

УДК 551.435, 551.468.1, 551.4.011:629.783

DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-4-78-92

## УТОЧНЕНИЕ ДЛИНЫ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ АЗОВСКОГО МОРЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СПУТНИКОВ SENTINEL-2

**Вячеслав Владимирович Крыленко**

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, 117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр. 36, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, тел. (86141)2-80-89, e-mail: krylenko.slava@gmail.com

**Марина Владимировна Крыленко**

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, 117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр. 36, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (86141)2-80-89, e-mail: krylenko@mail.ru

**Александр Анатольевич Алейников**

ГК «СКАНЭКС», 108811, Россия, г. Москва, 22-й км Киевского шоссе, Бизнес-парк «Румянцево», корпус А, кандидат географических наук, ведущий специалист, тел. (495)739-73-85, e-mail: shu@scanex.ru

Значения длины береговой линии и площади водного объекта используются при статистических расчетах, планировании экономической деятельности, во многих видах научных исследований. Обзор литературных источников и справочников по этим важным показателям для Азовского моря выявил, что имеющиеся данные противоречивы и устарели. Целью данной работы являлось определение современных значений длины береговой линии и площади Азовского моря на основе данных дистанционного зондирования. При выборе метода определения длины береговой линии в данной работе использовались два варианта: ручная оцифровка и автоматизированное определение границы суша–море по данным дистанционного зондирования (ДДЗ). Проведенные исследования продемонстрировали, что данные спутников Sentinel-2 оптимальны для получения и ревизии основных статистических параметров акватории Азовского моря.

Помимо технологических вопросов, связанных с выбором исходных данных и методов их обработки, проанализированы проблемы, связанные со сложностью и изменчивостью изучаемого природного объекта – Азовского моря и его берегов. В первую очередь, определение точного положения линии берега осложняет его изменчивость, связанная с колебаниями уровня моря, абразионно-аккумулятивными процессами, техногенным воздействием. Также проблемой является отнесение того или иного водного объекта (залива, лагуны, техногенной акватории) к площади моря или включение сухопутного объекта (косы, острова, искусственных территорий) в длину береговой линии.

Полученная в работе общая длина берегов Азовского моря составила 3 430 км, общая площадь – 40 570 км<sup>2</sup>. Длина берегов и площадь Азовского моря без учета обособленных объектов (заливов и лиманов) – 2100 км, площадь – 38 095 км<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** Азовское море, дистанционное зондирование, данные Sentinel-2, длина береговой линии, площадь моря, гидрографическая информация, динамика берега.

### **Введение**

Внутреннее Азовское море, расположенное к северо-востоку от Черного моря и ограниченное побережьями России и Украины, соединяется с Черным морем через Керченский пролив. Основным международным документом, со-

гласно которому определяются границы водных объектов, является издание Международной гидрографической организации (МГО) «Границы океанов и морей» и его приложения [1–3]. Согласно этому документу, граница между Азовским и Черным морями (рис. 1) совпадает с южной границей Керченского пролива, проходящей по линии, соединяющей мыс Такиль (45°06'N – 36°27'Е, Керченский п-ов) с мысом Панагия (45°08'N – 36°38'Е, Таманский п-ов).

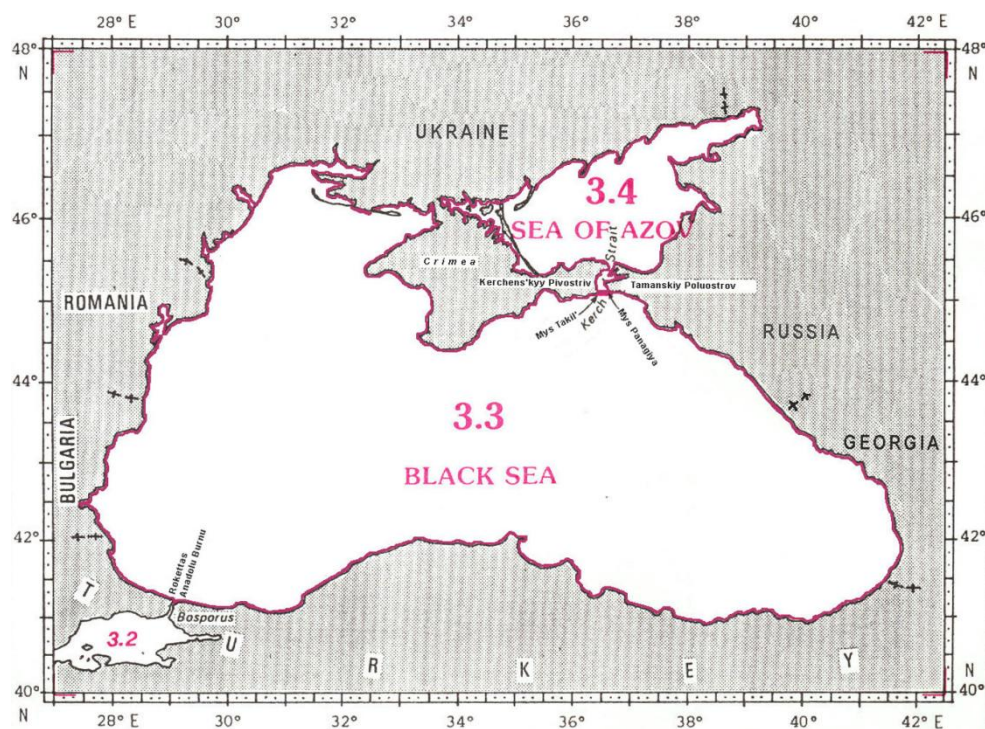


Рис. 1. Черное и Азовское моря [3]

При решении географических задач нередко возникает необходимость вычисления площадей участков физической поверхности Земли и длин линий на этой поверхности; например, при расчетах длин различных линейных сооружений, определении протяженности границ территорий, оценке безопасности пространственно-временного состояния геосистем [4, 5].

