

ГЕОМОРФОМЕТРИЧЕСКАЯ ТИПОЛОГИЯ МАЛЫХ ВОДОСБОРОВ ОСТРОВА РУССКИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРИБРЕЖНЫХ РИСКОВ

Катрасов С.В., Жариков В.В.,

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

E-mail: katrasov_sv@tigdvo.ru

Аннотация. Освоение прибрежных территорий о. Русский (залив Петра Великого, Японское море) требует оценки гидрологических рисков в условиях дефицита данных мониторинга. В работе представлен метод пространственной экстраполяции качественных оценок рисков, основанный на геоморфометрической типологии малых водосборов. На основе цифровой модели рельефа (30 м) выполнена автоматическая классификация элементарных форм рельефа (геоморфонов) по алгоритму r.geomorphon для восьми ключевых водосборов. Рассчитаны композитные индексы: гидрологической реактивности (HRI), локализации устьевого входа (ОЕИ) и буферной емкости акватории (BCA). Статистическая кластеризация методом Уорда позволила выделить три типа водосборов (С1–С3), различающихся по профилю потенциальных рисков: от экстремального пикового стока (С3) до сбалансированных условий (С1). Диагностическая способность типологии подтверждена данными дистанционного зондирования (Landsat 8), зафиксировавшими реализацию эрозионного потенциала на антропогенно нарушенных водосборах. Предложена матрица комплексного зонирования для обоснования размещения объектов марикультуры.

Ключевые слова: геоморфоны, малые водосборы, гидрологический риск, остров Русский, дистанционное зондирование, территориальное планирование, марикультура.

GEOMORPHOMETRIC TYPOLOGY OF SMALL CATCHMENTS ON RUSSKY ISLAND FOR COASTAL RISK ASSESSMENT

Katrasov S.V., Zharikov V.V.

Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

e-mail: katrasov_sv@tigdvo.ru

Abstract -The development of coastal areas on Russky Island (Peter the Great Gulf, Sea of Japan) requires assessment of hydrological risks under conditions of limited monitoring data. This paper presents a method for spatial extrapolation of qualitative risk assessments based on geomorphometric typology of small catchments. Using a 30 m digital elevation model, automatic classification of elementary landform types (geomorphons) was performed with the r.geomorphon algorithm for eight key catchments. Composite indices were calculated: Hydrological Reactivity Index (HRI), Outlet Entrance Localization Index (OEI), and Buffer Capacity of the Water Area Index (BCA). Ward's hierarchical clustering method identified three catchment types (C1–C3) differing in their potential risk profiles, ranging from extreme peak runoff (C3) to balanced conditions (C1). The diagnostic capability of the typology was validated by remote sensing data (Landsat 8), which recorded the realization of erosion potential in anthropogenically disturbed catchments. A comprehensive zoning matrix is proposed to support decision-making for aquaculture facility siting.

Keywords: geomorphons, small catchments, hydrological risk, Russky Island, remote sensing, territorial planning, aquaculture

Введение. Активное освоение прибрежных зон о. Русский, включая создание рекреационных кластеров и объектов марикультуры, сопряжено с необходимостью оценки

природных рисков [1, 2]. Ключевым источником угроз для экологического состояния бухт выступают процессы на водосборах малых рек и временных водотоков: пиковый сток, эрозия, поступление биогенов [3]. Особую сложность представляет оценка этих рисков для территорий с интенсивным, но локальным освоением, где разветвленная сеть малых водосборов сочетается с практическим отсутствием гидрологического мониторинга [4].

Традиционные подходы, основанные на детальном гидрологическом моделировании (SWAT, HEC-HMS), требуют обширных входных данных и калибровки [5]. Перспективной альтернативой выступают методы, опирающиеся на анализ цифровых моделей рельефа (ЦМР). Классический морфометрический анализ водосборов [6, 7] часто описывает водосбор как единое целое, нивелируя внутреннюю структурную неоднородность. Новый подход — анализ геоморфонов — элементарных форм рельефа (гребни, склоны, впадины), автоматически выделяемых из ЦМР по алгоритму *r.geomorphon* [8, 9]. Данный метод успешно применяется в ландшафтоведении [10], однако его потенциал для прогнозной оценки гидрологических характеристик малых водосборов остается малоизученным [11].

Цель исследования — разработка и апробация метода геоморфометрической типологии малых водосборов для качественной оценки гидрологического поведения и связанных прибрежных рисков в условиях дефицита данных наблюдений.

