

ДИНАМИКА БЕРЕГОВЫХ АККУМУЛЯТИВНЫХ ФОРМ И ОПЫТ УЛУЧШЕНИЯ СУДОХОДНЫХ УСЛОВИЙ В УСТЬЕ ПАЛАНЫ (СЕВЕРО-ЗАПАДНАЯ КАМЧАТКА)*

С.Л. Горин¹, Д.В. Корзинин², Д.И. Школьный³, П.М. Белова⁴

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, лаборатория воспроизводства лососевых рыб, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: gorinser@mail.ru

² Институт океанологии имени П.П. Шишова РАН, лаборатория шельфа и морских берегов имени В.П. Зенковича, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: korzinin2000@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, науч. сотр.; e-mail: danila.hydro@yandex.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, аспирант; e-mail: pbelova97@mail.ru

На северо-восточном берегу Охотского моря в устье р. Паланы находится одноименный поселок – важный для Камчатского края рыбопромышленный центр. Выход из реки в море преграждается косой, переформирования которой сильно осложняют судоходство. Статья посвящена решению этой проблемы. Работа основана на анализе архивных и литературных источников, космических снимков, материалов собственных полевых исследований, а также на результатах моделирования. Установлено, что в многолетней морфодинамике устья можно выделить три варианта развития событий: последовательное удлинение косы на ЮЮЗ со средней интенсивностью 100–150 м/год; нарастание косы в том же направлении на 400–600 м и более в год; относительная стабильность косы. Удлинение косы в ЮЮЗ направлении – это естественное явление. Наибольшая длина косы достигала 2,8 км. В редких случаях (несколько раз за столетие) возможен прорыв косы и спрямление устья по природным причинам (скорее всего, при значительном повышении водного стока реки в половодье и паводки). Кроме этого, устье р. Паланы неоднократно спрямлялось искусственно. После естественного или антропогенного прорыва косы цикл развития устья начинается заново. Источниками наносов для удлинения косы служат подводный береговой склон и активные уступы на абразионном участке берега к северу от устья реки (роль речных наносов мала). Для местного судоходства наибольшую опасность представляет приближение оконечности косы к скалам и камням, находящимся южнее устья реки. Эта проблема может быть решена только одним способом – контролем длины косы. Для этого разработаны рекомендации, учитывающие имеющиеся в поселке материально-технические ресурсы и практический опыт. Определены условия, при которых необходимы гидротехнические мероприятия, наиболее благоприятное время для их проведения и способ сооружения новой прорвы.

Ключевые слова: коса, бар, морские берега, морфодинамика, Охотское море

ВВЕДЕНИЕ

На северо-западе Камчатки недалеко от устья одноименной реки находится пос. Палана – важный для Камчатского края рыбопромышленный центр. Выход из реки в море преграждается барьерной формой, переформирования которой сильно осложняют движение судов и тем самым препятствуют прибрежному рыболовству и завозу грузов в поселок. В связи с этим были проведены исследования, цель которых состояла в выявлении главных закономерностей морфодинамики устья р. Паланы и разработке предложений по улучшению судоходных условий в этом объекте. Обсуждаемая проблема характерна для всех портовых пунктов Западной Камчатки, а также для некоторых других пунктов на российских берегах Берингова и Охотского морей, поэтому полученные результаты могут быть полезны во многих других случаях, подобных устью р. Паланы.

Физико-географические условия района исследований. Представляемая ниже характеристика дана в той минимальной степени, которая необходима для получения представления об основных факторах морфодинамики речного устья – рельефе, климате, гидрологическом режиме реки и прибрежной части моря.

Палана протекает на северо-западе п-ова Камчатка (рис. 1), в северной части Срединного хребта и впадает в залив Шелихова Охотского моря. В бассейне реки преобладает сглаженный среднегорный рельеф. Речная долина находится на высотах от 0 до 300–350 м, со всех сторон она окружена горными цепями с максимальными отметками водоразделов до 1 км и более в верхней части бассейна и до 300–700 м в его средней и нижней частях. На днище долины широко распространены низинные болота. Многолетняя мерзлота в этом районе встречается в виде отдельных пятен [Ресурсы..., 1973].

* Статья посвящается памяти жителей пос. Палана, погибших в авиакатастрофе 06.07.2021 г.

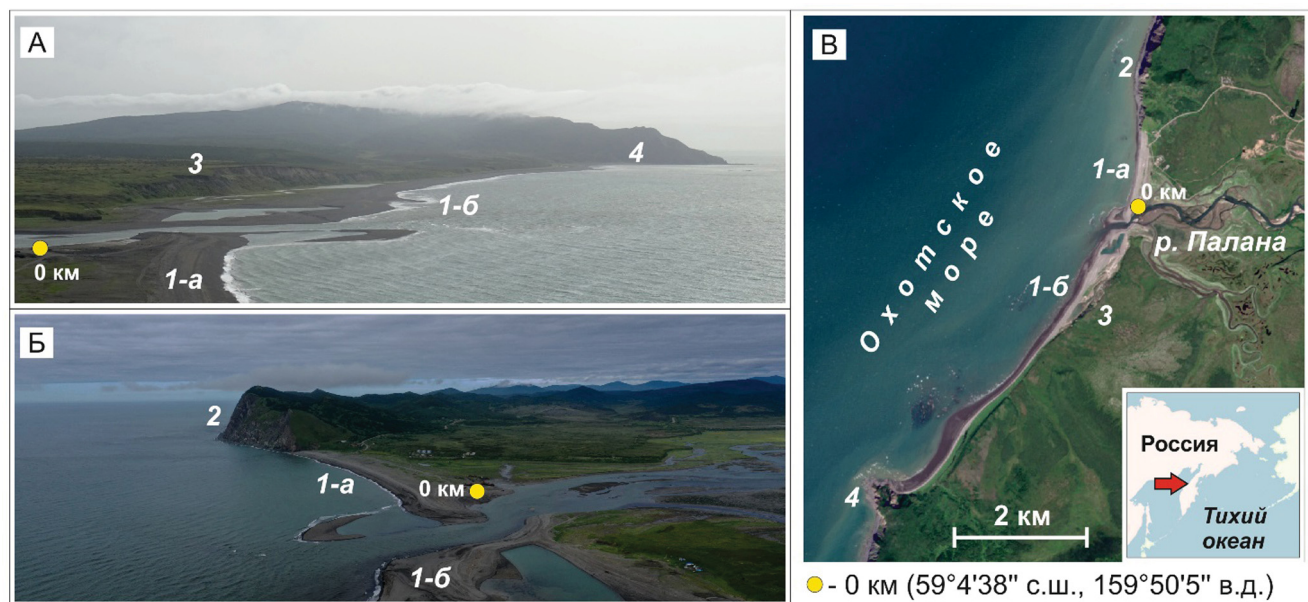


Рис. 1. Устье р. Паланы:

А – снимок с БПЛА с видом от устья реки на юг (25.07.2019); Б – снимок с БПЛА с видом от устья реки на север (27.07.2019); В – космический снимок Sentinel-2 (11.08.2019); 1а – северная часть берегового бара; 1б – южная часть берегового бара; 2 – северный гористый участок; 3 – уступ морской террасы; 4 – южный гористый участок (в массиве г. Пятибратки); 0 км – исходная точка для определения длины косы (портпункт «Палана»)

Fig. 1. The Palana River mouth:

А – aerial photo with a view to the south of the river mouth (25.07.2019); Б – aerial photo with a view to the north of the river mouth (27.07.2019); В – satellite image Sentinel-2 (11.08.2019); 1а – northern part of a barrier bar; 1б – southern part of a barrier bar; 2 – northern abrasion section; 3 – abrasion cliff in the sea terrace; 4 – south abrasion section (within the Mt Pyatibratka); 0 km – starting point for determining the spit length (“Palana” port station)

Со стороны моря долина реки блокируется песчано-галечным береговым баром длиной ~6,5 км (см. рис. 1). Устье р. Паланы разделяет его на две неравные части: северную, длиной ~1 км, и южную, длиной ~5 км. Южная часть бара прислонена к уступу высотой до 15–25 м, по предположению А.В. Мизерова [1937] выработанному в отложениях морской галечной террасы. К настоящему времени значительная часть этого уступа осыпалась и задернована. Береговой бар сформировался в вогнутости морского берега между двумя гористыми выступами, обрывающимися к морю крутыми уступами (см. рис. 1). Северный «гористый» участок берега имеет длину ~40 км и высоту уступов до 150–200 м и более. Он представляет собой сплошную цепь скал, сложенных массивно-кристаллическими коренными породами (редкие выходы гранитов, сиениты, во множестве конгломераты и покровы андезитовых лав палеогенового возраста) [Мизеров, 1937]. Наряду с этим здесь встречаются участки третичных морских террас [Мизеров, 1937], сложенных меловыми аргиллитами, алевролитами и песчаниками [Государственная..., 2013]. Еще севернее к берегу подходят равнинные участки, сложенные позднечетверичными ледниковыми глыбово-галечными валунными суглинками и супесями, которые об-

рываются к морю береговыми уступами [Государственная..., 2013]. Южный гористый участок берега выработан в обрывистых склонах г. Пятибратки. Его длина ~8 км, высота уступов до 100–200 м и более. Он сложен коренными породами [Мизеров, 1937], которые представлены аргиллитами, алевролитами, песчаниками, конгломератами и туфами палеогенового возраста [Государственная геологическая..., 2013]. От северной части бара в ЮЮЗ направлении (параллельно берегу) периодически нарастает коса. После ее прорыва по естественным или антропогенным причинам (см. ниже), отделившаяся от нее часть примыкает к южной части бара. При этом между отмершей косой и баром некоторое время сохраняются небольшие водоемы – остатки бывшей протоки. Именно такая ситуация наблюдалась летом 2019 г. (см. рис. 1). В море около устья р. Паланы подводный береговой склон имеет относительно отмелый профиль: при среднем уровне моря изобата 5 м проходит в 0,5–0,6 км от берега, а изобата 10 м – в ~1,2 км от него.

