



МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЕНИЙ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ ПО СПУТНИКОВЫМ РАДИОЛОКАЦИОННЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ: НОВЫЙ ПРОСТОЙ ПОДХОД

ПУДЖИАНИКИ Н.Н.

Кафедра гражданского строительства инженерного факультета Университета Удаяны, кампус Джимбаран, г. Букит, пров. Бали, Индонезия
pujjaniki@civil.unud.ac.id

АННОТАЦИЯ

Представляем сокращенный адаптированный перевод доклада индонезийской исследовательницы Ни Ньоман Пуджианики «Мониторинг изменений береговой линии, возникших из-за строительства береговых сооружений, с использованием радара с синтезированной апертурой: новый простой подход» (Pujjaniki, 2022). Этот доклад был сделан в 2022 году в Индонезии на 4-й Международной конференции по гражданскому строительству и инженерной защите окружающей среды. Он также был опубликован в виде статьи в журнале *Earth and Environmental Science* («Науки о Земле и окружающей среде») издательством британской благотворительной научной организации IOP (Institute of Physics – «Институт физики»), фактически ставшей международной. Эта статья находится в открытом доступе по лицензии CC BY 3.0, которая позволяет распространять, переводить, адаптировать и дополнять ее при условии указания типов изменений и ссылки на первоисточник. В нашем случае полная ссылка на источник для представленного перевода (Pujjaniki, 2022) приведена в конце.

В этом исследовании представлен новый простой подход к обнаружению изменений береговой линии в результате строительства береговых сооружений. При этом подходе использовались фильтр нижних частот для уменьшения спекл-шума (устранения спеклов – дифракционных пятен на изображении) и метод Оцу (пороговой бинаризации полутоновых изображений) для создания бинарного изображения. Затем была проведена завершающая морфологическая фильтрация для улучшения бинарного изображения. На последнем этапе выполнялось тщательное выявление контуров береговой линии. Анализ изменений береговой линии проводился с использованием прикладной программы DSAS (Digital Shoreline Analysis System) на платформе ArcGIS – программного комплекса для построения геоинформационных систем.

В целом, этапы обработки при рассматриваемом новом подходе представляют собой полуавтоматические процессы. Для выявления береговой линии не требуется ручной оцифровки.

Предложенный метод был протестирован с использованием двух независимых снимков, полученных со спутников ALOS-1 и Sentinel-1, оснащенных радаром с синтезированной апертурой (Synthetic Aperture Radars – SAR). Исследовался район порта Пенгамбенган в округе Джембрана индонезийской провинции Бали.

Рассматриваемый новый подход дал более хорошие результаты, чем другие хорошо известные методы. Он позволил четко выявить рукотворные береговые сооружения и результаты их воздействий на береговую зону, то есть зоны абразии и аккумуляции. Кроме того, результаты этого исследования могут быть использованы для оценок при будущем развитии порта Пенгамбенган или при перепроектировании существующих береговых сооружений в рассматриваемом районе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

береговая линия моря; мониторинг; береговые сооружения; абразия; аккумуляция; спутниковое радиолокационное изображение; радар с синтезированной апертурой; обработка изображения; фильтрация нижних частот; метод Оцу; морфологическая фильтрация; оконтуривание береговой линии; анализ изменений береговой линии.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Пуджианики Н.Н. Мониторинг изменений береговой линии по спутниковым радиолокационным изображениям: новый простой подход (пер. с англ.) // Геоинфо. 2023. Т. 5. № 9/10. С. 22–29 DOI:10.58339/2949-0677-2023-5-9/10-22–29

COASTLINE **CHANGES MONITORING** INDUCED BY MAN-MADE STRUCTURES USING SYNTHETIC APERTURE RADAR: A NEW SIMPLE APPROACH

PUJIANIKI N.N.

Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Udayana University, Jimbaran Campus, Bukit, Bali, Indonesia
pujianiki@civil.unud.ac.id

ABSTRACT

We present an abridged and adapted translation of the report “Coastline changes monitoring induced by man-made structures using synthetic aperture radar: a new simple approach” by Ni Nyoman Pujianiki, Indonesian engineering surveyor (Pujianiki, 2022). This report was presented at the 4th International Conference on Civil and Environmental Engineering in 2022 in Indonesia (ICCEE 2022). It was also published as an article in the journal “Earth and Environmental Science” by the publishing company of the British scientific society “Institute of Physics” (IOP) that is now virtually international. It is an open access article under the CC BY 3.0 license that allows it to be distributed, translated, adapted, and supplemented, provided that the types of changes are noted and the original source is referred to. In our case, the full reference to the original paper (Pujianiki, 2022) for the presented translation is given in the end.

This study presents a new simple approach to detect the coastline changes due to the construction of man-made structures. The new approach used low-pass filter to reduce the speckles errors and Otsu’s thresholding method to create binary images. Then, a closing morphological operation was conducted to improve the binary image. In the final step, the canny edge detection was used for coastline delineation. The coastlines changes analysis was done by using the Digital Shoreline Analysis System (DSAS).