Материалы и методы. Район исследования. Остров Русский расположен в заливе Петра Великого Японского моря. Характеризуется низкогорным грядово-сопочным рельефом (максимальная высота г. Русская 291 м), основную роль в геологическом строении острова играют верхнепермские и нижнетриасовые образования, прорванные позднепермскими гранитоидами [12]. Климат муссонный с выраженным летним максимумом осадков, что формирует высокий потенциал развития эрозионных процессов и пикового стока [13].

Исходные данные и выделение водосборов. Границы восьми ключевых водосборов, впадающих в бухты о. Русский (Парис, Аякс, Воевода, Новик, Рында, Бабкина, Боярин, Новый Джигит), дешифрованы по бессточным ячейкам на основе ЦМР ALOS World 3D с разрешением 30 м в среде SAGA GIS. Данная ЦМР демонстрирует достаточную точность для морфометрического анализа в условиях низкогорья [14].

Геоморфометрический анализ. Для каждого водосбора с помощью модуля *r.geomorphon* [9, 10] в GRASS GIS получены растровые карты 10 классов элементарных форм рельефа. Параметры алгоритма: радиус поиска (L) = 100 м, порог для плоских участков ($\text{flatness threshold}$) = 1° . Выбранный радиус позволяет адекватно отражать мезоформы рельефа, характерные для водосборов данного масштаба [15].

На основе карт геоморфонов рассчитаны три композитных индекса:

- **Индекс Гидрологической Реактивности (HRI)** — отношение площади геоморфонов быстрого стока (гребни, вершины, уступы, склоны) к площади геоморфонов аккумуляции (лотки, долины, подножья, депрессии, плоские поверхности). $HRI > 1$ указывает на преобладание быстрого стока и высокий риск пиковых паводков.

- **Индекс Локализации Устьевого Входа (OEI)** — отношение площади конвективных форм (лотки, долины) к площади аккумулятивных форм (плоские поверхности, подножья, депрессии). Высокий OEI свидетельствует о точечном поступлении наносов в акваторию.

- **Индекс Буферной Емкости Акватории (BCA)** — отношение площади аккумулятивных форм дна к площади форм, способствующих усиленной гидродинамике.

Статистический анализ. Рассчитанные индексы стандартизированы (z -score). Кластеризация выполнена агломеративным иерархическим методом с метрикой евклидова расстояния и связью по Уорду [17]. Оптимальное число кластеров определялось по дендрограмме и методу «локтя».

Результаты. Геоморфометрическое разнообразие водосборов. Расчет интегральных индексов выявил значительную вариабельность характеристик (табл. 1). Значения HRI

варьируют от 2.14 (бух. Бабкина) до 3.37 (бух. Парис). Экстремальные значения OEI (>40) для водосборов бухт Аякс и Новик указывают на их высокую вытянутость и потенциал концентрированного поступления наносов.

Таблица 1.

Геоморфометрические характеристики водосборов о. Русский

Водосбор	Площадь, км ²	HRI	OEI	BCA
Парис	3.15	3.37	4.39	1.05
Аякс	3.71	2.77	45.83	0.62
Новик	32.05	2.63	47.75	1.08
Воевода	23.43	2.82	32.89	0.98
Рында	6.37	2.58	37.24	0.91
Бабкина	3.63	2.14	22.13	0.68
Боярин	1.75	2.88	8.66	0.59
Новый Джигит	8.57	2.53	7.49	0.86

Классификация водосборов. Метод иерархической кластеризации позволил выделить три типа, один из которых (бухта Парис) резко отличается по своим характеристикам (рис. 1):

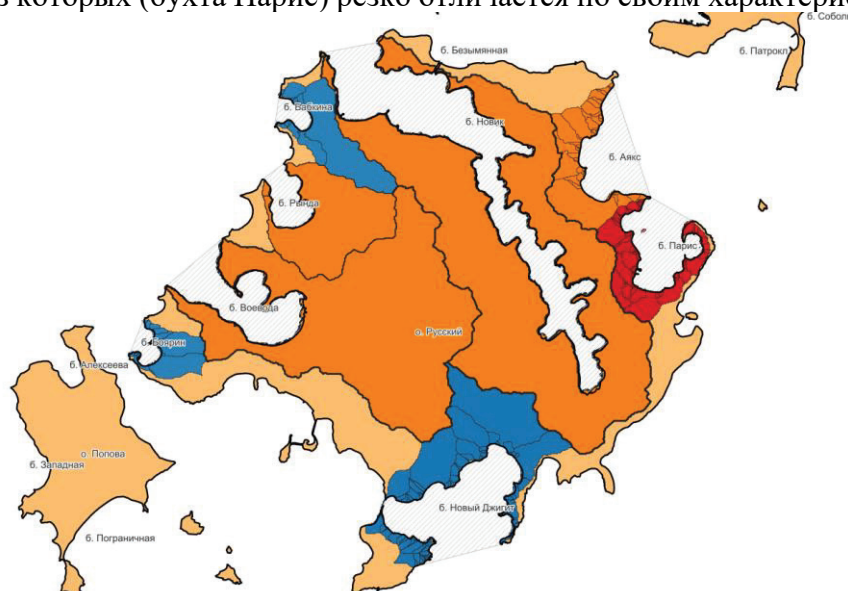


Рис. 1. Пространственное распределение выделенных типов водосборов острова Русский.