Климат в районе исследований морской умеренный, холодный с продолжительной малоснежной и холодной зимой, коротким и прохладным летом [Кондратюк, 1974]. Самая низкая температура воздуха отмечается в январе (–18,1°С в среднем за месяц).

Теплее всего в июле – в этот месяц воздух в среднем прогревается до 11,3°C. Климатическая зима продолжается с конца октября до начала мая (~6,5 мес.), а лето длится со второй половины июня до последней декады августа (~2 мес.). Годовая норма осадков составляет ~630 мм. По площади своего бассейна ($F_6 = 2500 \text{ км}^2$) и величине среднего годового расхода воды ($Q_r \sim 63 \text{ м}^3/\text{с}$) р. Палана относится к средним водотокам Западной Камчатки. Для нее характерны три фазы водного режима: зимняя межень (декабрь–апрель), весенне-летнее половодье (май–август) и осенний меженно-паводочный период (сентябрь–ноябрь). Максимальные годовые расходы воды в ~90% случаев проходят в половодье (преимущественно в июне), а в ~10% случаев – в период осенних паводков (в последних числах августа и в сентябре). Минимальный годовой сток наблюдается зимой. Средний расход воды в июне составляет ~160 м³/с, в октябре ~60 м³/с, а в марте ~14 м³/с (рассчитано авторами на основе наблюдений Гидрометслужбы на посту «пос. Палана» (10 км от устья) за 1961–1998 гг.).

Исследуемая часть побережья Камчатки омывается водами залива Шелихова. Около устья р. Паланы приливы достигают очень больших величин: от 3–4 м в квадратуры до 8–9 м и более в сизигии. Судя по космическим снимкам за последние 20 лет, первый лед (плавающий в море и припай у берега) около устья реки появляется в конце ноября. Максимальной ширины припай достигает в феврале – до 1,5–2,5 км. В течение зимы его может отрывать от берега и уносить в море. В конце марта прибрежная зона полностью очищается: сначала от плавающего льда, а затем от припая. Иногда бывает так, что узкая полоса припая здесь задерживается до начала мая. Штормовая активность в заливе Шелихова преимущественно связана с циклонами, которые особенно активизируются с сентября по декабрь. В это время здесь возможно сильное волнение, которое накладывается на значительные нагоны, а в ноябре–декабре – и на самые высокие в году приливы [Гидрометеорология..., 1998]. С января по июль поверхность моря относительно спокойна. Зимой этому способствует ледяной покров, а летом – ослабление циклонической деятельности. В связи с отсутствием наблюдений, фактические данные о характеристиках волнения и течений для исследуемого района отсутствуют.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Данная работа основана на анализе архивных и литературных источников, космических снимков, материалов полевых исследований, а также на результатах расчетов параметров литодинамического режима береговой зоны.

Архивные и литературные источники. История изучения Камчатки насчитывает более 300 лет. В XVIII–XIX вв. исследованиями здесь занимались немногочисленные естествоиспытатели и военные моряки. Их работы охватывали очень большие территории и при существовавших в то время транспортных средствах и научных инструментах позволяли им получать лишь общее представление о рельефе исследуемой территории, которое отражалось в виде схематичных карт и словесных описаний. Сведения об основных работах этого периода, касающихся западного побережья полуострова, приведены в табл. 1.

В XX в. берега Западной Камчатки неоднократно исследовались. Во-первых, для составления морских лоций и навигационных карт. В начале прошлого века с этой целью работала Гидрографическая экспедиция Восточного океана, по итогам которой вышла знаменитая «лоция Давыдова» [Давыдов, 1923]. В ней, помимо прочего, содержится подробное описание устьев средних и больших рек Камчатки. Последующие лоции – а они переиздавались примерно один раз в десять лет – в целом повторяли первоисточник (с некоторыми дополнениями и исправлениями, но с меньшей степенью подробности). Во-вторых, были проведены работы по составлению и последующей редактуре топографических карт масштабом от 1 : 200 000 и крупнее. В-третьих, состоялась серия географических исследований для нужд рыбной промышленности. В первой половине XX в. они были направлены на научное обоснование индустриализации Камчатки (на основе создания сети прибрежных рыбокомбинатов). Во второй половине XX в. – на защиту от морских волн созданной к тому времени прибрежной инфраструктуры. Результаты этих работ, находясь в основном в архивах, и лишь незначительная их часть была опубликована.

Все исторические свидетельства, использованные в данной работе, были проверены на их достоверность в отношении устья р. Паланы. Это было сделано на основе сопоставления их данных между собой, а также с помощью проверки их соответствия основным закономерностям морфологических процессов, ранее выявленным для других устьев Камчатки [Горин, 2020].

Космические снимки. Подборка космических снимков по устью р. Паланы охватывает период с 1970 по 2019 г. и насчитывает 83 документа с достаточно хорошим изображением исследуемого объекта (табл. 2). Снимки за последние годы отличаются высокой детальностью изображения рельефа, а также малыми интервалами времени между отдельными съемками. В целом, космической съемкой освещены все месяцы года, но особенно хорошо период с мая по август. Анализ снимков выполнен с использованием программы ArcGIS.

Таблица 1

Главные свидетельства о западном побережье Камчатки, относящиеся к XVIII–XIX вв.

Исследователь, ссылка на источник	Годы работы на Камчатке	Характер исследований
С.П. Крашенинников [1949], Г. Стеллер [1999]	1737–1741 1740–1744	Сотрудники Академического отряда Второй Камчатской экспедиции В. Беринга; занимались комплексными исследованиями всего полуострова
Ушаков [Западный берег..., 1852]	1742	Сотрудник Второй Камчатской экспедиции В. Беринга; произвел геодезическую опись Западной Камчатки от р. Большой до р. Паланы
Ж-Б. Лессепс [1801–1802]	1787–1788	Участник морской экспедиции Лаперуза; по пути на родину проехал через всю Камчатку и составил подробное описание своего пути
К. Дитмар [1901]	1851–1855	Чиновник по особым поручениям при губернаторе Камчатки; занимался геологическим и географическим изучением края
А.С. Сгибнев [1869]	–	Военно-морской историк; составил историческое описание Камчатки за 1650–1856 гг. Значительная часть использованных им документов ныне утрачена
В.Н. Тюшов [1906]	1894–1912	Уездный врач с естественно-научным образованием; по собственной инициативе занимался исследованием Западной Камчатки
Н.В. Слюнин [1900]	1897–1898	Врач и натуралист Охотско-Камчатской горной экспедиции К.И. Богдановича; составил историко-географическое описание края
С. Де-Ливрон [1907]	–	Военный гидрограф; составил первую лоцию Охотского моря, в которой систематизировал все данные, накопленные до начала XX в.

