотношения между высотой стеблей и фитомассой тростниковой растительности на пробных площадях позволяют использовать высоту, измеренную по данным аэросъёмки, в качестве показателя, характеризующего фитомассу для дальнейшего сопоставления со спутниковыми данными.

На основе корреляционного анализа на обоих участках установлены значимые обратные связи средней высоты, максимальных значений КСЯ в зелёном канале ($R = -0,53$, $p < 0,01$ на Обжоровском участке и $R = -0,45$, $p < 0,01$ на Трёхизбинском участке) и красном канале ($R = -0,41$, $p < 0,05$ и $R = -0,60$, $p < 0,001$), а также среднего значения КСЯ в зелёном канале ($R = -0,57$, $p < 0,01$ и $R = -0,75$, $p < 0,001$) и ближнем инфракрасном ($R = -0,38$, $p < 0,05$ и $R = -0,44$, $p < 0,01$) канале. Для фитомассы характерна значимая прямая связь с максимальным NDWI ($R = 0,41$, $p < 0,05$ и $R = 0,54$, $p < 0,01$) и средним значением индекса NDWI ($R = 0,39$, $p < 0,05$ и $R = 0,31$, $p < 0,05$), а также обратная связь со средними значениями КСЯ в зелёном канале ($R = -0,56$, $p < 0,01$ и $R = -0,40$, $p < 0,05$). С остальными использованными показателями значимая связь отсутствует как минимум на одном из участков АГПЗ. Относительно низкие значения коэффициента корреляции фитомассы тростников, ВИ и КСЯ на отдельные даты подтверждаются результатами и других исследователей, например, в Китае, где связь сырой фитомассы тростников и различных ВИ имеет значения менее 0,45 (Lu et al., 2022; Zhao et al., 2022). Отчасти это может быть связано с изменениями содержания фотосинтетически активных пигментов, в значительной степени определяющих значения вегетационных индексов, при относительно стабильной фитомассе после достижения пиковых значений ВИ.

Применение алгоритма непараметрической регрессии Random Forest для определения высоты тростников по данным спутниковых систем Sentinel-1/2 позволило получить достоверные результаты для двух участков заповедника как в отдельности, так и для всей совокупности данных (рис. 6, см. с. 196). Наибольшая точность достигнута на Трёхизбинском участке Астраханского заповедника ($R^2 = 0,86$, среднеквадратическая ошибка (СКО) 0,40 м), где исследования проводились во второй половине сентября, когда продолжалась вегетация тростников. Наибольший вклад при определении высоты тростников на этом участке вносят средние значения КСЯ в красном, зелёном и коротковолновом инфракрасном (2,2 мкм) диапазоне. При этом исключение радарных данных из признаков существенно не снижает точность регрессии ($R^2 = 0,85$, СКО = 0,45 м). На Обжоровском участке при расчёте высот тростников определяющую роль играло КСЯ в коротковолновом инфракрасном диапазоне (2,2 мкм) в зимний период при наличии снежного покрова, коэффициенты обратного рассеяния вертикально-вертикальной поляризации, а также КСЯ в красном канале в конце июля и водного индекса NDWI на август. При исключении радарных данных из регрессии на Обжоровском участке её точность несколько снижается ($R^2 = 0,74$, СКО = 0,55 м). В южных регионах, где имеются наибольшие площади тростников, снежный покров устанавливается нерегулярно и зачастую на непродолжительное время. Исключение зимних данных из регрессии практически не повлияло на её точность ($R^2 = 0,77$, СКО = 0,39), при этом возрос вклад КСЯ в красном и коротковолновом инфракрасном (2,2 мкм) каналах на середину августа.

Установленные в данном исследовании взаимосвязи высоты, фитомассы тростниковой растительности и КСЯ в красном и зелёном каналах подтверждаются результатами и других авторов. Наиболее тесная связь между фитомассой тростников в Китае отмечена с КСЯ

в диапазоне 510–560 нм (Wang Z. et al., 2022), что соответствует зелёной области спектра. По данным В. Ли с соавторами (Li et al., 2019), красный диапазон наиболее информативен при определении зелёной фитомассы тростника. Также значения КСЯ в красном диапазоне и NDVI рекомендуется использовать при отделении тростниковой растительности от других фитоценозов на водно-болотных угодьях Беларуси (Яновский, Созинов, 2017).