Тип С1 (синий) — водосборы с сбалансированными характеристиками, приуроченные к западной и южной части острова. Тип С2 (оранжевый) — вытянутые водосборы с высоким эрозионным потенциалом, расположенные преимущественно в центральной части. Тип С3 (красный) — компактный водосбор бухты Парис с максимальным риском пиковых паводков, расположенный в восточной части острова.

Обсуждение. Гидрологическая интерпретация. Выделенные типы соответствуют качественно различным моделям гидрологического функционирования. Тип С3 предопределяет максимальный риск формирования «взрывного» пикового стока (flash floods) в ответ на ливневые осадки [18]. Тип С2 создает риск продолжительного поступления взвешенных наносов через развитую сеть долин, что может привести к хроническому заилению акваторий [19]. Тип С1 характеризуется наименьшим риском экстремальных событий [20].

Верификация по данным ДЗЗ. На водосборе бухты Парис (тип С3) по временным сериям снимков Landsat 8 (2012–2025 гг.) зафиксировано формирование линейных эрозионных форм и появление устойчивых шлейфов повышенной мутности после дождевых событий в период антропогенного нарушения (строительство дороги). Это прямое свидетельство реализации прогнозируемого эрозионного потенциала.

Практическое применение. На основе пересечения двух ключевых осей — индекса гидрологической реактивности водосбора (HRI) и индекса буферной емкости акватории (BCA) — предложена матрица комплексного зонирования бухт для размещения объектов марикультуры (табл. 2).

Таблица 2.

Матрица зонирования для целей марикультуры

Водосбор / Акватория	Акватория: ВСА НИЗКИЙ (хорошая самоочищаемость)	Акватория: ВСА ВЫСОКИЙ (плохая самоочищаемость)
Водосбор: HRI НИЗКИЙ (сбалансированный)	КВАДРАНТ 1: ПРИОРИТЕТНЫЙ. Оптимален для всех типов марикультуры.	КВАДРАНТ 2: УСЛОВНО ПРИГОДНЫЙ. Допустимы только придонные виды. (б. Боярин, б. Бабкина, б. Новый Джигит)
Водосбор: HRI ВЫСОКИЙ (реактивный)	КВАДРАНТ 3: УСЛОВНО ПРИГОДНЫЙ (с жесткими правилами). Требуется мониторинг. (б. Воевода, б. Новик, б. Аякс, б. Рында)	КВАДРАНТ 4: ЗАПРЕТНЫЙ. Исключение из хозяйственного планирования. (б. Парис)

Интеграция с гидродинамическим моделированием. Для бухты Воевода (тип С2) выполнено совместное моделирование стока (SWAT) и гидродинамики акватории (Delft3D) [21]. Моделирование подтвердило прогноз типологии: при экстремальных осадках зона влияния распресненных вод по р. Русская достигает центральной части бухты. Несмотря на периодическое распреснение, для культивирования приморского гребешка (*Mizuhopecten yessoensis*) пригодно до 68% акватории, однако эти зоны смещены в мористую часть.

Ограничения метода. Основным ограничением является качественный характер метода и неучет литолого-почвенных условий и растительного покрова, которые могут модулировать результирующий сток. Дальнейшее развитие подхода видится в калибровке с помощью данных ДЗЗ для перехода к количественным прогнозам.

Заключение

1. Впервые для малых водосборов о. Русский разработана методика геоморфометрической типологии, интегрирующая классификацию геоморфонов и расчет функциональных индексов HRI, OEI, VCA.

2. Выделены три типа водосборов (С1–С3), различающихся по профилю потенциальных гидрологических рисков: от экстремального пикового стока (С3) до сбалансированных условий (С1).

3. Пространственная мозаичность распределения типов подтверждает объективный характер типологии и обосновывает необходимость точечной оценки рисков.

4. Диагностическая способность методологии подтверждена данными ДЗЗ, показавшими реализацию прогнозируемого эрозионного потенциала при антропогенном нарушении.

