

ПРОЯВЛЕНИЕ АКТИВНЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ В МОРФОЛОГИИ РЕЧНОЙ ДОЛИНЫ (НА ПРИМЕРЕ ДОЛИНЫ р. КАМЧАТКИ)[#]

© 2024 г. Е. А. Зеленин^{1,*}, М. Н. Кирякова²,
Е. О. Мухаметшина³, А. Л. Захаров³

¹Геологический институт РАН, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет, Москва, Россия

³Институт географии РАН, Москва, Россия

* E-mail: egorzelenin@mail.ru

Поступила в редакцию 30.03.2024 г.

После доработки 10.06.2024 г.

Принята к публикации 19.07.2024 г.

Река Камчатка является крупнейшей рекой одноименного полуострова. Площадь бассейна реки позволяет считать его одним из крупнейших в мире, сформировавшихся над зоной субдукции. Географическое положение полуострова в умеренном морском климате позволяет ожидать высокую интенсивность флювиальных процессов бассейна р. Камчатки, однако их изученность вплоть до настоящего времени опирается преимущественно на публикации середины XX века. Накопленные за последующее время датировки отложений и новые дистанционные данные позволяют выявить пространственное распределение и оценить вклад современных тектонических движений в развитие долины. Для достижения этой цели авторами был рассчитан растр превышения рельефа над речной сетью и основные морфометрические характеристики русла р. Камчатки – уклон и коэффициент его извилистости. Полученные данные позволяют разделить долину р. Камчатки на восемь участков, резко различающихся по морфологии. Такое строение долины в первую очередь связано с неравномерным прогибанием ЦКД, скорость которого превышает скорость адаптации флювиальных процессов.

Ключевые слова: речная долина, морфометрический анализ, неотектонические деформации, активная континентальная окраина

DOI: 10.31857/S2949178924030062, EDN: PLOXSZ

ВВЕДЕНИЕ

Полуостров Камчатка – часть восточной активной континентальной окраины Евразии. Полуостров как выступ земной коры сформировался над северной частью Курило-Камчатской зоны субдукции в мелу–неогене (Цуканов, 1991; Константиновская, 2003), а основные черты рельефа Камчатки заложены в неоплейстоцене под совокупным влиянием надсубдукционного вулканизма и новейшей тектоники (Камчатка, Курильские ..., 1974). В отличие от смежных островных дуг Тихоокеанского огненного кольца, вдоль полуострова Камчатка протягивается два вулканических пояса

(рис. 1, (а)). Эта уникальная особенность связана с новейшей тектонической историей полуострова, включавшей в себя аккрецию фрагментов потухшей Кроноцкой дуги, перескок зоны субдукции (Lander, Shapiro, 2007) и, вслед за этим, перемещение вулканической активности из вулканического пояса Срединного хребта в Восточный вулканический пояс (Avdeiko et al., 2007).

Одним из крупнейших элементов современной морфоструктуры Камчатки является Центральная Камчатская депрессия (ЦКД). Она простирается вдоль полуострова на 450 км, а ее ширина достигает 100 км. В геологической литературе ЦКД как форма рельефа ассоциируется с геологической структурой, называемой Центральнокамчатским рифтом (Государственная ..., 2006). Такая структурная интерпретация обусловлена активной протяженной сбросовой границей между ЦКД и Восточным хребтом (Kozhurin et al., 2006) и продолжающимся прогибанием фундамента ЦКД при

[#]Ссылка для цитирования: Зеленин Е.А., Кирякова М.Н., Мухаметшина Е.О., Захаров А.Л. (2024). Проявление активных тектонических движений в морфологии речной долины (на примере долины р. Камчатки). *Геоморфология и палеогеография*. Т. 55. № 3. С. 109–122. <https://doi.org/10.31857/S2949178924030062>; <https://elibrary.ru/PLOXSZ>

движении блока Восточной Камчатки на восток (Ермаков и др., 1974, Кожурин и др., 2008). Детальные исследования тектонического развития ЦКД опираются на фактический материал о ее восточной границе, сформированной активными сбросами (Kozhurin et al., 2006, Kozhurin, Zelenin, 2017), тогда как данные о скорости новейших деформаций внутри ЦКД отсутствуют.