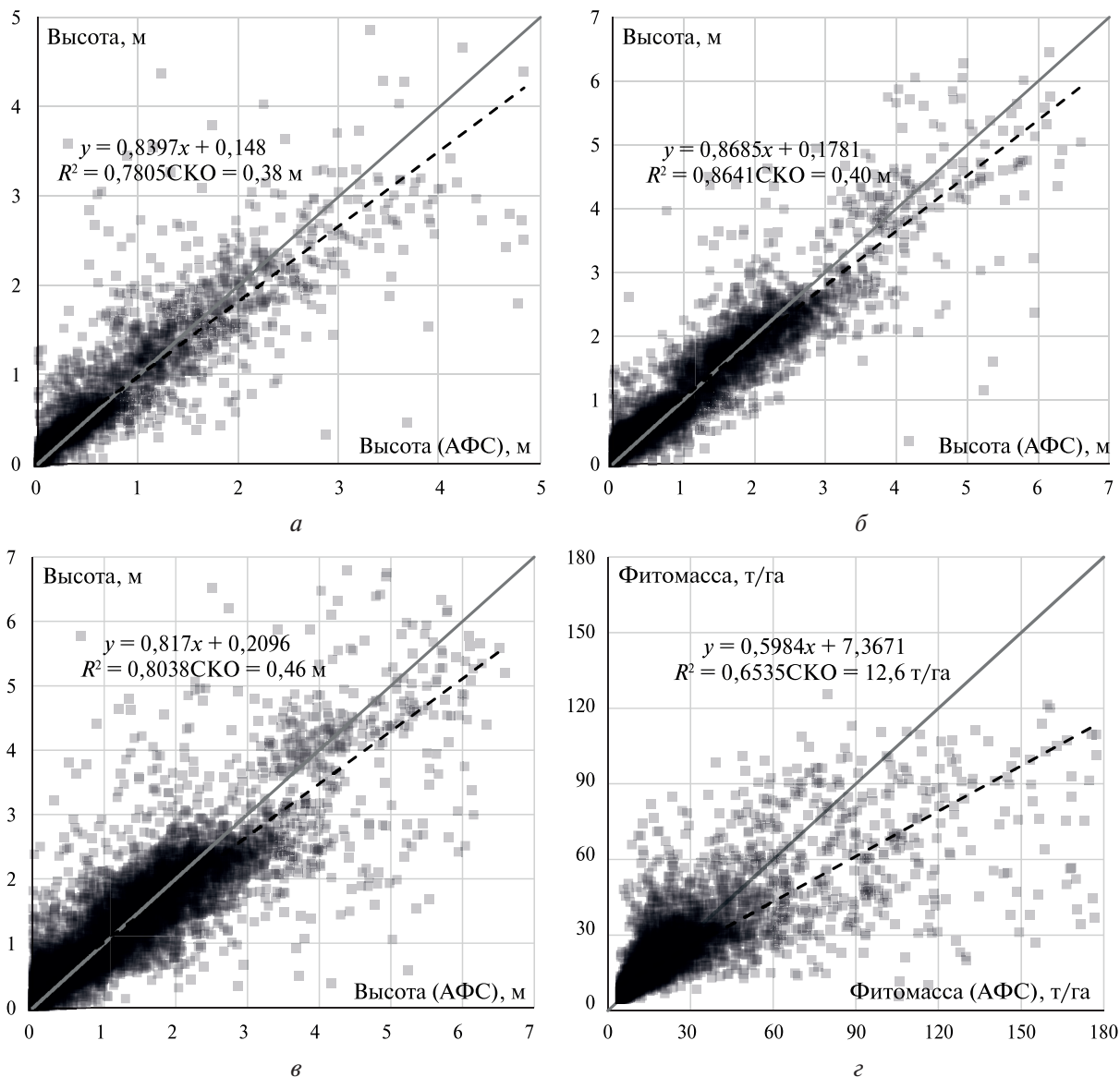


Рис. 6. Результат определения высоты по данным Sentinel-1/2: а — Обжоровский участок; б — Трёхизбинский участок; в — все данные; г — сырой фитомассы (все данные)