Таблица 2

Космические снимки, использованные для анализа морфодинамики рельефа в устье р. Паланы

Год, месяц съемки	Общее кол-во снимков	Спутниковые системы
1970, июнь	1	Keyhole
1975, октябрь	1	Landsat 1
1999, август; 2000, июнь; 2001, июль; 2002, август; 2003, август; 2004, август; 2005, май; 2007, сентябрь; 2008, октябрь	9	Landsat-5, 7, 8, 9; Worldview-1
2009, апрель, июнь	2	Landsat-5; Quickbird
2010, июнь–август	3	Landsat-5; GeoEye-1
2011, май, июнь, ноябрь	3	Worldview-1, 2
2012, февраль, июнь	2	Worldview-1, 2
2013, февраль, март, май, июнь, август–октябрь	10	Landsat-8; Worldview-1, 2
2014, март, май, июнь, август, октябрь	5	Landsat-8; Worldview-2
2015, май, июнь, август, ноябрь	4	Landsat-8; Worldview-1; Sentinel-2
2016, февраль, апрель–июль	7	Worldview-1, 2; Sentinel-2
2017, январь, апрель–ноябрь	14	Worldview-1; Sentinel-2; GeoEye-1
2018, апрель–сентябрь, ноябрь	13	Worldview-1, 2; Sentinel-2
2019, апрель–октябрь	9	Sentinel-2; Dove; RapidEye t

Полевые исследования. Экспедиция в устье Паланы состоялась с 23 июля по 1 августа 2019 г. Она включала в себя различные виды работ, из которых для настоящей статьи важны следующие:

1) маршрутное обследование устья реки с примыкающими к нему участками морского берега (с

фотосъемкой при помощи беспилотного летательного аппарата DJI Mavic 2 Pro);

2) промеры глубин в море эхолотом Lowrance Elite HDS-7. Всего семь профилей: три из них от берега до изобат 12–14 м и четыре - до изобат 4–6 м. Измеренные глубины были приведены к условной системе отсчета;

3) опросы местных жителей, направленные на определение характера, интенсивности, причин и возможных последствий перемещения устья реки, а также степени антропогенного влияния на этот процесс. Выяснялось наличие фото- и видеоматериалов, а также каких-либо других документов, в которых отражались бы обсуждаемые явления. Всего было опрошено девять местных жителей, а также несколько сотрудников поселковой администрации.

Расчеты параметров литодинамического режима. В работе были рассчитаны величины емкости вдольберегового переноса наносов по данным о повторяемости высот волн за многолетний период. Для этого была применена модель LONT-2D, разработанная И.О. Леонтьевым [Леонтьев, 2014].

Она основывается на связи интегрального вдольберегового расхода наносов (Q_y) с продольной составляющей потока энергии (F_y), которая генерируется подходящими к берегу волнами:

$$Q_y = \mu K F_{yB}, \quad (1)$$

где K – безразмерный фактор пропорциональности; μ – коэффициент, согласующий размерности Q_y и F_y :

$$\mu = [g(\rho_g - \rho)(1 - \sigma)]^{-1}, \quad (2)$$

где ρ_g и ρ – плотность песка ($2,65 \cdot 10^3$ кг/м³) и воды соответственно; σ – пористость песка (0,4).

$$K = 0,04 \left(0,8 + 0,02 \frac{\sqrt{gh_B}}{w_s} \right), \quad (3)$$

где h_B – глубина обрушения волн (м); w_s – гидравлическая крупность осадков (м/с).

Продольная составляющая потока энергии (F_y) определяется соотношением:

$$F_y = \left(\frac{1}{8} \rho g H_{rmsB}^2 \right) \sqrt{gh_B} \sin(\theta_B + \delta) \cos(\theta_B + \delta), \quad (4)$$

где H_{rmsB} – высота среднеквадратичных волн (м) на глубине обрушения; θ_B – угол подхода волн к берегу на глубине обрушения; δ – дополнительный угол, характеризующий локальные отклонения контура берега от оси OY и определяемый соотношением $\tan \delta = dx_0/dy$, где $x_0(y)$ положение береговой линии (для прямолинейного берега $\delta = 0$).

Модель LONT-2D решает «плановую» задачу, где расчет ведется по сетке глубин для исследуемой акватории. В данном случае расчетный участок имел протяженность 40 км (вдоль берега) и ограничивался со стороны моря глубинами 60–70 м. Значения Q_y рассчитывались для каждой волновой ситуации по каждому волноопасному направлению, и полученные значения суммировались за расчетный период – в данном случае за каждый расчетный ме-

сяц безледного периода. Результатом было значение расхода наносов (Q_y , м³/мес.) на каждый погонный метр береговой линии расчетного участка. Следует отметить, что значение Q_y отражает расход наносов в расчетном створе при условии насыщения потока наносами. При дефиците наносов и высоких значениях Q_y волновая энергия может расходоваться не на перенос осадков, а на размыв аккумулятивных форм. Таким образом, значение Q_y , по сути, отражает емкость вдольберегового потока наносов при данных условиях.

Исходные данные для расчетов взяты из таблиц повторяемости высот волн 3% обеспеченности по направлениям, представленным в Российском морском регистре судоходства [Справочные данные..., 2003]. Характеристики волн в этом справочнике рассчитаны с помощью модели Wave Watch (версия 2.22) по полям атмосферного давления (реанализ NCEP/NCAR) для 30-летнего периода. Они обобщены по пяти районам Охотского моря (в данном случае использованы сведения о северо-восточной его части) для каждого месяца безледного периода – с мая по декабрь включительно. Сетка глубин в береговой зоне была составлена по данным собственных промеров, а также по актуальным навигационным картам М 1:100 000, изданным Управлением навигации и океанографии Минобороны России.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Морфодинамика устья р. Паланы. Фактические сведения. Устье р. Паланы оказалось на периферии исследований, которые проводились на Камчатке в XVIII–XX вв., и поэтому информации о нем в существующих архивных и литературных источниках немного. Первое достоверное сообщение об этом объекте относится к началу 1850-х гг. и принадлежит К. Дитмару [1901, с. 498]: «Столь обычное в Камчатке, в особенности на западном ее берегу, явление перемещения речных устьев можно было наблюдать и здесь... Длинные «кошки»¹ лежали и здесь перед устьями рек... Здешные обыватели уверяли, что... прорезывающие «кошку» протоки в настоящее время медленно, но постоянно, все более подвигаются на юг... Прежде, будто бы, было... наоборот, и перемещение устьев совершалось к северу». В 1914 г. в районе устья Паланы работала Гидрографическая экспедиция Восточного океана. В изданной по ее итогам Лоции [Давыдов, 1923, с. 949] об устье реки сообщается, что оно «...перед самым впадением в море загибается до ЮЮЗ, отделяясь от моря очень узкой низмен-

¹ Так местные жители называли косы в устьях рек.

ной песчано-галечной косой». На навигационных картах, прилагавшихся к этой Лоции, устье Паланы было показано схематично и для настоящей работы неинформативно. В середине XX в. на Камчатке была проведена топографическая съемка М 1 : 100 000. Благодаря этому появилось первое

картографическое изображение устья р. Паланы, на котором этот объект был показан с достаточной для оценки его морфометрических характеристик подробностью (рис. 2). В 1950 г. длина устьевой косы, выросшей от северной части берегового бара, составляла 2,3 км.

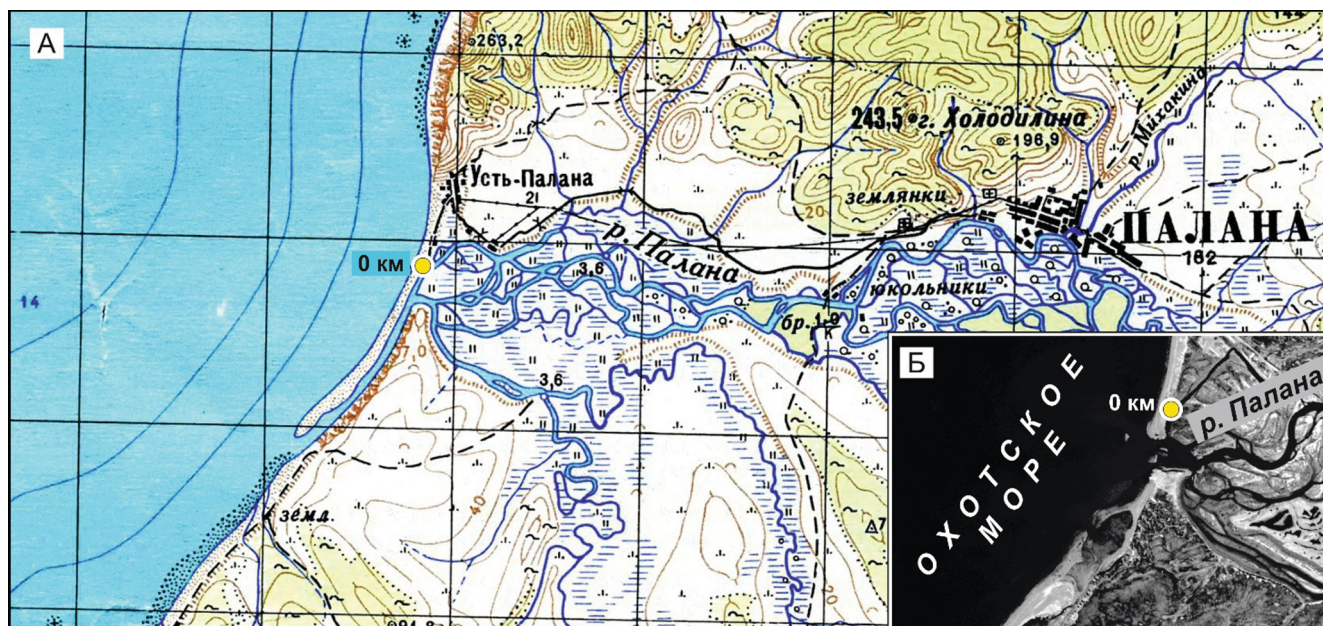


Рис. 2. Устье р. Паланы во второй половине XX в.:

А – в 1950 г. (топокарта 1952 г.); Б – в июне 1970 г. (космоснимок Keyhole-1); 0 км – исходная точка для определения длины косы (портпункт «Палана», см. рис. 1)

Fig. 2. The Palana River mouth in the second half of the 20th century:

А – in 1950 (topographic map O-57-44,43 M 1 : 100 000, issue of 1952); Б – in June 1970 (satellite image Keyhole-1); 0 km – starting point for determining the spit length ("Palana" port station, see fig. 1)

К 1970 и 1975 гг. относятся первые доступные нам космические снимки, на которых хорошо видно устье р. Паланы (см. табл. 2). В это время выход в море был спрямлен (см. рис. 2), а устьевая коса отсутствовала. Остатки ранее существовавшей косы примкнули к южной части берегового бара, а из отмершего русла протоки, ранее соединявшей реку с морем, сформировалась цепь небольших водоемов (см. рис. 2). К сожалению, нам не удалось найти документальных сведений о том, почему в период между 1950 и 1970 гг. рельеф в устье реки столь радикально изменился. Один из местных жителей, опрошенных нами, заявил, что в советское время «устье взрывали» для улучшения судоходства. Другой респондент сообщил о том, что «раньше портпункт чистил устье». Полноту и точность этих сообщений оценить невозможно. Но они свидетельствуют о самой возможности проведения активных мероприятий по спрямлению устья в советское время. Это предположение тем более вероятно, что, начиная со второй половины 1940-х гг., во многих устьях Западной Камчатки стали прокапывать ис-

кусственные прорывы для улучшения судоходных условий. Например, это делалось в устьях рек Ича и Крутогорова [Горин, Коваль, 2019; Горин, 2020].

Сведений о состоянии устья р. Паланы в 1976–1998 гг. нам найти не удалось. В 1999–2008 гг. оконечность косы находилась примерно там же, где и в 1970–1975 гг., при этом ее положение было довольно стабильным (рис. 3). Но из-за малого количества космоснимков (по одному за каждый год) и отсутствия других достоверных сведений нельзя определенно сказать, что было причиной такого состояния устьевых рельефов – природные условия или регулярные гидротехнические мероприятия.

Начиная с 2009 г. история развития устья р. Паланы подробно освещена космической съемкой (см. табл. 2) и сведениями, полученными в результате опросов местных жителей. С июня 2009 по июнь 2011 г. положение оконечности косы было относительно стабильным (см. рис. 3). С лета 2011 до лета 2014 г. она последовательно смещалась на ЮЮЗ со средней интенсивностью 140–150 м/год (всего ~0,5 км за три года). А к лету

2015 г. устьевая коса за один год удлинилась сразу на 500 м. Еще через год, к лету 2016 г., ее длина сократилась на ~350 м. Скорее всего, это произошло по естественным причинам. К весне 2017 г. коса снова удлинилась – теперь на 660 м. В мае 2017 г. в основании косы была прокопана новая прорва. Но через год – к маю 2018 г. – длина косы опять увеличилась (на 420 м). Очередной прокоп состоялся в мае 2018 г. Он дал старт новому циклу развития косы и через год она удлинилась на ~100 м. В мае 2019 г. существовавшая прорва была расширена.

В 2009–2019 гг. после прокопки нового устья (или его прорыва по естественным причинам), от-

члененная часть косы развивалась как приустьевой бар: под действием морских волн она уже через один месяц примыкала к берегу южнее нового устья. При этом за ее береговым склоном сохранялись остатки бывшего русла реки в виде небольших водоемов (см. рис. 1–3).

О предельной величине удлинения устьевой косы. По имеющимся литературным и архивным сведениям, наибольшая длина косы была зафиксирована в 1950 г. (см. рис. 2) и составляла 2,3 км от основания косы. Судя по рельефу морского берега на космоснимке 1970 г. (см. рис. 2), до своего прорыва между 1950 и 1970 гг. коса могла удлиниться до 2,8 км.



Рис. 3. Положение оконечности косы в устье р. Паланы в разные годы.

Основа схемы – космоснимок Sentinel-2, 11.08.2019. Звездочками выделены метки, соответствующие положению оконечности косы до (*) и после (**) спрямления устья в данном году; 0 км – исходная точка для определения длины косы (портпункт «Палана», см. рис. 1)

Fig. 3. Location of the spit front in the Palana River mouth in different years.

The scheme is based on the satellite image Sentinel-2, 11.08.2019. Asterisks mark the location of the spit front before (*) and after (**) the mouth straightening in a given year; 0 km – starting point for determining the spit length ("Palana" port station, see fig.1)

Межгодовые отличия в формировании устьевой косы. За 2009–2019 гг. в годовой динамике устье-

вой косы можно выделить три варианта развития событий: 1) последовательное удлинение на 100–

150 м/год; 2) резкое удлинение на 400–600 м и более в год; 3) относительная стабильность. Первый вариант можно детально проследить по космоснимкам 2018–2019 гг. (см. табл. 2). Их изучение показало, что летом и осенью устьевая коса была относительно стабильна, а с начала декабря до конца апреля она удлинилась приблизительно на 100 м. О втором варианте можно судить на примере 2017–2018 гг. (рис. 4). Летом и в первую половину осени форма косы практически не изменилась. К концу ноября мористее оконечности косы на поверхность моря вышел приустьевой бар. Зимой он удлинился и приблизился к оконечности косы, а к началу весны примкнул к ней. В 2014/2015 и 2016/2017 гг. устьевая коса удлинилась по похожему сценарию, но в этих случаях приустьевой бар примкнул к ней еще осенью или в начале зимы. По поводу третьего варианта следует сказать только то, что «стабильность» косы означает лишь отсутствие направленного

сдвига ее оконечности в какую-либо сторону. При этом устьевой рельеф все-таки изменяется, хотя и незначительно. В 2009–2019 гг. все три варианта морфодинамики встречались примерно в равном количестве лет.

Отметим важное следствие участия приустьевых баров в формировании рельефа устьевой области р. Паланы. Они образуются, а потом трансформируются и перемещаются под воздействием морских волн (особенно штормовых). Благодаря этому, приустьевые бары имеют разнообразную и очень изменчивую форму и размеры, а также разные траектории своего движения к берегу. В свою очередь устьевая коса, к которой присоединился очередной приустьевой бар, приобретает довольно сложную конфигурацию, сильно отличающуюся от ее исходного состояния. Таким образом, морфологическое разнообразие приустьевых баров порождает еще большее разнообразие устьевых кос.