In general, the processing steps of this new approach is semi-automatic processes, they do not require manual digitization to extract the coastline.

This method was tested using two independent images obtained from the ALOS-1 and Sentinel-1 satellites equipped with synthetic aperture radars (SARs). The study area was located in the Pengambangan Port, Jembrana Regency, Bali, Indonesia. The new approach produced better results than other well-known methods. It detected clearly the man-made structures and the results of the impact of them on the coastal zone, i. e. abrasion and accretion. In addition, the results of this study can be used as evaluation parameters for the future development of the Pengambangan port or for redesigning the present structures.

KEYWORDS:

coastline; monitoring; man-made coastal structures; abrasion; accretion; satellite radar image; synthetic aperture radar; image processing; low pass filtering; Otsu’s method; morphological operation; coastline delineation; coastlines changes analysis.

FOR CITATION:

Pujianiki N.N. Monitoring izmeneniy beregovoy linii po sputnikovym radiolokatsionnym izobrazheniyam: novyi prostoy podhod [Coastline changes monitoring induced by man-made structures using synthetic aperture radar: a new simple approach] (translated from English into Russian) // Geoinfo. 2023. Т. 5. № 9/10. С. 22–29 DOI:10.58339/2949-0677-2023-5-9/10-22–29 (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ ▶

Наблюдения за изменениями береговой линии широко используются в целях получения важной информации для правительства или лиц, принимающих решения. Наборы таких данных за длительные периоды времени необходимы для оценки состояния прибрежных территорий и управления ими [1]. Мониторинг береговой линии может проводиться с использованием прямых полевых исследований или методов дистанционного зондирования, таких как аэрофотосъемка или получение различных спутниковых изображений [2].

Прямые обследования требуют больших затрат времени и средств. Однако хорошо известно, что дистанционное зондирование при периодических измерениях является эффективным способом обнаружения изменений береговой линии с высокой точностью [3].

В целом для получения изображений со спутников существует два типа датчиков – оптические и радиолокационные.

Применение оптических датчиков – это пассивный метод дистанционного зондирования. В этом случае используется отраженная солнечная энергия для получения оптических изображений (фотографий) поверхности Земли, которые легко анализировать. Но оптические датчики не могут давать данные в ночное время и в пасмурную погоду.

Использование радиолокационных датчиков (радаров) представляет собой активный метод дистанционного зондирования. Радар передает электромагнитную волну микроволновой частоты на поверхность Земли и принимает отра-

женную волну [4]. Его работа не зависит от солнечного освещения и может выполняться ночью и при любых погодных условиях [4]. Однако в отличие от оптических фотографий радиолокационные изображения требуют глубоких знаний для их обработки и интерпретации, поскольку они содержат ряд искажений – радиометрических и геометрических.

Определить береговую линию на радиолокационном изображении визуально или с помощью ручной оцифровки непросто. Это требует ряда этапов квалифицированной предварительной обработки, основной обработки и постобработки.

При исследовании, представленном в настоящей статье, был разработан новый простой подход к выделению береговой линии по спутниковому радиолокационному изображению. Предварительная обработка выполнялась с использованием программной платформы SNAP (Sentinel Application Platform – «Платформа приложений для обработки данных со спутников Sentinel»). Основная обработка проводилась с помощью собственной программы, написанной на языке Python, и бесплатной кроссплатформенной геоинформационной системы QGIS (Quantum Geographic Information System). Постобработка осуществлялась с использованием программного комплекса ArcGIS для построения геоинформационных систем, оснащенного прикладной программой DSAS (Digital Shoreline Analysis System – «Цифровая система анализа береговой линии»).

Результаты применения разработанного подхода оценивались визуально с

использованием изображений с сервиса Google Earth Pro, сделанных в соответствующее время. Кроме того, было выполнено сопоставление с результатами автоматического оконтуривания береговой линии, разработанного в исследовании Спинозы и др. [5].

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ И НАБОРЫ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ▶

Район исследования ▶

Район исследования – это район рыболовецкого порта Пенгамбенган (округ Джембрана, провинция Бали, Индонезия) (рис. 1, а). Этот порт был построен в 1976 году. В 2000 и 2003 годах там были построены волнолом, мол и дорога (рис. 1, б, в). В 2014 году были созданы корабельный док и буны (рис. 1, г–е).

На рисунке 1, в видно, что в порту произошло накопление осадков. Это могло быть одной из причин построения бун. Однако эти буны привели к образованию зоны осадконакопления в юго-западной части рассматриваемого района (рис. 1, д, е).

Набор спутниковых данных ▶

В представленном исследовании использовались радиолокационные изображения, полученные со спутников ALOS-1 (Advanced Land Observation Satellite) и Sentinel-1. Эти изображения были бесплатно взяты из архива центра обработки данных наземной станции спутникового слежения Alaska Satellite Facility Геофизического института Университета Аляски в Фэрбенксе (search.asf.alaska.edu/#/).