Из-за частичного опадения листьев в начале ноября, когда выполнялась аэросъёмка на Обжоровском участке, и, соответственно, меньшего заполнения пространства растительностью средняя высота тростников, рассчитанная фотограмметрически, может быть меньше по сравнению с Трёхизбинским, где полевые исследования и АФС выполнялись в сентябре в период вегетации. Листья тростников расположены в верхней трети стебля, составляют примерно 20–30 % надземной фитомассы (Asaeda, Kagunaratne, 2000), но в то же время в значительной степени определяют спектрально-отражательные свойства тростниковых сообществ из-за большей площади поверхности по сравнению со стеблями, а так же множественного рассеяния трёхмерной структурой полога (Яновский, Созинов, 2017). По этой причине

высота тростников, определённая на основе материалов аэросъёмки в период вегетации на Трёхизбинском участке, в большей степени связана с КСЯ оптического диапазона, а высота тростниковой растительности с частично утраченными листьями на Обжоровском участке в ноябре сильнее коррелирует с КСЯ в зимний период при наличии снежного покрова и радиолокационными данными.

В результате сопоставления NDVI с высотой и фитомассой тростниковой растительности, полученными прямыми измерениями, значимой связи не установлено как на отдельные даты, так и с максимальными и средними значениями за июль – октябрь. Этот ВИ широко распространён при исследованиях травянистых экосистем (Wang Z. et al., 2022) и наиболее связан с фитомассой степной и пустынной растительности (Хорошев и др., 2023; Шинкаренко, Барталев, 2023а, 2024). Тем не менее, в случае с высокопродуктивной тростниковой растительностью большой сомкнутости из-за возможного насыщения NDVI его применение может приводить к недооценке фитомассы (Lucy, Gregory, 2020). В результате прямого сопоставления фитомассы с различными ВИ по данным Sentinel-2 в Китае также не выявлено статистически значимых связей (Lu et al., 2022). С. Луо с соавторами (Luo et al., 2017) на основе воздушного лазерного сканирования и гиперспектральной аэросъёмки показали, что отдельные ВИ не позволяют достаточно точно определять фитомассу тростников, а совокупность данных гиперспектрометра и высоты полога растительности по данным лидара дала возможность получить модель оценки сырой фитомассы с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,65$ и СКО = 1,7 т/га. Применение множественной линейной регрессии с использованием КСЯ, ВИ на основе данных Sentinel-2 и коэффициентов обратного рассеяния по данным Sentinel-1 для определения сухой и сырой фитомассы тростников водноболотных угодий в Китае позволило получить достаточно высокую точность ($R^2 = 0,75$ для сухой фитомассы и $R^2 = 0,69$ для сырой (Zhao et al., 2022)), тем не менее отрицательные множители перед NDVI, SAVI (*англ.* Soil-Adjusted Vegetation Index), EVI в указанном исследовании также свидетельствуют об отсутствии прямой связи между этими ВИ и фитомассой.

Полученные наземные данные о структурных характеристиках тростниковой растительности на 92 пробных площадях не позволяют достоверно выявить взаимосвязи между ними и спектрально-отражательными свойствами непараметрическими методами, без использования результатов аэросъёмки, в силу недостаточного размера выборки. При прямом сопоставлении наземных и спутниковых данных большую роль играет несоответствие размеров пикселей Sentinel-2 и укосных площадок, а также неточности их позиционирования (для Sentinel-2 до 10–12 м, для площадок 2–3 м), что вносит значительную неопределённость. Условия произрастания тростниковой растительности существенно отличаются по наличию водной поверхности, уровню грунтовых вод и соответствующей влажности почвы. Эти факторы определяют формирование спектрального отклика как напрямую, за счёт поглощения излучения водой, в том числе в вегетативных органах (Zhao et al., 2022), так и косвенно, через влияние на рост растительности: в более увлажнённых биотопах высота и фитомасса тростников обычно больше. По этим причинам значения КСЯ в ближнем инфракрасном канале, которые обычно выше у растительности с большей фотосинтезирующей фитомассой, могут занижаться из-за значительного поглощения водой излучения инфракрасного диапазона, соответственно снижаются и значения NDVI при той же зелёной фитомассе. В этих условиях возрастает роль водных индексов, характеризующих влажность растительности и её местообитаний, а также КСЯ в каналах видимого диапазона.