В материалах [1–3] детализация положения границ Азовского моря и определяемых ими показателей – длины береговой линии и площади, невысока. Между тем, знание длины береговой линии водного объекта требуется для многих видов научных исследований и для эффективного управления прибрежной зоной. Развитие берегов на современном этапе сопровождается колебаниями планового или высотного положения береговой линии, что является сложным и часто непредсказуемым элементом при проектировании гражданских, промышленных и транспортных объектов, в кадастровом учете. Многие существующие населенные пункты или хозяйственные объекты уже попали в зону воздействия природных процессов, проявляющихся на морском берегу. Комплексное управление береговой зоной моря, как необходимая составляющая для реализации стратегии

устойчивого развития, находится в центре внимания ученых, практиков и политиков. Прибрежная зона южных морей России является важным природным ресурсом, ее параметры необходимы при составлении кадастра туристических ресурсов, информационном обеспечении туристической индустрии [6, 7]. Длина береговой линии водного объекта имеет значение при статистических расчетах, гидрохимическом или биологическом изучении контактной зоны суша–море, площадь водного объекта используется при расчетах массообмена и теплообмена на границе вода–атмосфера. В настоящее время в России существенно сократилась наземная сеть мониторинга состояния водных объектов, и поступающих натуральных данных часто недостаточно, например, для обновления навигационных карт. Кроме того, разработка планов минимизации негативных последствий береговых экзогенных процессов и проектирование берегозащитных сооружений затруднены без наличия оперативной информации о длине и изменчивости береговой линии.

Для большинства упомянутых выше видов деятельности недостаточно гидрографической информации, приведенной в [1–3]. Поиск более точных и актуальных официальных сведений о границах и статистических показателях Азовского моря не дал результатов. Как видно из таблицы, в разных опубликованных источниках приводятся разные величины статистических показателей Азовского моря [8–19]. Некоторые источники дублируют друг друга, иногда различается часть показателей. Методика получения приведенных в [8–19] величин неизвестна.

#### Гидрографические характеристики Азовского моря

Источник	Длина береговой линии, км	Площадь, км <sup>2</sup>	Объем, км <sup>3</sup>
Океанографический атлас Черного и Азовского морей [8]	1 860	39 000	290
Национальный атлас России [9]	–	39 000	290
Википедия – Азовское море [10] (указаны два варианта площади)	1 472	39 000 37 800	–
Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона [11]	1 472,2	37 604,6	–
Азовское море [12]	2 686	37 800	320
Британская энциклопедия (Восточная Европа) [13]	–	37 600	–
Атлас мира [14]	–	37 600	–
Академическая американская энциклопедия [15]	–	38 850	–
Моря СССР [16]	–	39 100	290
Моллюски Азовского моря [17]	2 686	39 000	323
Результаты экспедиционных океанографических исследований Азовского и прилегающей части Черного морей в 1997–2004 гг. [18]	2 686	39 000	323
Гидрологические исследования Азовского моря [19]	–	37 603,9	–

Целью данной работы является определение современных значений длины береговой линии и площади Азовского моря, которые будут возможно использо-

вать в тех или иных научных исследованиях. Особо следует отметить, что у данной работы нет цели изменить установленные на данный момент государственные, административные и экономические границы или принципы их проведения.

### ***Материалы и методы***

Проблема точного определения длины береговой линии морей активно исследуется учеными со второй половины XX в. Льюис Ричардсон ввел понятие «парадокс береговой линии» [20], а Бенуа Мандельброт [21] поставил вопрос: чему равна длина береговой линии Великобритании? Исследователями было показано, что невозможно абсолютно точно определить длину линии побережья из-за фрактальных свойств береговых линий. По мере того, как увеличивается масштаб, приходится учитывать все больше мысов и бухт – длина береговой линии увеличивается, и объективного предела увеличению длины береговой линии не существует. Соответственно, измерить длину береговой линии возможно только приблизительно. Исходя из этого, реальная длина береговой линии природного объекта всегда отличается от измеренной.

При выборе метода определения длины береговой линии в данной работе рассматривались два варианта: 1 – ручная оцифровка с использованием картографического материала или данных дистанционного зондирования; 2 – автоматизированное определение границы суша–море по данным дистанционного зондирования. Выбор источника данных для обоих методов определялся условиями единовременности съемки для всей акватории Азовского моря, пространственным охватом, детальностью и актуальностью исходных материалов.

Традиционно длина береговой линии и площадь водных объектов определялись по навигационным или топографическим картам. На точность определения влияют систематические ошибки, связанные с погрешностями картографирования или разными подходами к определению положения береговой линии. Карты, содержащие всю береговую линию Азовского моря, недостаточно детальны и, в значительной степени, устарели. Региональные навигационные карты более детальны, однако их актуальность различна. Такой же недостаток присущ электронным навигационным картам, так как информация по положению береговой линии обновляется редко. Кроме того, само положение береговой линии преимущественно отражает интересы именно мореплавателей, что неизбежно приводит к системным ошибкам.

Современные данные дистанционного зондирования лишены многих отмеченных недостатков. Появление технологий многозональной спутниковой съемки высокого и среднего разрешения открыло новые возможности для уточнения границ и площадей водных объектов.

Для ручной оцифровки требовались данные дистанционного зондирования (ДДЗ), позволяющие получить единовременную информацию по всей береговой линии Азовского моря, с достаточным разрешением для необходимой точности определения положения береговой линии. Для автоматической оцифров-



ки, помимо перечисленных требований, определяющим условием было наличие спектральных каналов для точного определения границы вода–суша.

По сочетанию характеристик оптимальными для обработки оказались данные с некоммерческих спутников Sentinel-2, оснащенных оптико-электронным мультиспектральным сенсором (MultiSpectral Instrument – MSI), выполняющим съемку в 13 спектральных каналах [22, 23]. Космический аппарат Sentinel-2А был запущен 23 июня 2015 г., позднее, 7 марта 2017 г. был запущен второй аппарат Sentinel-2В. В пользу выбора данных Sentinel-2 [24] послужила высокая частота съемки для расширения возможности выбора оптимальных дат; пространственный охват, обеспечивающий единовременность съемок для всего моря; наличие необходимых спектральных каналов для точного определения границы суша–море. Детальности снимков Sentinel-2 (10 м в пикселе для выбранных спектральных каналов) достаточно для точного определения положения береговой линии, кроме того, происходит генерализация небольших неровностей.