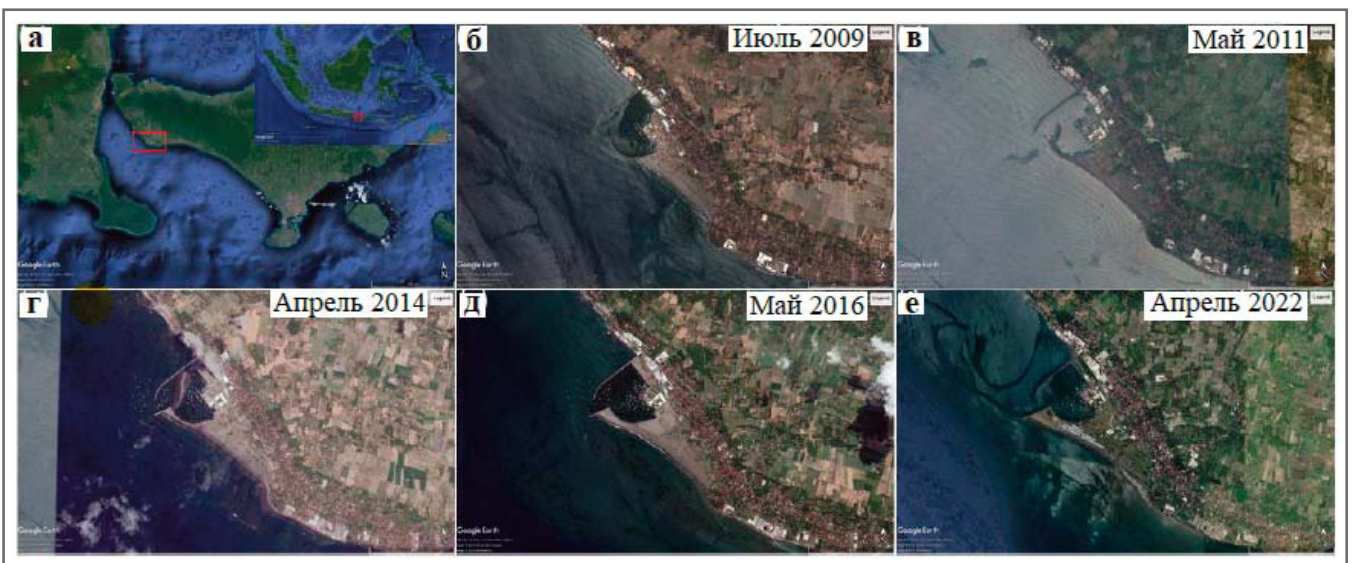


Рис. 1. Район рыболовецкого порта Пенгамбенган (сам порт выделен красным прямоугольником) на космическом снимке, взятом с сервиса Google Earth (а), и фотографии этого района, сделанные в процессе развития порта в июле 2009 г. (б), мае 2011 г. (в), апреле 2014 г. (г), мае 2016 г. (д), апреле 2022 г. (е)

Таблица 1. Набор радиолокационных данных

Наименование спутника	Частота, ГГц (диапазон)	Поляризация	Уровень данных	Пространственное разрешение (м × м)	Дата и время (UTC) наблюдения
ALOS-1	1,27 (L)	Двойная (HV)	Географическая привязка (уровень 1.5)	10 × 10	02.07.2009; 15:16:05
Sentinel-1	5,405 (C)	Двойная (VH)	GRD (амплитудное радиолокационное изображение, трансформированное в проекцию наземной дальности)	10 × 10	13.04.2022; 10:41:35

Спутник ALOS-1 эксплуатируется Японским агентством аэрокосмических исследований (JAXA – Japan Aerospace Exploration Agency), а спутники серии Sentinel-1 эксплуатируются Европейским космическим агентством (ESA – European Space Agency). Эти спутники предназначены для наблюдений за поверхностью Земли с помощью радаров с синтезированной апертурой (Synthetic Aperture Radars – SAR). Более детальная информация об использованных наборах радиолокационных данных представлена в таблице 1.

На рисунке 2 сопоставлены оптические фотографии и радиолокационные изображения, каждая пара из которых была получена в один день. Видно, что буны были построены после 2 июля 2009 года, но до 13 апреля 2022 года.