Заключение

Картографирование фитомассы тростниковой растительности характеризуется значительной неопределённостью, связанной как со сбором опорной информации, так и с последующим её сопоставлением со спутниковыми данными. Сюда можно отнести неточность геопозиционирования спутниковых данных, материалов аэросъёмки и пробных площадей, несоответствие размеров укосных площадок и пикселей спутниковых изображений, недостаток участков без

растительности для построения референц-поверхности при разработке цифровой модели местности и размещения наземных опорных знаков, необходимых для допривязки материалов аэросъёмки. Местообитание растительности с доминированием тростников характеризуется различными условиями, в том числе уровнем грунтовых вод, площадью открытой водной поверхности, влажностью почв, что влияет на спектрально-отражательные свойства как напрямую, так и косвенно через формирование условий для развития растений. Высокая сомкнутость полога приводит к возможному насыщению значений ВИ. Вследствие этих причин большую роль при картографировании фитомассы тростниковой растительности играют значения КСЯ в отдельных каналах, в том числе усреднённые за вегетационный период, а также ВИ, чувствительные к влагосодержанию, и радиолокационные данные.

Несмотря на указанные сложности, установленные в результате наземных измерений аллометрические соотношения характеристик стеблей тростников и их фитомассы позволили получить достаточно достоверные оценки высоты и фитомассы тростников на уровне пикселей Sentinel-2. Применённый подход с разработкой моделей перехода от измеренной фотограмметрически высоты тростниковой растительности к её фитомассе с последующим сопоставлением со спутниковыми данными непараметрическими методами может быть рекомендован для водно-болотных угодий, где преобладают фитоценозы с доминированием тростника.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерство науки и высшего образования РФ — соглашение в ГИИС «Электронный бюджет» № 075-15-2022-1229 «Применение технологий высокопроизводительных вычислений и больших данных для совместной разработки экономически эффективных автоматизированных методов широкомасштабного биомониторинга водно-болотных угодий. HPC and BigData applied to codesigning cost-efficient automation for large scale wetland biomonitoring».

Литература

1. Бармин А. Н., Голуб В. Б. Поучительный урок результатов эксплуатации тростниковых зарослей в дельте реки Волги // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2000. Т. 2. № 2. С. 295–299.
2. Барталев С. А., Хвостиков С. А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023666251 Российская Федерация. FORS-MachLearn № 2023664950. Заявл. 14.07.2023. Оpubл. 27.07.2023.
3. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Серых И. В., Лебедев С. А. Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского моря (1980–2020) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 277–291. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291.
4. Голуб В. Б., Николайчук Л. Ф. Л. Г. Раменский и аллометрия растений (история и современное состояние проблемы) // Разнообразии растительного мира. 2021. № 1(8). С. 30–50. DOI: 10.22281/2686-9713-2021-1-30-50.
5. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
6. Новикова Н. М., Ильина И. С., Сафронова И. Н. О картографировании пойменной растительности Нижней Волги // Геоботаническое картографирование. 2000. № 1998–2000. С. 62–77. DOI: 10.31111/geobotmap/1998-2000.62.
7. Папченко В. Г. О распространении *Phragmites altissimus* (Benth.) Nabile (Poaceae) // Российский журн. биол. инвазий. 2008. Т. 1. № 1. С. 36–41.
8. Соколова Н. А., Костин В. Е., Хлобжева И. Н. и др. Функциональное использование биомассы тростника (*Phragmites australis*) зимней заготовки в регионах Нижнего Поволжья // Проблемы региональной экологии. 2020. № 5. С. 25–30. DOI: 10.24412/1728-323X-2020-5-25-30.
9. Хорошев А. В., Калмыкова О. Г., Дусаева Г. Х. Оценка индекса NDVI как источника информации о наземной фитомассе в степях // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 3. С. 27–43. DOI: 10.31857/S020596142303003X.