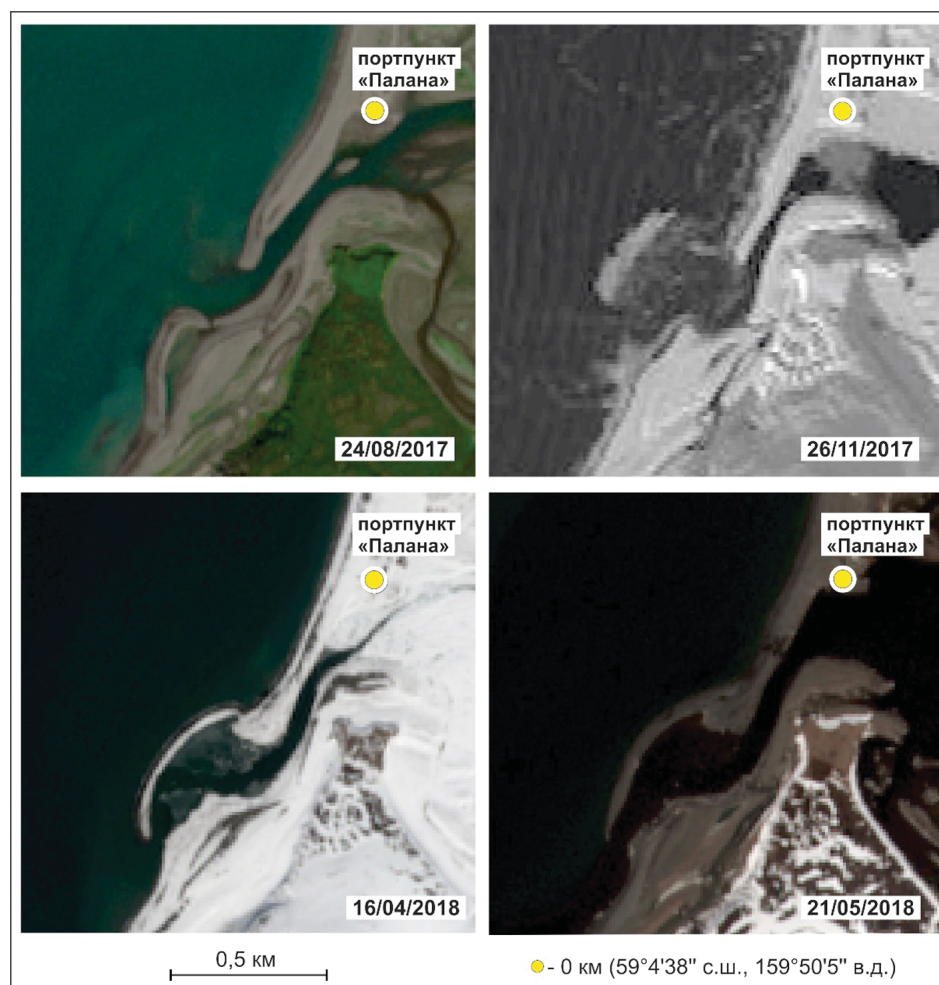


Рис. 4. Устье р. Паланы в осенне-зимний сезон 2017/18 гг. (фрагменты космических снимков Worldview-1, Sentinel-2)

Fig. 4. The Palana River mouth in 2017–2018 autumn–winter season (fragments of Worldview-1 and Sentinel-2 satellite images)

О прорыве устьевой косы по естественным причинам. Возможность подобных событий в устье р. Паланы подтверждается следующими фактами: 1) сообщениями местных жителей о перемещении устья реки на север, полученными К. Дитмаром в середине XIX в. (см. выше); 2) вероятным прорывом косы осенью 2015 г. (см. выше); 3) наличием подобных событий в устьях других рек Западной Камчатки [Горин, 2020]. Судя по имеющимся данным, прорывы в устье р. Паланы бывают редко – за 20 последних лет это случилось один-два раза. Скорее всего, эти события связаны с резким увеличением водного стока реки в периоды весеннего половодья или значительных осенних паводков. Вероятно, что для совершения прорыва высокая водность реки должна совпасть еще с каким-то фактором, например с сужением устья после сильных штормов.

О литодинамике береговой зоны по результатам моделирования. Для получения представления об условиях переноса наносов в прибрежной зоне моря были проведены расчеты по модели LONT-2D [Леонтьев, 2014]. В результате расчетов установлено следующее. В связи с тем что с мая по октябрь включительно преобладают волны с юго-запада, в море суммарный по всем румбам вдольбереговой поток наносов в створе около устья р. Паланы направлен на северо-восток, т. е. от оконечности косы

к ее основанию (рис. 5). Максимум расхода наносов приходится на июнь–август, а минимум – на октябрь. В ноябре и декабре резко возрастает роль волн с севера, поэтому направление суммарного потока наносов меняется на противоположное – от основания косы к ее оконечности. При этом заметно увеличение расхода этого потока от ноября к декабрю. В целом, расход потока в месяцы с мая по октябрь значительно больше, чем в ноябре и декабре.

Выше на основе анализа космических снимков было показано, что коса удлиняется в основном в ноябре–декабре. А в мае–октябре ее длина изменяется слабо. Следовательно, несмотря на относительно малую величину рассчитанного суммарного расхода вдольберегового потока наносов в ноябре–декабре (рис. 5), в это время он насыщен наносами, и около устья р. Паланы создаются условия для их аккумуляции. А в мае–октябре вдольбереговой поток имеет большую емкость, но при этом он недостаточно насыщен наносами. В этот период около устья реки создается обстановка, способствующая либо стабильности, либо даже размыву берегов. Возможно, что сезонная смена обстановок аккумуляции и размыва в береговой зоне моря около устья р. Паланы способствует относительной стабильности этого участка берега (прежде всего, берегового бара) в поперечном направлении.

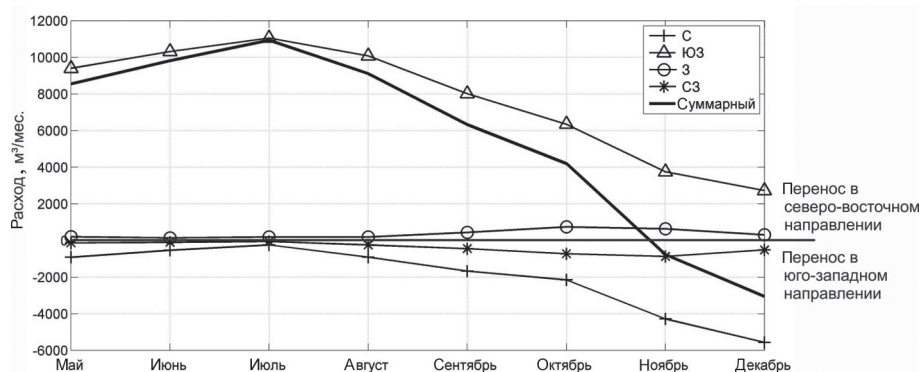


Рис. 5. Расход вдольберегового потока наносов в прибрежной зоне Охотского моря на траверсе устья р. Паланы (по месяцам в безледный период; отдельно для каждого румба волнения и суммарно по всем румбам)

Fig. 5. Discharge of longshore sediment flow in the coastal zone of the Sea of Okhotsk in the traverse of the Palana River mouth (by months during the ice-free period; separately for each direction of wave action and for all directions in total)

Из проведенных расчетов можно сделать и еще один важный вывод. Первая половина лета – наиболее благоприятное время для прорыва косы со стороны реки по естественным причинам. В это время проходит пик половодья, поэтому образовавшаяся прорва быстро промывается. При этом избыток наносов на устьевом взморье поглощается вдольбереговым потоком. Если же косу прорывает осенью или зимой, тогда новая прорва может быстро заноситься со стороны моря.

Об источниках наносов. Факт многолетнего устойчивого существования различных аккумулятивных форм в устье Паланы (берегового бара с широкими пляжами, косы и приустьевых баров) свидетельствует об отсутствии дефицита наносов в береговой зоне. Источниками наносов для удлинения косы, по-видимому, служат подводный береговой склон, абразионные уступы севернее устья реки (прежде всего, валунные суглинки и супеси позднечетвертичного возраста), а также сток из бассейна

реки. Кроме этого, в устьевой морфодинамике участвуют наносы, высвобождаемые при регулярных переформированиях берегового бара и косы. Возможно, в некоторые периоды наносы в береговую зону поступают из уступа террасы, к которой приклонен южный участок берегового бара. Но в настоящее время этот уступ неактивен.

Из-за отсутствия необходимых данных мы не можем дать количественную оценку вклада морских источников в баланс наносов около устья реки. Но можно оценить роль речного стока. В 70 км к ЮЗ от Паланы протекает р. Воямполка. Бассейны обеих рек находятся в одном физико-географическом районе Камчатки, поэтому условия формирования стока наносов в них должны быть близкими. Но все же они различаются по своему рельефу (у Паланы он более гористый), размерам (площадь бассейна Паланы в три раза меньше) и условиям транспорта наносов (р. Палана протекает через оз. Паланское, которое замыкает всю высокогорную часть речного бассейна с $F_6 = 623 \text{ км}^2$). Поэтому дальнейшие расчеты носят предположительный характер. В справочнике [Государственный..., 1987] содержатся сведения о стоке взвешенных наносов р. Воямполки за многолетний период (створ «с. Воямполка»; 1959, 1960, 1964–1980 гг.; площадь замыкаемого бассейна – 5120 км^2 , расстояние от устья – 32 км). Средний годовой модуль стока взвешенных наносов (M_n) в бассейне этой реки составляет 28 т/км^2 . Если эту величину перенести на бассейн Паланы (на ту его часть, которая находится ниже озера), тогда годовой сток наносов (W_n) в устье реки составит $W_n = M_n F_6 = 28 \times (2500 - 623) = 53 \text{ тыс. т}$. Из этого объема лишь некоторая часть приходится на долю пляжеформирующих фракций. Примем, что эта доля такая же, как в устьях рек Сахалина, т. е. $\sim 10\%$ твердого стока реки [Афанасьев, 2019]. Таким образом, даже если не учитывать отложение наносов в нижнем течении реки из-за подпора от очень больших приливов (а оно должно быть существенным), то в море из речного бассейна поступает $\sim 5,3 \text{ тыс. т/год}$ пляжеформирующих наносов. При средней плотности речного песка 1600 кг/м^3 годовой объем наносов, поступающих к устью реки из ее бассейна, составляет $\sim 3,3 \text{ тыс. м}^3$. Для формирования 1 п. м косы в устье реки необходимо $\sim 700 \text{ м}^3$ наносов. То есть твердый сток реки может обеспечить формирование не более чем 5 п. м косы в год. Отсюда следует, что в обсуждаемом случае роль речного стока незначительна. Это согласуется с нашими выводами по устьям рек Большой и Камчатки [Горин и др., 2012; Горин, 2014], которые находятся на юго-западном и восточном побережьях Камчатки, соответственно, а также с известными данными об устьях рек Сахалина [Афанасьев, 2019], которые можно считать бли-

жайшим аналогом устьев рек Камчатки, и с более общими выводами о роли отдельных источников в балансе наносов береговой зоны Охотского моря [Арчиков и др., 1982].