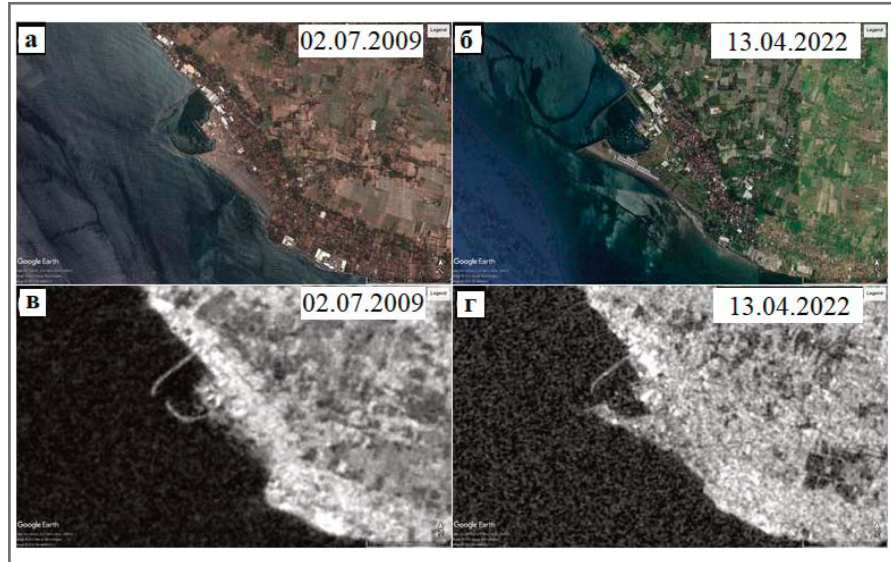


Рис. 2. Сопоставление оптических (а, б) и радиолокационных (в, г) изображений, полученных 2 июля 2009 г. (а, в) и 13 апреля 2022 г. (б, г)

МЕТОД РАБОТЫ ►

Этапы обработки с использованием предложенного метода представлены на рисунке 3. Предварительная обработка радиолокационных изображений в основном состоит из радиометрической калибровки и геометрической коррекции, или геокодирования (преобразования местоположений точек в картографические координаты). Фильтрация нижних частот выполнялась с ядром размером 3×3 в прикладной программе SNAP.

Операция порогового разделения, которая в результате дает бинарное изображение (пороговая бинаризация методом Оцу) и морфологическая фильтрация бинарного изображения для улучшения его качества проводилась с помощью собственной программы, написанной на языке Python. Для выявления границ и выделения береговой линии применялась кроссплатформенная геоинформационная система QGIS. Коррекция на приливные вариации и расчет изменений береговой линии выполнялись с использованием комплекса геоинформационных про-



Рис. 3. Этапы обработки радиолокационных снимков для выделения береговой линии и расчетов ее изменений

Таблица 2. Приливные условия в исследуемом районе во время спутниковых радиолокационных наблюдений

Спутниковые дата и время (UTC)	Местные дата и время (GMT+8)	Условие	Высота прилива, м
02.07.2009; 15:16:05	02.07.2009; 21:16:05	Прилив	1,79
13.04.2022; 10:41:35	13.04.2022; 18:41:35	Прилив	0,93