10. Чувашов А. В., Малов Д. Н., Степанова Н. Ю., Голуб В. Б. Оценка динамики растительных сообществ в восточной части дельты р. Волги (1980–2023 гг.) // Аридные экосистемы. 2024. Т. 30. № 1. С. 67–74. DOI: 10.24412/1993-3916-2024-1-67-74.
11. Шинкаренко С. С., Барталев С. А. (2023а) Анализ влияния видового состава, проективного покрытия и фитомассы растительности аридных пастбищных ландшафтов на их спектрально-отражательные свойства по данным наземных измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 176–192. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-176-192.
12. Шинкаренко С. С., Барталев С. А. (2023б) Применение данных дистанционного зондирования для ширококомасштабного мониторинга водно-болотных угодий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 9–34. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-9-34.
13. Шинкаренко С. С., Барталев С. А. Анализ взаимосвязи структурных и спектрально-отражательных характеристик растительности аридных пастбищных ландшафтов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 176–192. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-171-187.
14. Шинкаренко С. С., Иванов Н. М., Берденгалиева А. Н. Пространственно-временная динамика выгоревших площадей на федеральных ООПТ юго-востока Европейской России // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2021. Т. 6. № 3. С. 23–44. DOI: 10.24189/ncr.2021.035.
15. Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Берденгалиева А. Н. (2022а) Спутниковые наблюдения задымлений от тростниковых пожаров на Нижней Волге // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 93–105. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-93-105.
16. Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Берденгалиева А. Н., Иванов Н. М. (2022б) Пространственно-временной анализ горимости пойменных ландшафтов Нижней Волги // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 143–157. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-143-157.
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. Яновский А. А., Созинов О. В. Автоматизированная дистанционная экспресс-оценка расположения зарослей *Phragmites australis*, перспективных для заготовки энерготехнологической фитомассы // Растительные ресурсы. 2017. Т. 53. № 4. С. 555–580.
19. Asaeda T., Karunaratne S. Dynamic modeling of the growth of *Phragmites australis*: model description // Aquatic Botany. 2000. V. 67. Iss. 4. P. 301–318. DOI: 10.1016/S0304-3770(00)00095-4.
20. Baibagyssov A., Thevs N., Nurtazin S. et al. Biomass resources of *Phragmites australis* in Kazakhstan: Historical developments, utilization, and prospects // Resources. 2020. V. 9. Article 74. DOI: 10.3390/resources9060074.
21. Eller F., Guo X., Ye S. et al. Suitability of Wild *Phragmites australis* as bio-resource: Tissue quality and morphology of populations from three continents // Resources. 2020. V. 9. No. 12. Article 143. DOI: 10.3390/resources9120143.
22. Köbbing J. F., Thevs N., Zerbe S. The utilisation of reed (*Phragmites australis*): A review // Mires and Peat. 2013. V. 13. Article 1.
23. Loupian E., Burtsev M., Proshin A. et al. Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 1. Article 77. DOI: 10.3390/rs14010077.
24. Li W., Dou Z., Wang Y. et al. Estimation of above-ground biomass of reed (*Phragmites communis*) based on in situ hyperspectral data in Beijing Hanshiqiao Wetland, China // Wetlands Ecology and Management. 2019. V. 27. P. 87–102. DOI: 10.1007/s11273-018-9644-5.
25. Lu L., Luo J., Xin Y et al. How can UAV contribute in satellite-based *Phragmites australis* aboveground biomass estimating? // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2022. V. 114. Article 103024. DOI: 10.1016/j.jag.2022.103024.
26. Lucy G. P., Gregory J. M. A Systematic review of the factors influencing the estimation of vegetation above-ground biomass using unmanned aerial systems // Remote Sensing. 2020. V. 12. Article 1052. DOI: 10.3390/rs12071052.
27. Luo S., Wang C., Xi X. et al., Retrieving aboveground biomass of wetland *Phragmites australis* (common reed) using a combination of airborne discrete-return LiDAR and hyperspectral data // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2017. V. 58. P. 107–117. DOI: 10.1016/j.jag.2017.01.016.
28. Wang S., Li S., Li S., Zheng S. et al. Estimating biomass and carbon sequestration capacity of *Phragmites australis* using remote sensing and growth dynamics modeling: A Case study in Beijing Hanshiqiao Wetland nature reserve, China // Sensors. 2022. V. 22. No. 9. Article 3141. DOI: 10.3390/s22093141.

29. Wang Z., Ma Y., Zhang Y., Shang J. Review of remote sensing applications in grassland monitoring // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 12. Article 2903. DOI: 10.3390/rs14122903.
30. Zhao Y., Mao D., Zhang D. et al. Mapping *Phragmites australis* aboveground biomass in the Momoge Wetland Ramsar site based on Sentinel-1/2 images // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 3. Article 694. DOI: 10.3390/rs14030694.