Для автоматической обработки снимков применялось программное обеспечение ScanEx Image Processor<sup>®</sup>. Маска водной поверхности рассчитывалась с использованием формулы «normalized difference water index» (NDWI):  $NDWI = (Green - NIR)/(Green + NIR)$ , где Green и NIR – соответственно зеленый и ближний инфракрасный спектральные каналы [25]. Полученная маска водной поверхности использовалась для определения положения уреза: значения в растрах разделялись на два класса (воду и сушу) и конвертировались в полигональный векторный класс объектов. Периметр и площадь полигонов соответствовали длине береговой линии и площади рассматриваемых акваторий или островов.

Сравнение значений, полученных ручной и автоматической оцифровкой, показало, что различие по определению площади не превышает 0,1 %, по определению длины береговой линии – 1,15 %. Положение точек излома линии при ручной и автоматической оцифровке практически идентично. Анализ причин появления ошибок показал, что они возникают вследствие учета/неучета различных частей акватории при ручной или автоматической оцифровке. В связи с этим рекомендуется проводить дополнительный ручной контроль для участков с наиболее сложной конфигурацией берега.

Однако, как стало ясно в процессе работы, основная проблема заключалась не в определении положения линии уреза на космическом снимке, а в принятии решения, является ли конкретный участок морским берегом.

### *Обсуждение и результаты*

Несмотря на очевидную простоту понятия «береговая линия» (линия пересечения поверхности моря или озера с поверхностью суши), при определении ее положения для крупного водного объекта возникает немало проблем. Для морских берегов характерна плановая и высотная изменчивость положения уреза, связанная с колебаниями уровня моря или абразионно-аккумулятивными процессами. Кроме того, изменения положения уреза могут быть результатом

биологических процессов или антропогенного воздействия. Соответственно, в условиях Азовского моря для предотвращения ошибок при определении положения линии берега необходимо учитывать: колебания уровня моря, интенсивность абразионно-аккумулятивных процессов, наличие околководной растительности, техногенное воздействие.

Азовское море имеет небольшие уклоны дна. В связи с этим небольшое изменение уровня моря приводит к значительным изменениям планового положения береговой линии. Приливов в Азовском море нет. Величина внутригодового изменения уровня Азовского моря составляет около 20 см, межгодовая изменчивость уровня не превышает нескольких сантиметров [8, 9, 16, 26]. Наиболее значительно уровень моря изменяется в результате синоптических короткопериодных процессов. При резких изменениях атмосферного давления в Азовском море возникают сейши с суточным периодом величиной 20–50 см. Особенно велики изменения уровня в результате ветровых стонов и нагонов. Наибольшая амплитуда колебаний уровня – 5,8 м – наблюдается в восточной части моря (Таганрогском заливе) (рис. 2) [8, 16]. На рис. 2 представлен пример изменения пространственного положения линии уреза при сильном стоне в Таганрогском заливе. Падение уровня моря на 1,5 м вдоль морского края дельты реки Дон привело к смещению уреза на несколько километров. Кроме того, следствием штормовых и ветровых подъемов уровня является подъем уровня (соответственно – изменение длины береговой линии и площади) гидравлически связанных с морем водных объектов – лагун и лиманов.

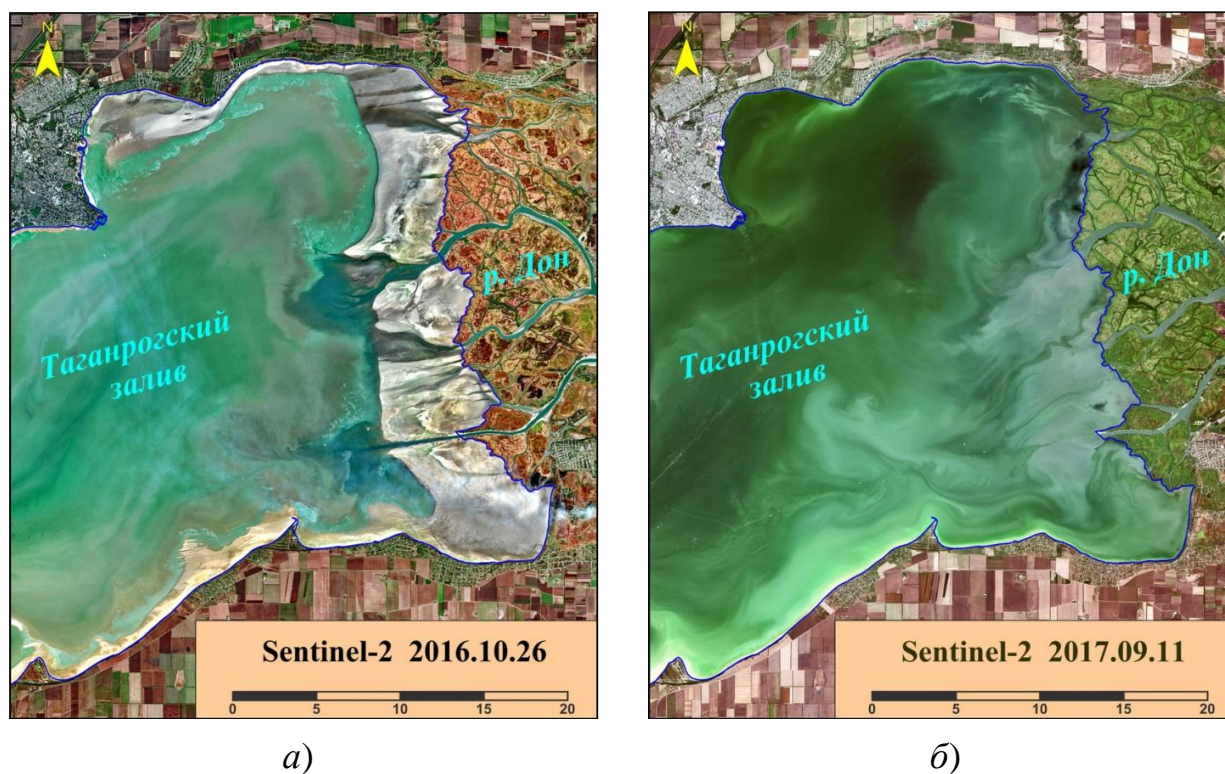


Рис. 2. Изменение положения уреза в Таганрогском заливе:  
*а)* при стоне; *б)* при нормальном уровне воды