Крупнейшей речной системой п-ова Камчатка является дренирующая ЦКД р. Камчатка с притоками (рис. 1, (б)). Протяженность реки составляет 758 км при площади бассейна ~ 56 тыс. км² (Бонк, 2015). Эти значения позволяют считать бассейн одним из крупнейших в мире, сформировавшихся над зоной субдукции (по данным HydroSHEDS, <https://www.hydrosheds.org/>). Бассейн почти полностью находится в ЦКД, т.е. закрыт от морских

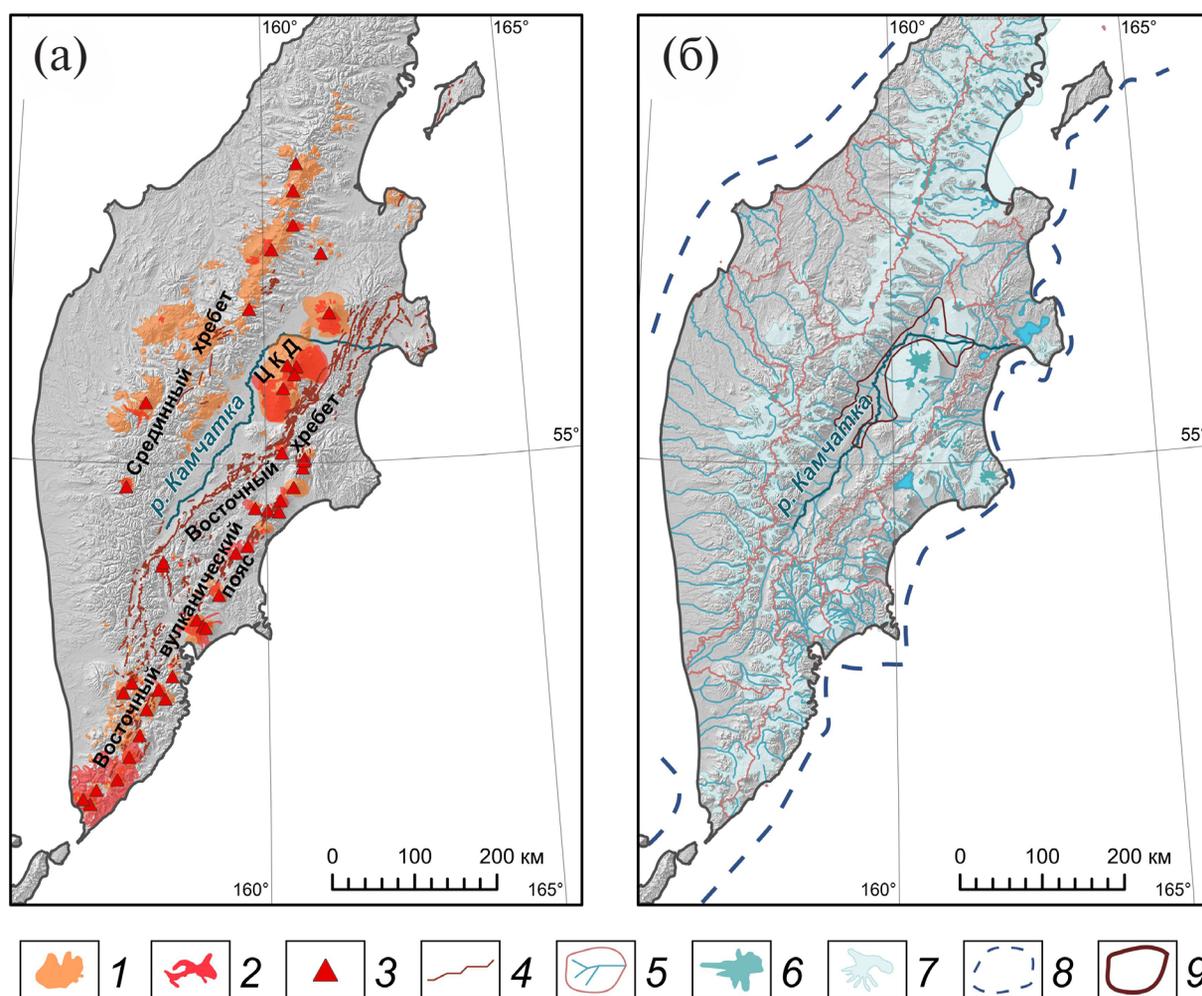


Рис. 1. Пространственное распределение основных факторов рельефообразования на Камчатке. (а) – проявления эндогенных факторов: 1 – позднеплейстоценовые вулканические отложения (Ponomareva et al., 2007); 2 – голоценовые вулканические отложения и 3 – центры извержений по (ГИС “Голоценовый вулканизм Камчатки”, Романова и др., 2015); 4 – активные разломы (Kozhurin, Zelenin, 2017). (б) – экзогенные факторы: 5 – речная сеть и границы крупнейших бассейнов (по данным <https://www.hydrosheds.org/>); положение ледников: 6 – современных (Lynch et al., 2016), 7 – второй фазы позднеплейстоценового оледенения (Брайцева и др, 1968), условно соответствующих глобальному максимуму последнего оледенения (Barr and Solomina, 2014); 8 – границы максимального оледенения (Barr and Solomina, 2014); 9 – предполагаемые границы позднеплейстоценового палеозера (Ponomareva et al., 2021).