О некоторых факторах морфодинамики косы. Учитывая вышеизложенное, причины межгодовых различий в развитии устья реки следует искать в соответствующей изменчивости характеристик ветровых волн в прибрежной зоне моря. Ведь именно они определяют поступление наносов с подводного берегового склона и от размыва берегов. Речная струя при этом играет роль ловушки морских наносов, перемещающихся в береговой зоне под действием волн. Внешне этот процесс проявляется в периодическом формировании приустьевого бара, который впоследствии присоединяется к косе. Возможно, зимней аккумуляции наносов на пляже в районе устья Паланы способствует лед. В ноябре–декабре, когда в море еще нет берегового припая, выброшенные на берег льдины сами по себе содержат наносы, а также создают каркас для аккумуляции тех наносов, которые приносятся волнами. Позже, в январе–марте, береговой припай защищает пляжи от размыва.

О распространенности исследуемого явления. К настоящему времени на берегах Камчатки нами исследовано девять устьев рек (включая устье р. Паланы), которые со стороны моря блокированы барами или косами [Горин, 2020]. Изученные объекты находятся как на гористых, так и на равнинных участках побережья, они развиваются при различных сочетаниях величин речного стока, морских приливов и волнения. В результате получено представление о морфодинамике устьевой рельефа почти во всем диапазоне существующих на Камчатке условий. Это, в свою очередь, позволяет делать некоторые региональные обобщения. На Камчатке активная морфодинамика аккумулятивных форм (кос и баров) в продольном направлении характерна для устьев средних и больших рек ($Q_r > 50 \text{ м}^3/\text{с}$), находящихся на равнинных и открытых для морских волн участках побережья с максимальной величиной приливов от 2 до 6 м [Горин, 2020]. Важно отметить, что во всех подобных случаях коса или бар отделяют от моря обширную лагуну, в которую впадает река. В пределах побережья Охотского моря динамичные косы и бары есть в устьях рек северо-восточного Сахалина [Афанасьев, 2019] и на северо-западе моря [Кравцов, 1984]. В обоих случаях выполняются перечисленные выше условия: равнинное и открытое морским волнам побережье, средние и большие реки, приливы от 2 до 6 м, обширные устьевые лагуны. Очевидно, что устье Паланы не вполне соответствует этим условиям, в первую очередь по величине приливов (значитель-

но больше 6 м) и отсутствию лагуны (хотя второе можно считать следствием первого). На берегах России приливы более 6 м встречаются только в Охотском (зал. Шелихова, Пенжинская губа, заливы у Шантарских островов) и Белом (Мезенский залив) морях. Краткое ознакомление – по картам и космическим снимкам – с устьями рек, находящимися в этих районах, показало, что среди одного-двух десятков объектов только в устье р. Лесной (60 км к СВ от устья Паланы) есть коса, масштабы и интенсивность морфодинамики которой могут быть сопоставимы с обсуждаемым случаем. Таким образом, устье Паланы представляет собой если не уникальный, то очень редкий пример проявления морфологических процессов. Безусловно, этот объект требует дальнейшего изучения, но уже с привлечением более широкого арсенала моделей и с использованием данных различных реанализов.

Опыт улучшения судоходных условий. В устье Паланы опасность для судоходства представляет не смещение речного устья к югу как таковое, а сопутствующие этому явления: сильная изменчивость положения фарватера и приближение устьевой прорвы к скалам и камням (см. рис. 3). Первое создает неопределенность при навигации, а второе – реальную возможность повреждения судна при заходе в устье. В данном случае проблема навигации успешно решается благодаря наличию постоянного лоцмана. Вторая проблема может быть решена только одним способом – недопущением приближения судового хода к камням.

Начиная с 2017 г., местные власти и жители пос. Палана регулярно занимаются выправлением устья реки. В целом проводимые ими мероприятия следует признать правильными и эффективными: при минимуме материальных затрат с использованием только имеющейся техники найден надежный способ регулировать положение устья реки и тем самым стабилизировать судовой ход. Мы считаем, что этот опыт нужно систематизировать и формализовать. Приведенные ниже рекомендации основаны на решениях уже опробованных и хорошо себя зарекомендовавших как в устье Паланы, так и в других подобных объектах на Западной Камчатке, в которых нам довелось работать.

Условия, при которых необходимы гидротехнические мероприятия. Ранее было показано, что в естественных условиях устьевая коса стремится к удлинению в ЮЮЗ направлении и поэтому прорва, соединяющая море с рекой, находится значительно южнее, чем сейчас. Но при длине косы более 1,8 км выход в море находится в непосредственной близости от камней (см. рис. 3). А для безопасности судоходства необходимо, чтобы судовой ход был удален от камней не менее чем на 0,3 км. Также следует

учесть тот факт, что за один год устьевая коса может вырасти на 0,6 км (см. выше). Исходя из этого, рекомендуется не допускать удлинения косы более чем на 0,9 км от ее основания (от принятой нами исходной точки). Только при этом условии безопасность судоходства будет гарантирована как на текущую, так и на следующую навигацию. Для этого желательно использовать комбинацию из двух подходов: ежегодное выправление существующей прорвы, находящейся в допустимом расстоянии от основания косы, а также периодическое (раз в несколько лет) сооружение новой прорвы в тех случаях, когда длина косы достигает критической величины.

Способ сооружения новой прорвы. Успешная практика проведения подобных работ в устье Паланы (а также в устьях других рек Западной Камчатки – например, Ичи и Крутогорова) заключается в следующем. Для сооружения новой прорвы в теле косы необходимо выкопать поперечную канаву. Для того чтобы устье начало самостоятельно промываться, глубина этой канавы должна быть хотя бы на 1 м ниже горизонта низких малых вод с речной стороны косы. В случае устья Паланы это на 7–8 м ниже гребня косы. Ширина канавы должна быть >15–20 м. Длина соответствует ширине косы – в данном случае до 100 м. Таким образом, примерный объем выборки грунта составляет 10–20 тыс. м³.

Канаву вырабатывается последовательно: сначала в центре косы сооружается котлован необходимой глубины, затем убирается перемычка со стороны моря и в последнюю очередь разрушается перемычка со стороны реки. Попуск воды желательно провести тогда, когда уровень моря близок к своим минимальным отметкам – тогда перепад уровней между рекой и морем будет максимальным, и новое устье быстро углубится и расширится.

Все работы должны проводиться только в отлив – во избежание затопления котлована с техникой. Учитывая большой объем выборки грунта, работы вряд ли возможно завершить за один отлив, поэтому на бортах котлована рекомендуется сооружать временные дамбы (для защиты от затопления во время прилива).

Описанная выше схема работ ориентирована на использование сухопутной техники – экскаваторов, бульдозеров и самосвалов, которые есть в пос. Палана. Поскольку эта схема уже оправдала себя на практике, мы полагаем излишним рекомендовать использование каких-либо плавучих земснарядов. Это тем более неразумно, поскольку в Камчатском крае нет ни нужных технических средств, ни опыта работы с ними.

Выбор времени для проведения работ. Наиболее подходящим периодом для принятия решения о проведении работ по расчистке устья следует считать

начало мая. С одной стороны, к этому времени завершается наиболее активная фаза удлинения косы. С другой стороны, в мае в р. Палана идет подъем волны половодья, благодаря чему устье интенсивно промывается речной струей. Перед принятием решения рекомендуется получить в Камчатском УГМС прогноз по датам начала и пика половодья, а также его возможной водности (хотя бы в категориях «ниже среднего», «среднее», «выше среднего»). Дату проведения работ рекомендуется устанавливать таким образом, чтобы она наступала до прогнозной даты пика половодья и приходилась на период сизигийных приливов в море.

ВЫВОДЫ

В многолетней морфодинамике устья Паланы можно выделить три вида. При первом происходит последовательное удлинение устьевой косы на ЮЮЗ со средней интенсивностью 100–150 м/год. При втором коса нарастает в том же направлении сразу на 400–600 м и более в год (преимущественно в осенне-зимний период). При третьем виде устьевая коса в течение года сохраняет свою длину, хотя при этом возможны поперечные переформирования. Удлинение косы в ЮЮЗ направлении – это естественное явление, первые сведения о котором относятся ко второй половине XIX – началу XX в. Наибольшая длина устьевой косы достигала 2,5–2,8 км (в середине прошлого века).