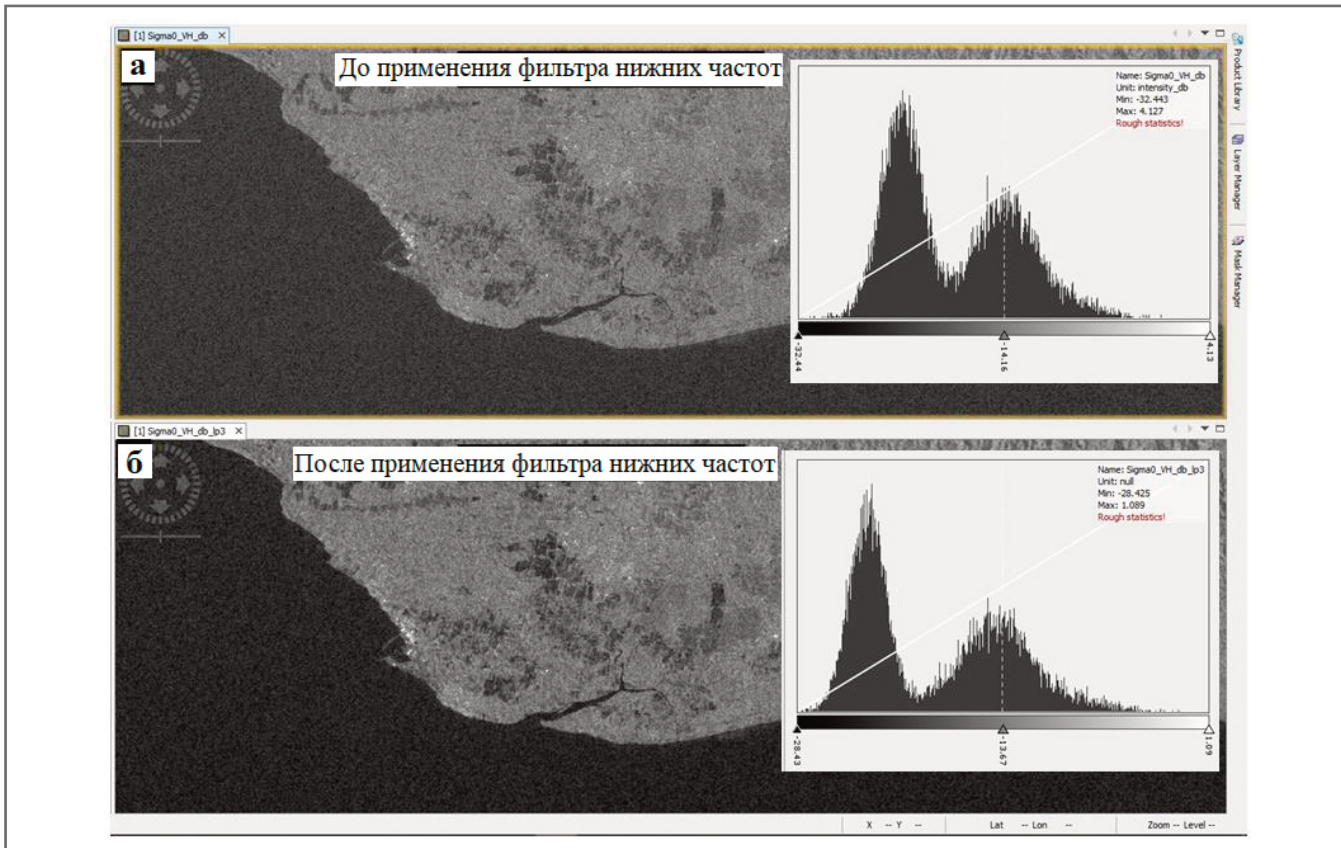


Рис. 4. Изображения и гистограммы: а – до фильтрации нижних частот; б – после применения фильтра нижних частот

граммных продуктов ArcGIS с прикладной программой DSAS.

Данные о приливах в реальном времени были получены из архива на сайте wxtide32.com/. Дата и время этих данных должны были совпадать с датой и временем получения спутниковых радиолокационных изображений. Спутники указывали время наблюдений в формате всемирного координированного времени (UTC – Universal Time Coordinated). Поэтому выполнялось преобразование из формата UTC в местное время. Данные по приливам во время спутниковых радиолокационных наблюдений представлены в таблице 2.

Для проведения коррекции на приливные вариации для береговой линии, выявленной на основе радиолокационного изображения, были необходимы данные об уклоне поверхности пляжа β . Они были получены по индонезийской Национальной цифровой модели рельефа (и данных батиметрии), используе-

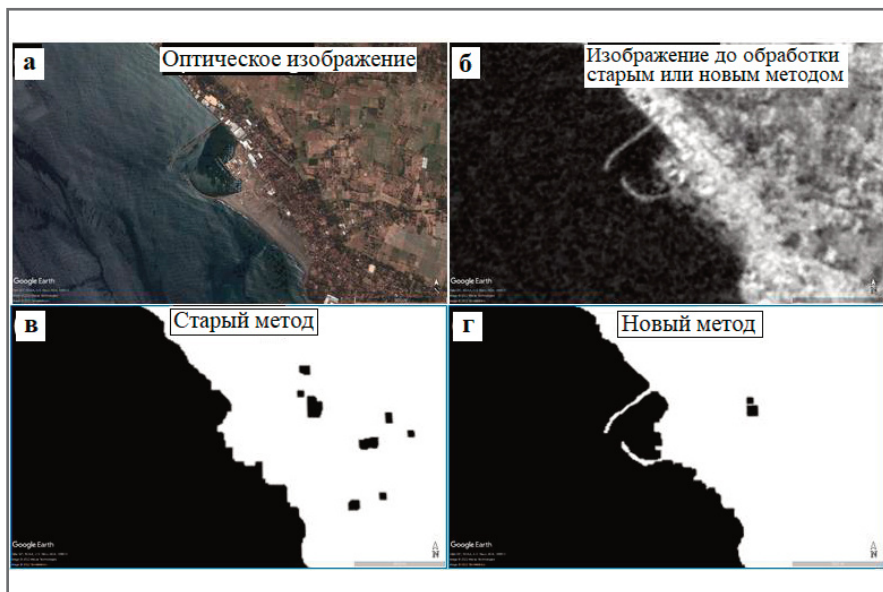


Рис. 5. Сопоставление результатов бинаризации, полученных с помощью предложенного в настоящей статье нового метода и метода, разработанного ранее в работе [5] (здесь называемого старым): а – оптическое изображение, взятое на сайте сервиса Google Earth в качестве эталонного; б – входное изображение для обработки старым или новым методом; в – результат бинаризации старым методом; г – результат бинаризация новым методом

мой для прибрежных районов (National Digital Elevation Model for Coastal Application – DEMNAS).

Расчет поправок на приливные вариации r выполнялся по формуле:

$$r = \frac{X - \text{MSL}}{\beta},$$

где X – высота прилива (м) в момент спутниковых радиолокационных наблюдений; MSL – средний уровень моря (Mean Sea Level).

Если в момент спутниковых радиолокационных наблюдений наблюдался прилив, то исходно выделенная береговая линия смещается в сторону моря. И наоборот, если в момент наблюдений наблюдался отлив, то она смещается в сторону суши.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эффективность применения фильтра нижних частот для повышения качества распределения значений яркости пикселей (выравнивания гистограммы, то есть увеличения контраста) была проверена автором в работе [6], опубликованной ранее. Хорошая гистограмма для выявления береговой линии показывает, что между пикселями для воды и для суши имеется разделение. Это первый процесс, улучшающий окончательный результат по оконтуриванию береговой линии. На рисунке 4 показана эффективность фильтрации нижних частот для повышения качества гистограммы. На рисунке 4, а представлено изображение до применения фильтра нижних частот, а на рисунке 4, б – после.