5. Разработанная матрица комплексного зонирования представляет собой малозатратный инструмент для скринингового районирования прибрежных территорий в условиях дефицита гидрологических данных.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Тихоокеанского института географии ДВО РАН.

Литература

1. Айбулатов Н.А. Деятельность России в прибрежной зоне моря и проблемы экологии. — М.: Наука, 2005. — 363 с. — ISBN 5-02-032723-9

2. Бакланов П.Я., Арзамасцев И.С., Качур А.Н., Романов М.Т. Природопользование в прибрежной зоне (Проблемы управления на Дальнем Востоке России) / Тихоокеанский институт географии ДВО РАН. – Владивосток: Дальнаука, 2003. – 250 с.

3. Филатов Н.Н., Тержевик А.Ю. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 335 с.

4. Гидрометеорологические риски / Монография. Под ред. Л.Н.Карлина. Спб.: Изд-во РГГМУ, 2008. 282 с.

5. Arnold J.G. SWAT: Model use, calibration, and validation // Transactions of the ASABE. – 2012. – Vol. 55, No. 4. – P. 1491-1508.

6. Хортон Р.Е. Эрозионное развитие рек и водосборов. – М.: ИЛ, 1948. – 158 с.

7. Философов В.П. Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур. – Саратов: СГУ, 1960. – 94 с.

8. Jasiewicz J., Stepinski T.F. Geomorphons — a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms // Geomorphology. – 2013. – Vol. 182. – P. 147-156. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.11.005

9. Jasiewicz J., Stepinski T.F. GRASS GIS r.geomorphon module. – Open Source Geospatial Foundation, 2024. – URL: <https://grass.osgeo.org/grass-stable/manuals/r.geomorphon.html>

10. Bolongaro Crevenna Recaséns, A. Geomorphometric analysis for characterizing landforms in Morelos State, Mexico / A. Bolongaro Crevenna Recaséns, V. Torres, V. Sorani, D. Frame, M. Ortiz // Geomorphology. – 2005. – Vol. 67, No. 3-4. – P. 407-422. – DOI: 10.1016/j.geomorph.2004.11.007.

11. Geitner C. An objective landform description approach based on digital terrain analysis // EGU General Assembly. – 2015. – Vol. 17. – P. 3701.

12. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Ханкайская. Листы К-52-ХII, ХVIII (о. Русский) : объяснительная записка / Министерство природных ресурсов РФ, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ) ; составители: В.В. Голозубов, А.И. Малиновский, С.А. Щека и др. ; под ред. А.И. Ханчука. — Санкт-Петербург : Изд-во ВСЕГЕИ, 2005. — 203 с.
13. Климатическая геоморфология Дальнего Востока: сборник / Академия наук СССР, Дальневосточный научный центр, Тихоокеанский институт географии; под общей редакцией А. П. Капицы. — Владивосток: Изд-во Дальневосточного научного центра АН СССР, 1976. — 139 с.
14. *Tadono T.* Precise global DEM generation by ALOS PRISM // *ISPRS Annals.* – 2014. – Vol. 2. – P. 71-76.
15. *Jasiewicz, J. and Stepinski, T.F.* (2013) Geomorphons—A Pattern Recognition Approach to Classification and Mapping of Landforms. *Geomorphology*, 182, 147-156. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.005>
16. *Brown A.* rgeomorphon: A Lightweight Implementation of the Geomorphon Algorithm. – CRAN, 2025. – DOI: 10.32614/CRAN.package.rgeomorphon
17. *Ward J.H.* Hierarchical grouping to optimize an objective function // *Journal of the American Statistical Association.* – 1963. – Vol. 58. – P. 236-244.
18. *Borga M., E.N. Anagnostou, G. Blöschl, J.-D.* Creutin Flash flood forecasting, warning and risk management: the HYDRATE project // *Environmental Science & Policy.* – 2011. – Vol. 14. – P. 834-844. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.05.017>.
19. *Syvitski JP, Vörösmarty CJ, Kettner AJ, Green P.* Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science.* 2005 Apr 15;308(5720):376-80. doi: 10.1126/science.1109454. PMID: 15831750.
20. *Шуйский Ю.Д.* Проблемы исследования баланса наносов в береговой зоне морей. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 239 с.
21. *Катрасов С.В., Бугаец А.Н., Жариков В.В., Ганзей К. С., Гончуков Л. В., Соколов О. В., Лебедев А. М., Пшеничникова Н. Ф., Краснопеев С. М.* Определение районов размещения плантаций марикультуры на основе результатов гидродинамического моделирования // *Океанология.* – 2021. – Т. 61. – № 3. – С. 433–443.