В некоторые годы возможен прорыв устьевой косы в ее прикорневой части по природным причинам. Скорее всего, это происходит при интенсивном увеличении водного стока реки в половодье и паводки. «Естественные» прорывы в устье Паланы бывают редко – за 20 последних лет это случилось один-два раза. Кроме этого, устье Паланы неоднократно спрямлялось искусственно. Впервые это произошло между 1952 и 1970 гг. В последние 10

лет это делалось трижды. После естественного или антропогенного прорыва косы цикл развития устья начинается заново.

Источниками наносов для удлинения косы служат подводный береговой склон и активные уступы на абразионном участке берега к северу от устья реки. Речные наносы не играют существенной роли в исследуемом процессе. Причины развития устьевой рельефа по разным сценариям в отдельные годы следует искать в межгодовых различиях характеристик ветрового волнения в прибрежной зоне моря.

В устье Паланы наибольшую опасность для судоходства представляет сопутствующее удлинению косы явление – приближение устьевой прорвы к скалам и камням, находящимся южнее устья реки. Эта проблема может быть решена только одним способом – контролем длины косы. Для этого разработаны рекомендации, учитывающие имеющиеся в поселке материально-технические ресурсы и практический опыт. Определены условия, при которых необходимы гидротехнические мероприятия, наиболее благоприятное время для их проведения и способ сооружения новой прорвы.

Сопоставление полученных результатов с известными данными об устьях рек Камчатки, Сахалина и материкового побережья Охотского моря показало, что устье Паланы представляет собой редкий пример активной морфодинамики устьевой косы в гиперприливном устье реки. В связи с чем этот объект требует дальнейшего изучения, но уже с привлечением более широкого арсенала моделей и с использованием данных различных реанализов. Наиболее важными и интересными представляются вопросы о роли приливов в формировании поперечного профиля баров и кос, связи прибрежных морских течений с продольной морфодинамикой аккумулятивных форм, а также влиянии льда на динамику пляжей.

Благодарности. Авторы выражают свою глубокую благодарность администрации и жителям пос. Палана (особенно М.П. Лосеву и А.В. Антонову), помогавшим в проведении полевых исследований и предоставившим фото- и видеоматериалы, а также С.Р. Чалову за организацию работы. Часть исследований выполнена в рамках государственного задания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (тема № 0149-2019-0005) и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-01224).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арчиков Е.И., Бровко П.Ф., Рыбаков В.Ф., Шуйский Ю.Д. Абразионный фактор поступления осадочного материала в Охотское море // Современное осадконакопление и четвертичный морфолитогенез Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1982. С. 165–177.
- Афанасьев В.В. Морфолитодинамика лагунных проливов северо-восточного Сахалина // Геоморфология. 2019. № 2. С. 79–94.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IX: Охотское море. Вып. I: Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. 340 с.
- Горин С.Л. Многолетняя динамика аккумулятивных барьерных форм на берегах Камчатки // Береговые исследования в Тихоокеанской России: сб. науч. статей. Владивосток: ДВФУ, 2020. С. 55–66.
- Горин С.Л. Морфодинамика устья реки Камчатки в XVIII–XX вв. и ее влияние на гидрологический ре-

- жим устьевых водоемов // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2014. № 32. С. 79–88.
- Горин С.Л., Коваль М.В. Гидрологические процессы в эстуариях рек Ича и Крутогорова и в прилегающих водах Охотского моря в летний период // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. Вып. 55. 2019. С. 146–173.
- Горин С.Л., Игнатов Е.И., Кравчуновская Е.А., Корзинин Д.В., Тембрел И.И. Морфодинамика Октябрьской косы (Охотоморское побережье Камчатки) // Морские берега – эволюция, экология, экономика: материалы XXIV Международной береговой конф. (Туапсе, 1–6 октября 2012 г.). Т. 1. Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2012. С. 94–97.
- Государственный водный кадастр: Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1. Вып. 18: Бассейны рек Камчатской области (за 1975–1980 гг. и весь период наблюдений) / под ред. Н.И. Пика. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 386 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000 (третье поколение). Корякско-Курильская серия. Лист О-57 (Палана). ОАО «Камчатгеология», ФГУП «ВНИИОкеанология», 2013.
- Давыдов Б.В. Лоция побережий Р.С.Ф.С.Р. Охотского моря и восточного берега полуострова Камчатки с островом Карагинским включительно. Владивосток: Упр. по обеспечению безопасности судоходства Дальнего Востока. 1923. 1498 с.
- Де-Ливрон С. Лоция северо-западной части Восточного океана. Ч. III. СПб.: Главное гидрографическое управление Морского министерства, 1907. 329 с.
- Дитмар К. Поездки и пребывание в Камчатке в 1851–1855 гг. СПб., 1901. 754 с.
- Западный берег Камчатки (по описям Ушакова и Елистратова, 1742 и 1787 г.) // Записки гидрографического департамента Морского министерства. 1852. Ч. X. С. 136–155.
- Кондратьев В.И. Климат Камчатки. М.: Гидрометеиздат, 1974. 200 с.
- Кравцов В.Д. Стадийность и цикличность развития аккумулятивных форм приливного устья (на примере устья р. Кухтуй) // Тр. ГОИН. 1984. Вып. 172. С. 125–134.
- Крашенинников С.П. Описание земли Камчатки: с прил. рапортов, донесений и других неопубликованных материалов. М.; Л.: Изд-во Главсевморпути, 1949. 842 с.
- Леонтьев И.О. Морфодинамические процессы в береговой зоне моря. LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 260 с.
- Лессепс Ж.-Б. Лессепсово путешествие по Камчатке и по южной стороне Сибири / пер. с фр. М.: Тип. А. Решетникова, 1801–1802.
- Мизеров А.В. Геоморфологические наблюдения по западному побережью Камчатского полуострова // Известия ГГО ВГО. Т. 69. № 2. 1937. С. 244–253.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 20: Камчатка. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 367 с.
- Сгибнев А. Исторический очерк главнейших событий в Камчатке с 1650–1856. Отд. оттиск из Морского сборника, № 4–8, СПб., 1869. Ч. I–V.
- Слюнин Н.В. Охотско-Камчатский край: естественно-историческое описание: в 2 т. Т. 1. СПб.: Тип. А.С. Суворина, 1900. 690 с.
- Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей. Российский морской регистр судоходства. СПб., 2003. 213 с.
- Стеллер Г.В. Описание земли Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камч. печ. двор, 1999. 288 с.
- Тюшов В.Н. По Западному берегу Камчатки. СПб., 1906. 521 с.

Поступила в редакцию 19.11.2020

После доработки 15.08.2021

Принята к публикации 22.11.2021

DYNAMICS OF COASTAL ACCUMULATIVE FORMS AND THE EXPERIENCE OF IMPROVING NAVIGATION CONDITIONS AT THE PALANA RIVER MOUTH (NORTHWESTERN KAMCHATKA)

S.L. Gorin¹, D.V. Korzinin², D.I. Shkolniy³, P.M. Belova⁴

¹ All-Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Salmon Reproduction Laboratory, Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: gorinser@mail.ru

² Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, V.P. Zenkovich Laboratory of Shelf and Seashores, Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: korzinin2000@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Scientific Researcher; e-mail: daniila.hydro@yandex.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography, postgraduate student; e-mail: pbelova97@mail.ru

The village of Palana is situated on the north-eastern coast of the Sea of Okhotsk at the mouth of the same-name river. Palana is an important fishing center of the Kamchatka region. The river mouth is blocked by an accumulative barrier bar, the morphodynamics of which makes the navigation rather difficult. The article deals with possible improvements of navigable conditions in the estuary. The work is based on the analysis of

archive and published materials, space images, the results of our fieldwork and modeling. Three types of morphodynamic evolution were identified, namely: 1) consecutive elongation of the spit to the south-south-west at 100–150 m/year on the average; 2) spit increase in the same direction by 400–600 m and more per year; and 3) relative stability of the spit. Elongation of the spit to the south-south-west is a natural phenomenon. The maximum length of the spit was 2.8 km. On rare occasions (several times in a century) the estuary spit was broken and the channel straightened due to natural reasons, most likely, a significant increase in river runoff during seasonal floods. In addition, the mouth of the Palana River was artificially straightened several times. After natural or anthropogenic breaking of the spit the development cycle in the river mouth restarts. Sediments for the elongation of the spit come from the underwater coastal slope and the active cliffs on the abrasion segment of the coast to the north of the river mouth; the role of river sediment is insignificant. When the tip of the spit gets closer to rocks and stones to the south of the river mouth it threatens the local navigation. The only way to settle the problem is to control the length of the spit. For the purpose, recommendations were developed, with due account of material and technical resources available in the settlement and the practical experience. We specified the prerequisites for hydrotechnical measures, the most favorable time for their implementation and the method of constructing a new breach.