На рисунке 5 и в таблице 3 сопоставлены результаты использования предложенного в настоящей статье нового метода бинаризации и метода, разработанного ранее в работе [5] (здесь будем называть его старым методом). Рисунок 5 говорит о том, что новый метод дает более хорошие результаты, чем старый. При использовании старого метода исчезла часть реальной береговой линии, образовавшейся в результате строительства волнолома и бун (см. рис. 5, в). Возможно, это связано с сильным эффектом медианной фильтрации с ядром 5×5 . Другая возможная причина – эффект предварительной морфологической фильтрации, использованной при старом методе.

Новый предложенный метод очень четко выявил форму береговой линии за счет строительства волноломов и бун (см. рис. 5, г). Это хорошо согласуется

Таблица 3. Сопоставление нового метода бинаризации, предложенного в настоящей статье, и метода, разработанного ранее в работе [5] (здесь называемого старым)

Процесс или расчет	Новый метод	Старый метод
Фильтрация спекл-шума	Фильтрация нижних частот с ядром 3×3	Медианная фильтрация с ядром 5×5
Бинаризация	Метод Оцу (метод пороговой бинаризации)	Метод Оцу (метод пороговой бинаризации)
Морфологическая фильтрация	Завершающая морфологическая фильтрация	Предварительная и завершающая морфологическая фильтрация
Выявление границ	Тщательное выявление береговой линии	Тщательное выявление береговой линии

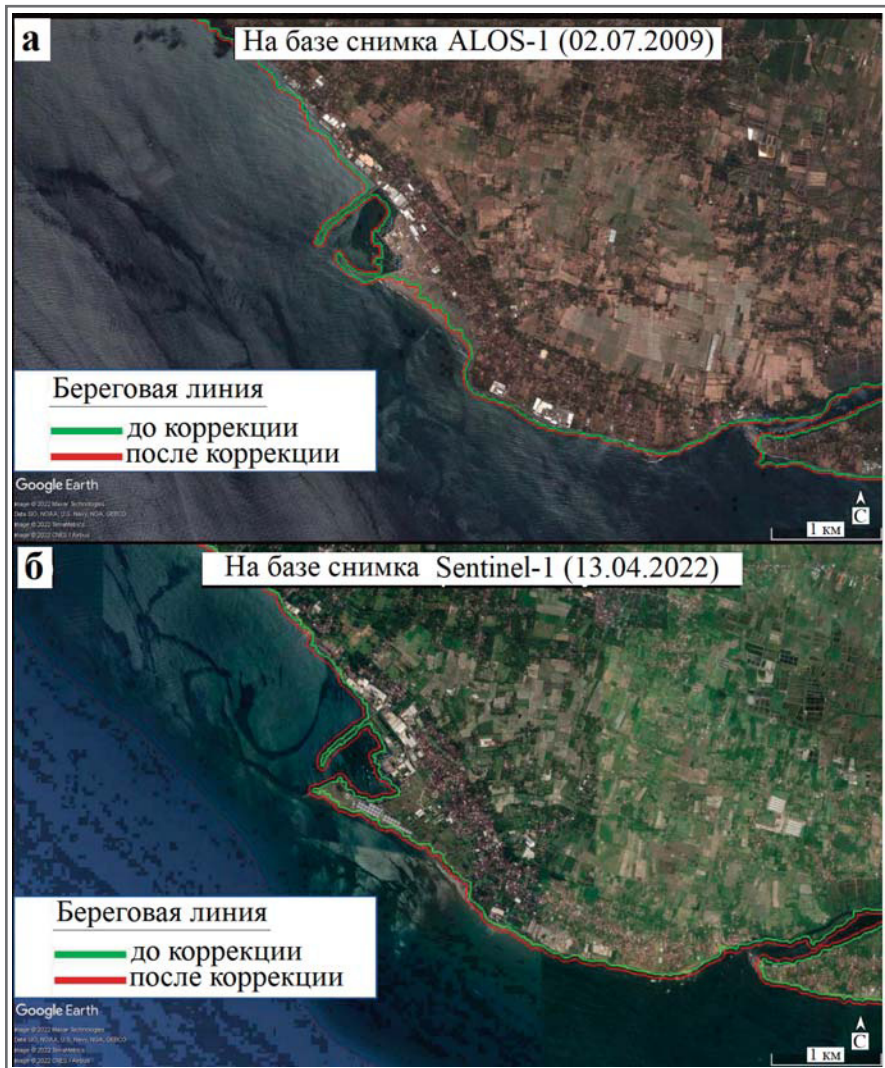


Рис. 6. Результаты коррекции на приливные вариации для очертаний береговой линии, выявленных на основе радиолокационных снимков со спутников ALOS-1 (02.07.2009) (а) и Sentinel-1 (13.04.2022) (б)

с оптическим изображением (см. рис. 5, а), что является одним из ключевых показателей точности результатов разработанного нового метода.