Research on the possibilities of determining the structural characteristics of plant communities dominated by reeds using high-resolution satellite imagery, ground measurements and unmanned aerial vehicles

S. S. Shinkarenko¹, S. A. Bartalev¹, N. V. Litvinova²

¹ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

² Astrakhan State Nature Biosphere Reserve, Astrakhan 414021, Russia
E-mail: shinkarenko@d902.iki.rssi.ru

Plant communities dominated by reeds (*Phragmites altissimus* (Benth.) Mabilie, *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) are widely distributed in floodplain and delta landscapes. Despite their significant biospheric role and potential for industrial use, insufficient attention has been paid to the mapping and assessment of these communities in Russia. The objective of this study is to explore the possibilities of mapping biomass and vegetation height in reed-dominated communities in the Volga Delta using Sentinel-1/2 satellite data supported by ground measurements and aerial surveys conducted with a drone. Allometric relationships between the heights, stem diameters of reeds, and biomass were established for 92 sample plots within the Astrakhan Nature Reserve in the Volga Delta enabling the use of aerial imagery to obtain reference data through photogrammetric methods. The application of vegetation height calculated photogrammetrically based on aerial imagery across 27 test polygons combined with temporally distinct satellite data and the Random Forest non-parametric regression method yielded a high accuracy in mapping heights (coefficient of determination $R^2 = 0.80$, root mean square error (RMSE) 0.46 m) and biomass ($R^2 = 0.65$, RMSE = 12.6 t/ha) of reed-dominated communities in the Volga Delta. Thus, the approach employed proves to be effective for mapping the biomass of reed communities in the Volga Delta and similar landscapes.

Keywords: wetlands, Astrakhan region, Volga Delta, phytomass, Sentinel-2, reed

Accepted: 10.09.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-188-202

References

1. Barmin A. N., Golub V. B., Instructive lesson of results of reed thickets operation in the Volga river delta, *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2000, Vol. 2, No. 2, pp. 295–299 (in Russian).
2. Bartalev S. A., Khvostikov S. A., *Certificate of state registration of a computer program No. 2023666251 Russian Federation. FORS-MachLearn*, No. 2023664950, Statement 07.14.2023, Publ. 07.27.2023.
3. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Serykh I. V., Lebedev S. A., Climatic changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea (1980–2020), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 5, pp. 277–291 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291.
4. Golub V. B., Nikolaychuk L. F., L. G. Ramensky and allometry of plants (history and current state of the problem), *Raznoobrazie rastitel'nogo mira*, 2021, No. 1(8), pp. 30–50 (in Russian), DOI: 10.22281/2686-9713-2021-1-30-50.
5. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of