Fig. 1. Spatial distribution of major geomorphic processes. (a) – endogenic: 1 – Late Quaternary volcanic deposits (Ponomareva et al., 2007); 2 – Holocene volcanic deposits and 3 – eruption centers (GIS “Holocene volcanism of Kamchatka”, Romanova et al., 2015); 4 – Active faults (Kozhurin, Zelenin, 2017). (б) – exogenic: 5 – rivers and watersheds (<https://www.hydrosheds.org/>); glaciers: 6 – modern (Lynch et al., 2016), 7 – “Phase II” of the Late Pleistocene glaciation (Braitseva et al, 1968), likely corresponding to the global Last Glacial Maximum (Barr and Solomina, 2014); 8 – maximum extent of Pleistocene glaciations (Barr and Solomina, 2014); 9 – possible boundaries of the Late Pleistocene paleolake (Ponomareva et al., 2021).

воздушных масс обрамляющими депрессию хребтами, и поэтому может быть отнесен к умеренному континентальному климату. Годовое количество осадков составляет около 500 мм, осадки распределены равномерно в течение года. Безледный период на реках бассейна составляет в среднем 6.5 месяцев – с начала мая до середины ноября (Бонк, 2015). Эти климатические параметры обеспечивают модуль стока 10–20 л/с/км² в пределах бассейна (Куксина, Алексеевский, 2017) и расход воды около 75 м³/с близ с. Мильково в среднем течении реки и около 890 м³/с в ее приустьевой части (Фролова и др., 2014). Таким образом, гидрометеорологические параметры бассейна позволяют ожидать высокой интенсивности флювиальных процессов.