Для берегов Азовского моря характерна высокая изменчивость планового положения уреза, связанная с абразионно-аккумулятивными процессами. Для коренных берегов, сложенных легкоразмываемыми горными породами, характерно постоянное отступление, скорость которого на некоторых участках достигает 1–2 м в год. Конфигурация и площадь аккумулятивных форм также значительно изменяются, однако такие изменения могут носить как необратимый (смещение пространственного положения), так и периодический характер (циклические колебания положения уреза). За последние десятилетия существенно расширились теоретические представления о механизмах развития берегов Азовского моря [27], причинах и величинах их динамики. Отмечено, что, несмотря на высокую изменчивость, данные берега обладают определенной устойчивостью среднемноголетнего планового положения линии уреза. Например, в результате экстремального шторма в 2014 г. была размывта дистальная часть косы Долгая (рис. 3), но к настоящему моменту отмечается возникновение цепочки островов по оси размывтой косы. На аккумулятивных берегах, сложенных песком или ракушей, постоянно чередуются циклы размыва и аккумуляции, амплитуда смещения береговой линии составляет 20–50 м (рис. 4).

На защищенных от волн участках берега (в глубоких заливах или в тыльной части кос) вдоль уреза формируется широкая полоса околководной растительности. Морская граница этой растительности имеет сезонную и многолетнюю изменчивость. Определение положения уреза при наличии такой полосы затруднительно [28].

Также, изменение положения линии уреза происходит вследствие прямого антропогенного воздействия. Для Азовского моря, как правило, это выражается в создании искусственных территорий, отчленении лиманов путем создания дамб и регулировании водообмена между ними и морем, реже – в искусственном дноуглублении.

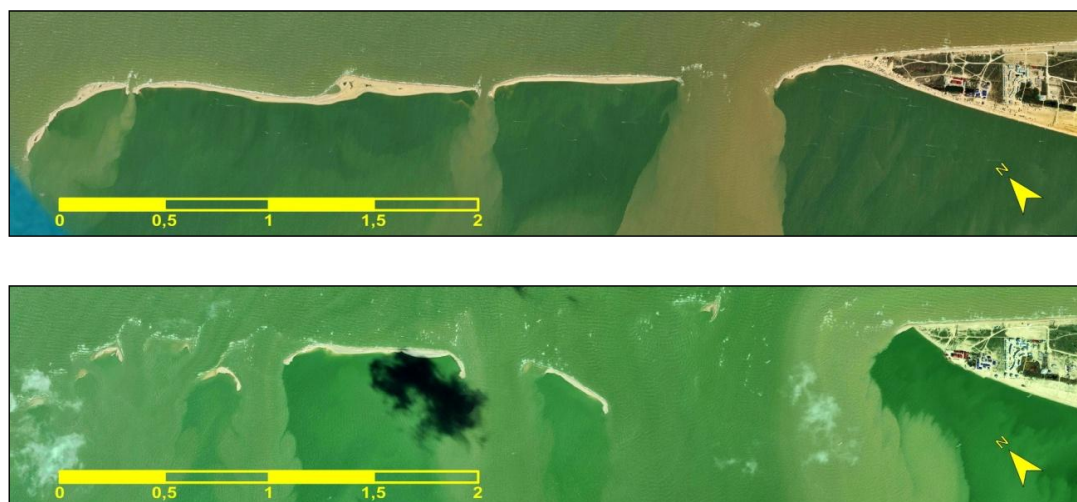


Рис. 3. Изменение дистальной части косы Долгая в результате экстремального шторма в сентябре 2014 г.



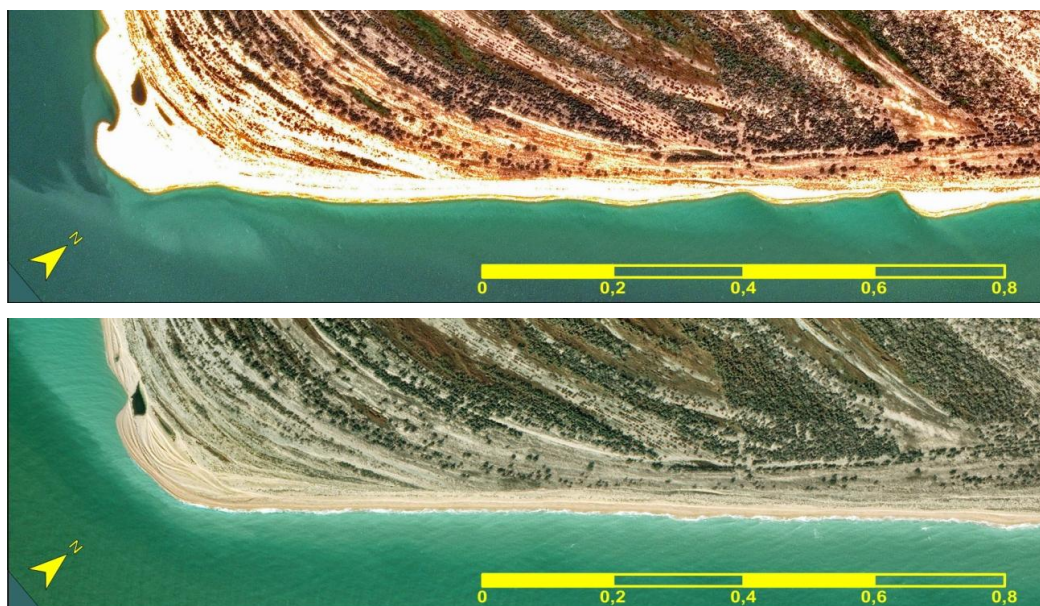


Рис. 4. Периодические изменения конфигурации линии уреза у оконечности Обиточной косы

Таким образом, для Азовского моря наиболее сложными для определения длины береговой линии являются следующие участки.