- environmental study and monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284 (in Russian).
6. Novikova N. M., Iljina I. S., Safronova I. N., Mapping the flood-plain vegetation of the Lower Volga river, *Geobotanicheskoe kartografirovaniye*, 2000, No. 1998–2000, pp. 62–77 (in Russian), DOI: 10.31111/geobotmap/1998-2000.62.
 7. Papchenkov V. G., About distribution of *Phragmites altissimus* (Benth.) Nabile (Poaceae), *Rossiiskii zhurnal biologicheskikh invazii*, 2008, Vol. 1, No. 1, pp. 36–41 (in Russian).
 8. Sokolova N. A., Kostin V. E., Khlobzheva I. N. et al., Functional use of winter harvesting reed biomass in the Lower Volga regions, *Problemy regional'noi ekologii*, 2020, No. 5, pp. 25–30 (in Russian), DOI: 10.24412/1728-323X-2020-5-25-30.
 9. Khoroshev A. V., Kalmykova O. G., Dusaeva G. Kh., Evaluation of the NDVI index as a source of information on aboveground phytomass in steppes, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2023, No. 3, pp. 27–43 (in Russian), DOI: 10.31857/S020596142303003X.
 10. Chuvashov A. V., Malov D. N., Stepanova N. Yu., Golub V. B., Assessment of plant community dynamics in the eastern part of the Volga river delta for the period of 1980–2023, *Arid ecosystems*, 2024, Vol. 30, No. 1, pp. 67–74 (in Russian), DOI: 10.24412/1993-3916-2024-1-67-74.
 11. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A. (2023a), Analysis of the influence of species composition, projective cover, and phytomass of arid landscape pasture vegetation on spectral reflectance properties based on ground measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 3, pp. 176–192 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-176-192.
 12. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A. (2023b), Application of remote sensing data for wetlands large-scale monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 6, pp. 9–34 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-9-34.
 13. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Analysis of the relationship between structural and spectral-reflective characteristics of vegetation in arid grassland landscapes, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, Vol. 21, No. 3, pp. 171–187 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-171-187.
 14. Shinkarenko S. S., Ivanov N. M., Berdengalieva A. N., Spatio-temporal dynamics of burnt areas in federal protected areas of South-East of the European part of Russia, *Nature Conservation Research*, 2021, Vol. 6, No. 3, pp. 23–44 (in Russian), DOI: 10.24189/ncr.2021.035.
 15. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Berdengalieva A. N. (2022a), Satellite observations of reed fire smoke on the Lower Volga, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 2, pp. 93–105 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-93-105.
 16. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Berdengalieva A. N., Ivanov N. M. (2022b), Spatio-temporal analysis of burnt area in The Lower Volga floodplain, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 1, pp. 143–157 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-143-157.
 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, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 3, pp. 119–135 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-119-135.
 18. Yanovskiy A. A., Sozinov O. V., Automated remote express evaluation of the distribution of *Phragmites australis* reed beds prospective for fuel biomass harvesting, *Rastitelnye resursy*, 2017, Vol. 53, No. 4, pp. 555–580 (in Russian).
 19. Asaeda T., Karunaratne S., Dynamic modeling of the growth of *Phragmites australis*: model description, *Aquatic Botany*, 2000, Vol. 67, Issue 4, pp. 301–318, DOI: 10.1016/S0304-3770(00)00095-4.
 20. Baibagyssov A., Thevs N., Nurtazin S. et al., Biomass resources of *Phragmites australis* in Kazakhstan: Historical developments, utilization, and prospects, *Resources*, 2020, Vol. 9, Article 74, DOI: 10.3390/resources9060074.
 21. Eller F., Guo X., Ye S. et al., Suitability of wild *Phragmites australis* as bio-resource: Tissue quality and morphology of populations from three continents, *Resources*, 2020, Vol. 9, No. (12). Article 143, DOI: 10.3390/resources9120143.
 22. Köbbing J. F., Thevs N., Zerbe S., The utilisation of reed (*Phragmites australis*): A review, *Mires and Peat*, 2013, Vol. 13, Article 1.
 23. Loupian E., Burtsev M., Proshin A. et al., Usage experience and capabilities of the VEGA-Science System, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 1, Article 77, DOI: 10.3390/rs14010077.
 24. Li W., Dou Z., Wang Y. et al., Estimation of above-ground biomass of reed (*Phragmites communis*) based on in situ hyperspectral data in Beijing Hanshiqiao Wetland, China, *Wetlands Ecology and Management*, 2019, Vol. 27, pp. 87–102, DOI: 10.1007/s11273-018-9644-5.
 25. Lu L., Luo J., Xin Y. et al., How can UAV contribute in satellite-based *Phragmites australis* aboveground biomass estimating? *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, Vol. 114, Article 103024, DOI: 10.1016/j.jag.2022.103024.

26. Lucy G.P., Gregory J.M., A systematic review of the factors influencing the estimation of vegetation aboveground biomass using unmanned aerial systems, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Article 1052, DOI: 10.3390/rs12071052.
27. Luo S., Wang C., Xi X. et al., Retrieving aboveground biomass of wetland *Phragmites australis* (common reed) using a combination of airborne discrete-return LiDAR and hyperspectral data, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, Vol. 58, pp. 107–117, DOI: 10.1016/j.jag.2017.01.016.
28. Wang S., Li S., Zheng S. et al., Estimating biomass and carbon sequestration capacity of *Phragmites australis* using remote sensing and growth dynamics modeling: A case study in Beijing Hanshiqiao Wetland nature reserve, China, *Sensors*, 2022, Vol. 22, No. 9. Article 3141, DOI: 10.3390/s22093141.
29. Wang Z., Ma Y., Zhang Y., Shang J., Review of remote sensing applications in grassland monitoring, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 12, Article 2903, DOI: 10.3390/rs14122903.
30. Zhao Y., Mao D., Zhang D. et al., Mapping *Phragmites australis* aboveground biomass in the Momoge Wetland Ramsar site based on Sentinel-1/2 images, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 3, Article 694, DOI: 10.3390/rs14030694.