На рисунках 6, а, б показаны результаты коррекции на приливные вариации

для изображений на основе радиолокационных снимков со спутников ALOS-1 (02.07.2009) и Sentinel-1 (13.04.2022) соответственно. Зеленая линия изображает береговую линию до коррекции, а красная линия – после.

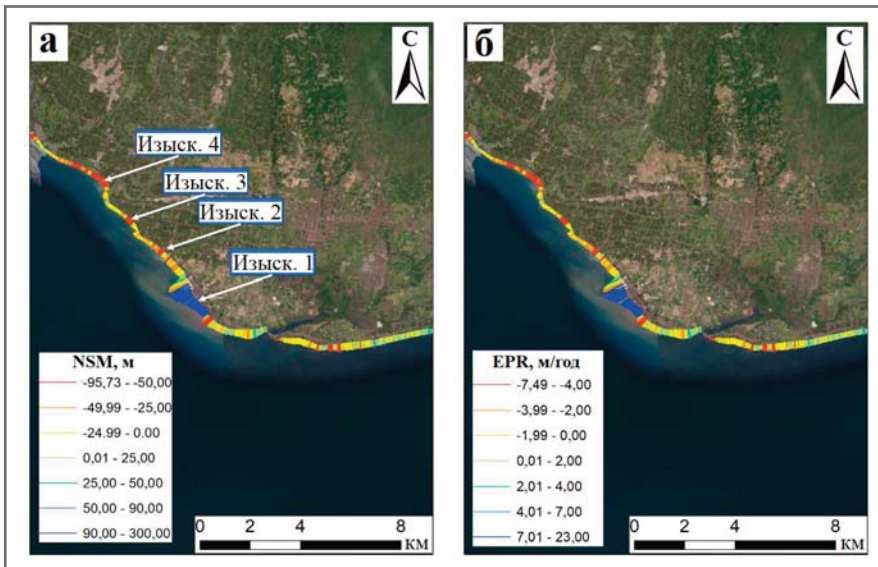


Рис. 7. Результаты окончательных расчетов изменений береговой линии: а – чистые смещения береговой линии за рассматриваемый промежуток времени (NSM, м); б – скорости достижения конечной точки (EPR, м/год)

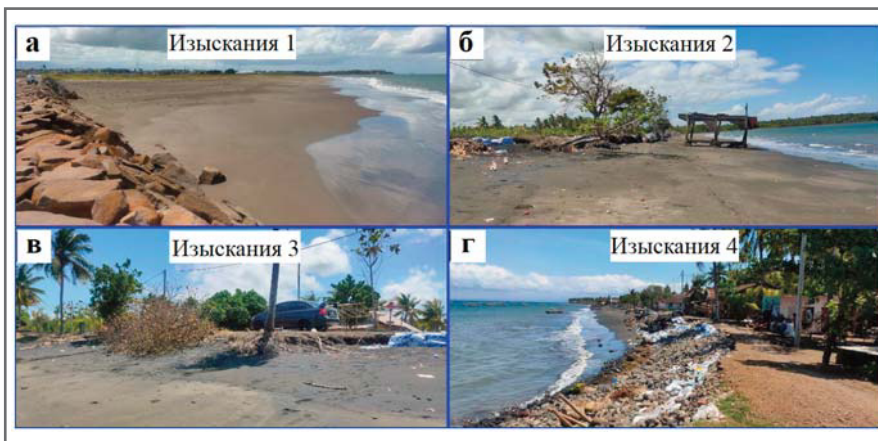


Рис. 8. Фотографии, сделанные в местах полевых исследований после 13 апреля 2022 года (расположение зон этих изысканий показано на рисунке 7, а): а – порт Пенгамбенган (зона изысканий 1); б – пляж Купель (зона изысканий 2); в – пляж Балук (зона изысканий 3); г – пляж Пebuахан (зона изысканий 4)

На рисунке 7, а представлены результаты окончательных расчетов в виде чистых смещений береговой линии изучаемого района за рассматриваемый промежуток времени для каждого трансекта (Net Shoreline Movement – NSM, м). Максимальные значения NSM, составляющие от плюс 90 до плюс 300 м, присутствуют в основном в юго-восточной части исследуемого района и особенно самого порта. Минимальные величины (от минус 95,73 до минус 50,00 м) характерны для северо-западной части этого района.

На рисунке 7, б показаны скорости достижения конечных точек смещения береговой линии за тот же интервал времени для каждого трансекта (End Point Rate – EPR, м/год). Положительные значения EPR в основном составляют от

плюс 7,01 до плюс 23,00 м/год и характерны для юго-восточной части района и особенно самого порта. Они указывают на смещения берега в сторону моря, то есть на аккумуляцию. Отрицательные величины EPR главным образом составляют от минус 7,49 до минус 4,00 м/год и преобладают в северо-западной части района. Они указывают на смещения берега в сторону суши, то есть на эрозию.