1. Свободные и замыкающие аккумулятивные формы. Как правило, их тыльная сторона имеет изрезанную береговую линию с множеством заливов, полуостровов и островов (рис. 5, 6).



Рис. 5. Дистальная часть косы Чушка – свободной аккумулятивной формы



Рис. 6. Сезонные изменения уровня в Молочном лимане



Кроме того, на тыльной стороне обычно располагаются ареалы околоводной и водной растительности. Дистальная часть кос тоже отличается сложной и изменчивой формой (см. рис. 5).

2. Лагуны и лиманы, отчлененные от моря естественными или искусственными преградами (рис. 6–8). Вследствие малой глубины, при изменении уровня воды в лагуне, конфигурация берега полностью изменяется. В летний период отчлененные части лагун иногда полностью высыхают. Особо следует упомянуть залив (лагуну) Сиваш, его глубина составляет всего 0,5–1 м (максимум 3 м) [29]. Водообмен залива Сиваш с морем осуществляется через сложную систему протоков (рис. 7). Фактически этот водный объект является отдельной сложной геосистемой, обособленной от геосистемы моря [19] и находящейся под сильнейшим антропогенным прессом [30]. Тем не менее, документами МГО [2, 3] залив Сиваш отнесен к Азовскому морю (см. рис. 1), в отличие от других крупных лагун и лиманов (Молочного, Миусского и др.).



Рис. 7. Система протоков, по которым осуществляется водообмен залива Сиваш с Азовским морем

3. Острова. Чаще всего острова в Азовском море небольшие и являются частями крупных аккумулятивных форм (см. рис. 5) или расположены вдоль морского края дельт крупных рек. Большинство островов сложены рыхлыми грунтами, поэтому отличаются высокой изменчивостью береговой линии.

4. Искусственные территории, выдвинутые в акваторию моря, или искусственные акватории, отчлененные от моря техногенными сооружениями. Вопрос, считать ли их частью суши/моря и учитывать ли при расчетах длины береговой линии, решается в каждом конкретном случае индивидуально (рис. 8).



Рис. 8. Техногенно измененный берег, г. Мариуполь

Исходя из разнообразия типов берегов, сложности их конфигурации и режима [31], а также в связи с наличием различных целевых групп потребителей получаемой информации, основными путями определения статистических показателей для Азовского моря в данной работе были:

- 1) определение длины береговой линии и площади моря в наиболее обобщенном варианте;
- 2) определение вариантов статистических показателей, различающихся подходами к учету (не учету) различных природных или антропогенных объектов.

Вариант 1. При выделении подлежащих учету сухопутных объектов и акваторий учитывалось положение уреза при среднем уровне моря. Учтены (рис. 9) площади и длина береговой линии акваторий заливов, лагун и лиманов, имеющих периодически двусторонний водообмен с морем. Исходя из этого подхода, лиманы Молочный, Утлюкский, Миусский и залив Сиваш учитывались в общей статистике. Включены берега кос, полуостровов и искусственных территорий, имеющих хотя бы часть времени года сухопутную связь с материком. При выделении подлежащих учету конкретных природных или техногенных сухопутных объектов определяющей была убежденность в их долговечности, основанная на изучении береговых процессов и технологий берегоукрепления. При расчете по варианту 1 длина берегов Азовского моря на 2018 г. составила 3 430 км, площадь моря – 40 570 км<sup>2</sup>.

Вариант 2. Учтены только длины береговой линии и площадь заливов, лагун и лиманов, имеющих большую часть года двусторонний водообмен с морем. Исходя из этого подхода, лиманы Молочный, Утлюкский и залив Сиваш не учитывались в общей статистике. В Миусском лимане учтена только акватория, имеющая непосредственный водообмен с морем и не попадающая под влияние



плотины. Учтены берега всех кос, полуостровов и искусственных территорий, имеющих большую часть времени сухопутную связь с материком. По варианту 2 длина берегов Азовского моря на 2018 г. составила 2 100 км, площадь моря – 38 095 км<sup>2</sup>.