Keywords: spit, bar, sea coasts, morphodynamics, the Sea of Okhotsk

Acknowledgements. The authors express their deep gratitude to the administration and residents of the Palana village, particularly to M.P. Losev and A.V. Antonov, who assisted in field investigations and provided photographic and video materials, as well as to S.R. Chalov for organizing the work. The research was partly carried out under the state assignment of Shirshov Institute of Oceanology, RAS (topic no. 0149-2019-0005) and financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 17-05-01224).

REFERENCES

- Afanas'ev V.V. Morfolitodinamika lagunnykh prolivov severo-vostochnogo Sakhalina [Morphotodynamics of lagoonal straits of the northeastern Sakhalin], *Geomorfologiya*, 2019, no. 2, p. 79–94.
- Archikov E. I., Brovko P.F., Rybakov V.F., Shuiskii Yu.D. [Abrasion factor of sediment flow into the Sea of Okhotsk], *Sovremennoe osadonakoplenie i chetvertichnyi morfolitogenez Dal'nego Vostoka* [Present-day Sedimentation and Quaternary Morpholithogenesis of the Far East], Vladivostok, DVNTs AN SSSR Publ., 1982, P. 165–177. (In Russian)
- Davydov B.V. *Lotsiya poberezhii R.S.F.S.R. Okhotskogo morya i vostochnogo berega poluostrova Kamchatki s ostrovom Karaginskim vkluchitel'no* [Pilot chart of the coasts of R.S.F.S.R. Sea of Okhotsk and the eastern coast of the Kamchatka peninsula including the Karaginsky Island], Vladivostok, Far East Ship Security Administration Publ., 1923, 1498 p. (In Russian)
- De-Livron S. *Lotsiya severo-zapadnoi chasti Vostochnogo okeana* [Pilot chart of northwest part of the Eastern Ocean], part III, Saint Petersburg, Main Hydrographic Department of the Maritime Ministry Publ., 1907, 329 p. (In Russian)
- Ditmar K. *Poezdki i prebyvanie v Kamchatke v 1851–1855 gg.* [Travel and stay in Kamchatka in 1851–1855], Saint Petersburg, 1901, 754 p. (In Russian)
- Gidrometeorologiya i gidrokimiya morei SSSR* [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR], T. IX, Okhotskoe more [The Sea of Okhotsk], iss. I, *Gidrometeorologicheskie usloviya* [Hydrometeorological conditions], Saint Petersburg, *Gidrometeoizdat* Publ., 1998, 340 p. (In Russian)
- Gorin S.L. [Long-term dynamics of accumulative barrier forms on Kamchatka shores], *Beregovye issledovaniya v Tikhookeanskoj Rossii: sb. nauchn. Statei* [Coastal research in Pacific Russia: coll. of scientific articles], Vladivostok, Far Eastern Federal University Publ., 2020, p. 55–66. (In Russian)
- Gorin S.L. [Morphodynamics of the Kamchatka River estuary in the 18th–20th centuries and its impact on the hydrological regime of estuaries], *Issledovaniya vodnykh biologicheskikh resursov Kamchatki i severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana* [Studies of Aquatic Biological Resources of Kamchatka and the Northwest Pacific], 2014, no. 32, p. 79–88. (In Russian)
- Gorin S.L., Ignatov E.I., Kravchunovskaya E.A., Korzinin D.V., Tembrel I.I. [Morphodynamics of the Oktyabrskaya Spit (the western coast of Kamchatka)], *Morskie berega – evolyutsiya, ekologiya, ekonomika, materialy XXIV Mezhdunarodnoy beregovoï konf.* (Tuapse, 1–6 oktyabrya 2012 g.) [Sea Coasts – Evolution, Ecology, and Economics, Proceedings of the XXIV International Coastal Conference (Tuapse, October 1–6, 2012)], vol. 1, Krasnodar, Yug Publ., 2012, p. 94–97. (In Russian)
- Gorin S.L., Koval' M.V. [Hydrological processes in the estuaries of the Icha and Krutigorova Rivers and adjacent waters of the Sea of Okhotsk in summer], *Issledovaniya vodnykh biologicheskikh resursov Kamchatki i severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana* [Research of aquatic biological resources of Kamchatka and North-West Pacific Ocean], iss. 55, 2019, p. 146–173. (In Russian)
- Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoi Federatsii masshtaba 1 : 1 000 000 (tret'e pokolenie), Koryaksko-Kuril'skaya seriya, List O-57 (Palana)* [State Geological Map of the Russian Federation at a scale of 1 : 1 000 000 (third generation), Koryaksko-Kuril series, Chart-sheet O-57 (Palana)], OAO "Kamchatgeologiya", FGUP "VNIIOkeanologiya", 2013.
- Gosudarstvennyi vodnyi kadastr; Mnogoletnie dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi* [State Water Cadastre, Multi-year data on the regime and resources of surface waters of the land], vol. I, iss. 18, Basseiny rek Kamchatskoi oblasti (za 1975–1980 gg. i ves' period nablyudenii) [Kamchatka region river basins (for 1975–1980 and the entire observation period)], N.I. Pika (ed.), Lenin-grad, *Gidrometeoizdat* Publ., 1987, 386 p. (In Russian)

- Kondratyuk V.I. *Klimat Kamchatki* [Climate of Kamchatka], Moscow, Gidrometeoizdat Publ., 1974, 200 p. (In Russian)
- Krashennnikov S.P. *Opisanie zemli Kamchatki: s pril. raportov, doneseni i drugikh neopublikovannykh materialov* [Description of the land of Kamchatka: with reports and other unpublished materials attached], Moscow, Leningrad, Main Northern Sea Route Publ., 1949, 842 p. (In Russian)
- Kravtsov V.D. [Stages and cyclicity of development of accumulative forms in the tidal estuaries (case study of the Kuhtui River estuary)], *Tr. GOIN* [The Works of the State Oceanographic Institute], 1984, iss. 172, p. 125–134. (In Russian)
- Leont'ev I.O. *Morfodinamicheskie protsessy v beregovoii zone moray* [Morphodynamic processes in coastal zone], LAP Lambert Academic Publishing, 2014, 260 p. (In Russian)
- Lesseps Zh.-B. *Lessepsovo puteshestvie po Kamchatke i po yuzhnoi storone Sibiri, per. s fr.* [The Lesseps' travel through Kamchatka and southern Siberia, per. from fr.], Moscow, Reshetnikov printing press, 1801–1802. (In Russian)
- Mizerov A.V. *Geomorfologicheskie nablyudeniya po zapadnomu poberezh'yu Kamchatskogo poluostrova* [Geomorphological observations along the western coast of the Kamchatka Peninsula], *Izvestiya GGO VG*, vol. 69, no. 2, 1937, p. 244–253. (In Russian)
- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR* [Surface water resources of the USSR], vol. 20, Kamchatka, Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1973, 367 p. (In Russian)
- Sgibnev A. *Istoricheskii ocherk glavneishikh sobytii v Kamchatke s 1650–1856, Otd. ottisk iz Morskogo sbornika* [Historical essay of the most important events in Kamchatka s 1650–1856, Separate imprint from the Marine Collection], no. 4–8, Saint Peterburg, 1869, ch. I–V. (In Russian)
- Slyunin N.V. *Okhotsko-Kamchatskii krai: estestvenno-istoricheskoe opisanie, v 2 t.* [Okhotsk-Kamchatka Territory: natural-historical description, in 2 vol.], Saint Petersburg, Tip. A.S. Suvorin Publ., vol. 1, 1900, 690 p. (In Russian)
- Spravochnye dannye po rezhimu vetra i volneniya Barentseva, Okhotskogo i Kaspiiskogo morei* [Reference data on wind and wave regime in the Barents Sea, the Sea of Okhotsk and the Caspian Sea], Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, Saint Petersburg, 2003, 213 p. (In Russian)
- Steller G.V. *Opisanie zemli Kamchatki* [Description of the Kamchatka Land], Petropavlovsk-Kamchatskiy, Kamchatskii pechatnyi dvor Publ., 1999. 288 p. (In Russian)
- Tyushov V.N. *Po Zapadnomu beregu Kamchatki* [Along the Western Coast of Kamchatka], Saint Petersburg, 1906, 521 p. (In Russian)
- [Western coast of Kamchatka (according to the descriptions of Ushakov and Elistratov, 1742 and 1787)], *Zapiski gidrograficheskogo departamenta Morskogo ministerstva* [Notes of the Hydrographic Department of the Maritime Ministry], 1852, part X, p. 136–155. (In Russian)

Received 19.11.2020

Revised 15.08.2021

Accepted 22.11.2021