Чтобы проверить достоверность результатов использования предложенного метода, было проведено несколько полевых исследований в выбранных местах, которые указаны на рисунке 7, а. Изыскания 1 были проведены в порту Пенгамбенган и подтвердили, что для этой зоны характерна аккумуляция. Изыскания 2 были выполнены на пляже Купель и подтвердили, что для этой зоны

присуща эрозия берега. Изыскания 3 были осуществлены недалеко от пляжа Балук и подтвердили наличие эрозии. По результатам, полученным на основе спутниковых радиолокационных снимков, обработанных новым методом, самая сильная эрозия происходила в рассмотренный промежуток времени на пляже Пebuахан, что и подтвердили изыскания 4 в этой зоне. На рисунках 8, а, б, в, г показаны фотографии участков изысканий 1, 2, 3, 4 соответственно. Эти фотографии были сделаны после 13 апреля 2022 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►

Был представлен новый простой подход к выявлению изменений береговой линии в результате строительства береговых сооружений.

Для обработки спутниковых радиолокационных снимков использовался фильтр нижних частот для уменьшения спекл-шума, а затем применялся метод Оцу (метод пороговой бинаризации полутоновых изображений) для создания бинарных изображений. После этого для улучшения качества бинарных изображений проводилась завершающая морфологическая фильтрация. Для оконтуривания береговой линии использовалось тщательное выявление границ.

Анализ изменений береговой линии выполнялся с помощью прикладной программы DSAS на платформе ArcGIS – программного комплекса для построения геоинформационных систем.

Этапы обработки при разработанном новом подходе представляют собой полуавтоматический процесс, который для выявления береговой линии не требует ручной оцифровки.


Новый подход был протестирован с использованием двух независимых изображений, сделанных в разное время со спутников ALOS-1 и Sentinel-1, оснащенных радарными с синтезированной апертурой (SARs). Исследовался район порта Пенгамбенган (округ Джембрана, провинция Бали, Индонезия).

Как показало сопоставление, предложенный подход дал более хорошие результаты, чем другие известные методы. Он помог четко выявить рукотворные береговые сооружения и их воздействие на прибрежную зону, выраженное в абразии или аккумуляции.

Анализ обработанных новым методом снимков показал, что аккумуляция происходит в основном в юго-восточной части порта Пенгамбенган. Зона самой сильной эрозии расположена в основном в северо-западной части этого района, то есть на

пляже Пебуахан. Это было подтверждено полевыми исследованиями на отдельных участках берега в исследованном районе.

Полученные при данном исследовании результаты могут быть использованы для оценки будущего развития

порта Пенгамбенган или для проектирования существующих там сооружений. 

Источник для перевода ►

(Source for the translation) ►

Pujianiki N. Coastline changes monitoring induced by man-made structures using synthetic aperture radar: a new simple approach // IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1117. Proceedings of the 4th International Conference on Civil and Environmental Engineering, 2022, Bali, Indonesia (ICCEE 2022). Article 012041. DOI:10.1088/1755-1315/1109/1/012003. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1117/1/012041/meta; researchgate.net/publication/366597792_Coastline_changes_monitoring_induced_by_man-made_structures_using_synthetic_aperture_radar_A_new_simple_approach.

Список литературы, использованной авторами переведенной статьи ►

(References used by the authors of the translated article) ►

1. Anfuso G., Pranzini E., Vitale G. An integrated approach to coastal erosion problems in northern Tuscany (Italy): littoral morphological evolution and cell distribution // *Geomorphology*. 2011. Vol. 129. P. 204–221. doi:10.1016/j.geomorph.2011.01.023.
2. Gens R. Remote sensing of coastlines: detection, extraction and monitoring // *International Journal of Remote Sensing*. 2010. Vol. 31. P. 1819–1836. doi:10.1080/01431160902926673.
3. Alesheikh A.A., Ghorbanali A., Nouri N. Coastline change detection using remote sensing // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2007. Vol. 4. P. 61–66. doi:10.1007/BF03325962.
4. Parwata I.N.S., Shimizu N., Grujic B., Zekan S., Celikovic R., Imamovic E., Vrkljan I. Monitoring the subsidence induced by salt mining in Tuzla, Bosnia and Herzegovina, by SBAS-DInSAR method // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020. Vol. 53. P. 5155–5175. doi:10.1007/s00603-020-02212-1.
5. Spinosa A., Ziemba A., Saponieri A., Navarro-Sanchez d., Damiani L., Serafy G.E. Automatic extraction of Shoreline from Satellite Images: a new approach // *IEEE International Workshop on Metrology for the Sea “Learning to Measure Sea Health Parameters” (MetroSea)*. IEEE, 2018. P. 33–38.
6. Pujianiki N.N., Parwata I.N.S., Osawa T. A new simple procedure for extracting coastline from SAR image based on low pass filter and edge detection algorithm // *Lontar Komputer : Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi*. 2021. Vol. 12. № 3. P. 175–185. doi:10.24843/lkjiti.2021.v12.i03.p05.



Телеграм-канал журнала

Независимый электронный журнал
ГеоИнфо

- Новости
- Статьи
- Обсуждения

<https://t.me/geoinfonews>