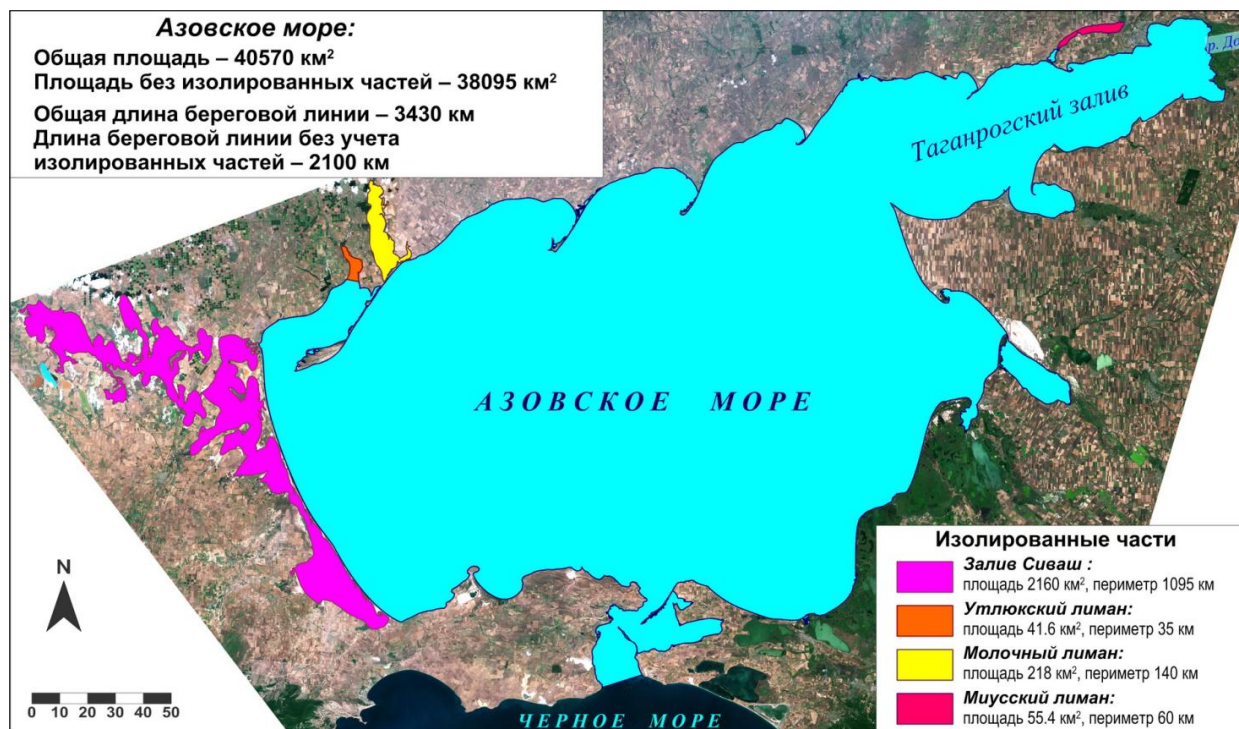


Рис. 9. Азовское море и его гидрографические характеристики

### Заключение

Обзор имеющихся литературных данных по важным статистическим показателям Азовского моря – длине береговой линии и площади, показал, что они противоречивы и устарели. Анализ современных методов получения перечисленных показателей позволил установить, что при уточнении линейных и площадных размеров акваторий внутренних морей следует учитывать как индивидуальные особенности изучаемой акватории, так и целевое назначение получаемой статистической информации. Кроме того, необходима постоянная ревизия и коррекция этих показателей, быстро изменяющихся в результате колебания уровня моря и динамики берегов.

Представленные исследования продемонстрировали, что данные с некоммерческих спутников Sentinel-2 применимы для получения и ревизии таких статистических параметров акватории Азовского моря, как длина береговой линии, площадь водной поверхности, площадь островов и т. п.

Сравнение полученных ручной и автоматической оцифровкой значений показало, что их различие не принципиально. С учетом трудозатрат при ручной и автоматической оцифровке, наиболее оптимален вариант автоматической



обработки с последующим ручным контролем. Контроль и коррекцию должен производить специалист, владеющий информацией о гидрологических особенностях исследуемой акватории, типах и состоянии ее берегов.

### **Благодарности**

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 19-45-230004). Помощь в получении и обработке данных дистанционного зондирования оказал SCANEX R&D Centre (Russia). Использованы сведения о развитии берега, гидрологических и гидро-литодинамических особенностях отдельных участков, полученные при выполнении проекта РФФИ № 18-05-00333 и темы Госзадания № 0149-2019-0014.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. International Hydrographic Organization [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iho.int/srv1/index.php?lang=en> (дата обращения: 15.04.2019).
2. ИНО publication S-23, Limits of Oceans and Seas (Draft 4th Edition, 2002) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.iho.int/mtg\\_docs/com\\_wg/S-23WG/S-23WG\\_Misc/Draft\\_2002/Draft\\_2002.htm](https://www.iho.int/mtg_docs/com_wg/S-23WG/S-23WG_Misc/Draft_2002/Draft_2002.htm) (дата обращения: 15.04.2019).
3. The Mediterranean region and its sub-divisions. – Monaco : ИНО publication, 2002. – 24 p.
4. Вовк И. Г., Епифанцева А. А. Вычисление длины линии, расположенной на физической поверхности Земли // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 101–106.
5. Обиденко В. И. Определение метрических параметров территории Российской Федерации средствами геоинформационных систем // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 18–33.
6. Мекуш Г. Е., Ушакова Е. О. Оценка ценности экосистемных услуг для развития рекреации и туризма // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 200–209.
7. Жарников В. Б., Конева А. В. О проблеме кадастра туристских ресурсов и его основном содержании // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 4. – С. 148–155.
8. Oceanographic Atlas of the Black Sea and the Sea of Azov [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://charts.gov.ua/oabs\\_en.htm](http://charts.gov.ua/oabs_en.htm) (дата обращения: 17.04.2019).
9. Национальный атлас России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://национальныйатлас.рф/cd2/254-257/254-257.html> (дата обращения: 15.05.2019).
10. Азовское море [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Азовское\\_море](https://ru.wikipedia.org/wiki/Азовское_море) (дата обращения: 17.04.2019).
11. Азовское море. Энциклопедический словарь / под ред. И. Е. Андреевского, издатели: Ф. А. Брокгауз (Лейпциг), И. А. Ефрон (С.-Петербург). – СПб., 1890. – Т. 1. – С. 234–235.
12. Борисов В., Капитонов Е. Азовское море. – Краснодар : Изд-во Краснодар, 1978. – 278 с.
13. Encyclopædia Britannica. Sea, Eastern Europe. Sea of Azov [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.britannica.com/place/Sea-of-Azov> (дата обращения: 15.04.2019).
14. Worldatlas [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.worldatlas.com/aatlas/infopage/seaofazov.htm> (дата обращения: 15.04.2019).
15. Academic American encyclopedia. – Grolier Inc., 1996. V. 2. – 338 с.
16. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. – М. : МГУ, 1982. – 192 с.
17. Anistratenko V. V., Khaliman I. A., Anistratenko O. Yu. The Molluscs of the Sea of Azov. – Kyiv : Naukova dumka, 2011. – 173 p.
18. Результаты экспедиционных океанографических исследований Азовского и прилегающей части Черного морей в 1997–2004 гг. / Г. Г. Матишов, Д. Г. Матишов, Ю. М. Гаргопа и др. // Экосистемные исследования среды и биоты Азовского бассейна и Керченского пролива. – Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2005. Т. 7. – С. 19–69.

19. Книпович Н. М. Гидрологические исследования в Азовском море // Труды Азово-Черноморской научно-промысловой экспедиции. – 1932. – Вып. 5. – 188 с.
20. Weisstein E. W. Coastline Paradox. From MathWorld – A Wolfram Web Resource [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://mathworld.wolfram.com/CoastlineParadox.html> (дата обращения: 15.04.2019).
21. Mandelbrot B. How Long Is the Coast of Britain? // Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension, Science, New Series. – 1967. – Vol. 156, No. 3775. – P. 636–638.
22. The operational Copernicus optical high resolution land mission [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://esamultimedia.esa.int/docs/S2-Data\\_Sheet.pdf](http://esamultimedia.esa.int/docs/S2-Data_Sheet.pdf) (дата обращения: 25.04.2019).
23. MultiSpectral Instrument (MSI) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload> (дата обращения: 15.04.2019).
24. Sentinel Online technical website [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-1c/product-formatting> (дата обращения: 25.04.2019).
25. Gao B. C. NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. – 1996. – Vol. 58. – P. 257–266.
26. Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) : динамическое электронное справочное пособие [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.esimo.ru/atlas/Azov/1\\_1.html](http://www.esimo.ru/atlas/Azov/1_1.html) (дата обращения: 27.04.2019).
27. Косьян Р. Д., Крыленко В. В. Современное состояние Азово-Черноморских аккумулятивных берегов и рекомендации по их рациональному использованию. – М. : Научный мир, 2014. – 256 с.
28. Traganos D., Reinartz R. Mapping Mediterranean seagrasses with Sentinel-2 imagery // Marine Pollution Bulletin. – 2018. – Vol. 134. – P. 197–209.
29. Шуйский Ю. Д. Природа Арабатской стрелки на западном берегу Азовского моря // Экология окружающей среды и безопасность жизни. – 2007. – № 4. – С. 22–33.
30. Трансформация залива Сиваш (Азовское море) в условиях роста солености: изменения мейобентоса и других компонент экосистемы (2013–2015 гг.) / Н. В. Шадрин, Н. Г. Сергеева, А. А. Латушкин, Е. А. Колесникова, Л. М. Киприянова, Е. В. Ануфриева, А. А. Чепыженко // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. – 2016. – № 9 (4). – С. 452–466.
31. Kosyan R. D., Krylenko M. V. Modern state and dynamics of the Sea of Azov coasts // Estuarine, Coastal and Shelf Science. – 2019. – V. 224. – P. 314–323.

Получено 31.05.2019

© В. В. Крыленко, М. В. Крыленко, А. А. Алейников, 2019

## LENGTH COASTLINE SPECIFICATION OF THE AZOV SEA USING SENTINEL-2 SATELLITE DATA

*Viacheslav V. Krylenko*

Shirshov Institute of Oceanology RAS, Southern Branch, 36, Nakhimovsky Pr., Moscow, 117997, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (86141)2-80-89, e-mail: krylenko.slava@gmail.com

*Marina V. Krylenko*

Shirshov Institute of Oceanology RAS, Southern Branch, 36, Nakhimovsky Pr., Moscow, 117997, Russia, Ph. D., Leading Researcher, phone: (86141)2-80-89, e-mail: krylenko@mail.ru

**Alexander A. Aleynikov**

SCANEX R&D Centre, 108811, Russia, Moscow, 22 km Kievskoe Sh., Business Park "Rumyantsevo" A, Ph. D., Leading Specialist, phone: (495)739-73-85, e-mail: shu@scanex.ru

The values of coastline length and water body area are used in statistical calculations, planning of economic activity, in many types of scientific research. A review of the literature and reference books on these important indicators for the Azov sea revealed that the available data are contradictory and outdated. The aim of this work was to determine the current values of the coastline length and the area of the Azov sea on the basis of remote sensing data. When choosing a method for determining the coastline length this work used two methods: manual digitization and automated determination of the land-sea boundary from remote sensing data (RSD). Studies have demonstrated that Sentinel-2 satellite data are optimal for obtaining and auditing the main statistical parameters of the Azov sea basin. Apart from technological issues related to the choice of initial data and methods of their processing, the problems associated with the complexity and variability of the studied natural object—the sea of Azov and its shores are analyzed. First of all, the determination of the exact location of the coastline is complicated by its variability associated with sea level fluctuations, abrasion-accumulative processes, technogenic effects. Another problem is the attribution of a water body (Bay, lagoon, man-made water area) to the area of the sea or the inclusion of a land object (spit, Islands, artificial territories) in the length of the coastline.

The obtained total coastline length of the Azov sea was 3,430 km, the total area of 40,570 km<sup>2</sup>. The coastline length and area excluding isolated objects (bays and bays) were 2100 km and 38 095 km<sup>2</sup> respectively.

**Key words:** Azov sea, remote sensing, Sentinel-2 data, coastline length, sea area, hydrographic information, coastline dynamics.

## REFERENCES

1. International Hydrographic Organization. (n. d.). Retrieved from <https://www.iho.int/srv1/index.php?lang=en>.
2. IHO publication S-23, Limits of Oceans and Seas (Draft 4th Edition, 2002). Retrieved from [https://www.iho.int/mtg\\_docs/com\\_wg/S-23WG/S-23WG\\_Misc/Draft\\_2002/Draft\\_2002.htm](https://www.iho.int/mtg_docs/com_wg/S-23WG/S-23WG_Misc/Draft_2002/Draft_2002.htm)
3. *The Mediterranean region and its sub-divisions*. (2002). Monaco: IHO Publ., 24 p.
4. Vovk, I. G., & Epifantseva, A. A. (2016). Calculate of the line length located on the physical surface of the Earth. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(33), 101–106 [in Russian].
5. Obidenko, V. I. (2018). Determination of metric parameters of the Russian Federation territory by geographic information systems. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(2), 18–33 [in Russian].
6. Mekush, G. E., & Ushakova, E. O. (2016). Assessment of the value of ecosystem services for the development of recreation and tourism. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(33), 200–209 [in Russian].
7. Zharnikov, V. B., & Koneva, A. V. (2017). On the problem of the tourist resources' cadastre and its main content. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(4), 148–155 [in Russian].
8. Oceanographic Atlas of the Black Sea and the Sea of Azov. (n. d.). Retrieved from [http://charts.gov.ua/oabs\\_en.htm](http://charts.gov.ua/oabs_en.htm).
9. National Atlas of Russia. (n. d.). Retrieved from <http://национальныйатлас.рф/cd2/254-257/254-257.html> [in Russian].
10. Sea of Azov. (n. d.). Retrieved from [https://ru.wikipedia.org/wiki/Азовское\\_море](https://ru.wikipedia.org/wiki/Азовское_море) [in Russian].
11. Andreevsky, I. E. (Ed.). (1890). *Azovskoe more. Entsiklopedicheskiy slovar': T. 1 [Sea of Azov. Encyclopedic Dictionary: Vol. 1]*. F. A. Brockhaus, & I. A. Efron (Publ.) (pp. 234–235). St. Petersburg [in Russian].



12. Borisov, V., & Kapitonov, E. (1978). *Azovskoe more [Sea of Azov]*. Krasnodar: Krasnodar Publ., 278 p. [in Russian].
13. Encyclopædia Britannica. (n. d.). Sea, Eastern Europe. Sea of Azov. Retrieved from <https://www.britannica.com/place/Sea-of-Azov>.
14. Worldatlas. (n. d.). Retrieved from <https://www.worldatlas.com/aatlas/infopage/seaofazov.htm>.
15. *Academic American encyclopedia: Vol. 2.* (1996). Grolier Inc., 338 p.
16. Dobrovolsky, A. D., & Zalogin, B. S. (1982). *Morya SSSR [Sea of the USSR]*. Moscow: MSU Publ., 192 p. [in Russian].
17. Anistratenko, V. V., Khaliman, I. A., & Anistratenko, O. Yu. (2011). *The Molluscs of the Sea of Azov*. Kyiv: Naukova dumka Publ., 173 p.
18. Matishov, G. G., Matishov, D. G., Gargopa, Yu. M., & et al. (2005). The results of the expeditionary oceanographic studies of the Azov and adjacent parts of the Black Sea in 1997-2004. In *Ekosistemnye issledovaniya sredi i bioty Azovskogo bassejna i Kerchenskogo proliva: T. 7 [Ecosystem studies of the environment and biota of the Azov basin and the Kerch Strait: Vol. 7]* (pp. 19–69). Apatity: KSC RAS Publ. [in Russian].
19. Knipovich, N. M. (1932). Hydrological studies in the Sea of Azov. *Trudy Azovo-Chernomorskoj nauchno-promyslovoj ekspedicii [Proceedings of the Azov-Black Sea Scientific-Fishing Expedition]*, Issue 5, 188 p. [in Russian].
20. Weisstein, E. W. (n. d.). *Coastline Paradox*. From *MathWorld – A Wolfram Web Resource*. Retrieved from <http://mathworld.wolfram.com/CoastlineParadox.html>.
21. Mandelbrot, B. (1967). How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension. *Science*, 156(3775), 636–638.
22. The operational Copernicus optical high resolution land mission. (n. d.). Retrieved from [http://esamultimedia.esa.int/docs/S2-Data\\_Sheet.pdf](http://esamultimedia.esa.int/docs/S2-Data_Sheet.pdf).
23. MultiSpectral Instrument (MSI). (n. d.). Retrieved from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload>.
24. Sentinel Online technical website. (n. d.). Retrieved from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-1c/product-formatting>
25. Gao B. C. (1996). NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257–266.
26. Unified State System of Information on the Situation in the World Ocean. (n. d.). Retrieved from [http://www.esimo.ru/atlas/Azov/1\\_1.html](http://www.esimo.ru/atlas/Azov/1_1.html) [in Russian].
27. Kosyan, R. D., & Krylenko, V. V. (2014). *Sovremennoe sostoyanie Azovo-CHernomorskih akkumulyativnyh beregov i rekomendacii po ih racional'nomu ispol'zovaniyu [The current state of the Azov-Black Sea accumulative shores and recommendations for their rational use]*. Moscow: "Scientific World" Publ., 256 p. [in Russian].
28. Traganos, D., & Reinartz, R. (2018). Mapping Mediterranean seagrasses with Sentinel-2 imagery. *Marine Pollution Bulletin*, 134, 197–209.
29. Shuysky, Yu. D. (2007). The nature of the Arabat Spit on the western shore of the Azov Sea. *Ekologiya okruzhayushchej sredy i bezopasnost' zhizni [Ecology of the Environment and Safety of Life]*, 4, 22–33 [in Russian].
30. Shadrin, N. V., Sergeeva, N. G., Latushkin, A. A., Kolesnikova, E. A., Kipriyanova, L. M., Anufrieva, E. V., & Chepyzhenko, A. A. (2016). Transformation of Sivash Bay (Sea of Azov) under conditions of increasing salinity: changes in meiobenthos and other components of the ecosystem (2013-2015). *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya [Journal of the Siberian Federal University. Biology]*, 9(4), 452–466 [in Russian].
31. Kosyan, R. D., & Krylenko, M. V. (2019). Modern state and dynamics of the Sea of Azov coasts. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 224, 314–323.

Received 31.05.2019

© V. V. Krylenko, M. V. Krylenko, A. A. Aleynikov, 2019