В изучении флювиальных процессов на Камчатке можно выделить два этапа. На первом этапе, в середине XX в., были проведены обширные геоморфологические исследования (например, Кушев, Ливеровский, 1940; Брайцева и др., 1968; Куприна, 1970; Камчатка, Курильские ..., 1974). Результатом этих работ стало формирование общих представлений об этапах развития рельефа полуострова. К сожалению, из-за нехватки возрастных привязок эти исследования опирались в основном на глобальную хронологию оледенений и относительный возраст форм рельефа. Затем, вплоть до настоящего времени, основной фокус геоморфологических исследований сместился на области современного вулканизма, а флювиальное рельефообразование изучалось преимущественно в областях первичного вулканического рельефа – на вулканах Шивелуч (Salaorni et al., 2017), Ксудач (Лебедева, 2017), на Ключевской группе вулканов (Сейнова и др. 2010; Куксина, Алексеевский, 2017) и в Долине гейзеров (Лебедева и др., 2020; Лебедева, Черноморец, 2023). На периферии и за пределами вулканических зон изучались в основном современные русловые процессы (Опасные русловые процессы..., 2014; Школьный и др., 2017; Куксина, 2018; Чалов и др., 2021), либо накапливались геохронологические данные о возрасте аллювиальных отложений (Певзнер и др., 2006; Каримов и др., 2020; Ропотаева et al., 2021). За исключением этих работ, изученность рельефа бассейна р. Камчатки вплоть до настоящего времени преимущественно опирается на названные выше публикации середины XX в.

Цель данной работы – определить вклад современных тектонических движений в развитие долины реки Камчатки на основании морфометрических характеристик, полученных при обработке цифровых моделей рельефа и подкрепленных полевыми и литературными данными. Эти мате-

риалы позволяют обосновать распределение современных тектонических деформаций внутри ЦКД.

МЕТОДИКА

Исследование основано на детальном геоморфологическом картографировании бассейна р. Камчатки. В качестве исходных данных для картографирования были использованы модель водотоков и гидрологически корректная цифровая модель рельефа (ЦМР) проекта HydroSHEDS (пространственное разрешение 3 угловые секунды), а также цифровая модель местности ArcticDEM v.4.1 с пространственным разрешением 2 м (<https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/>).

На основании данных HydroSHEDS для бассейна реки в программном пакете SAGA GIS с помощью модуля Vertical Distance to Channel Network был рассчитан растр превышения рельефа над базовой поверхностью, полученной путем интерполяции высот русел (relative elevation model, REM); базовая поверхность была рассчитана по высотам водотоков с площадью водосбора более 100 км².

Для русла р. Камчатки были рассчитаны основные морфометрические характеристики: коэффициент извилистости и частный уклон. Для этого вручную была отрисована осевая линия поймы, ранее выделенной на основании морфологических критериев, высоты исторических половодий и опубликованных датировок пойменных отложений (Zelenin et al., 2023). Коэффициент извилистости был рассчитан как отношение длины русла к длине осевой линии поймы с шагом 20 км. Частный уклон был рассчитан как перепад высот русла на каждые 2 км вдоль осевой линии поймы. Такой подход, несколько отличающийся от классического определения уклона, был использован, чтобы получить более сглаженный и более устойчивый к переформированиям русла сигнал. Ранее расчет частного уклона р. Камчатки был выполнен вдоль линии русла (Чалов и др., 2021), однако полученный в этой работе график уклонов оказался слишком сильно зависим от локальных русловых процессов, что затрудняет решение задач настоящего исследования. Малые перепады высот в низовьях реки делают расчеты уклонов крайне чувствительными к возможным артефактам ЦМР. В связи с этим, расчеты уклонов в низовьях были сверены с высотными отметками на топографических картах масштаба 1 : 100 000 (съёмка 1971–1973 гг.).

Высотные и производные морфометрические данные были дополнены спутниковыми снимками высокого разрешения из общедоступных онлайн-сервисов и привязанными опубликованными картами (Брайцева и др., 1968; Камчатка,

Курильские ..., 1974; Ponomareva et al., 2007; Barr, Solomina, 2014; Kozhurin, Zelenin, 2017, Kozhurin et al., 2023, Zelenin et al., 2023). Полевые работы проводились авторами в 2010–2014 гг. в нижнем течении и в 2014–2023 гг. в среднем течении р. Камчатки. Полевые геоморфологические

наблюдения и описания разрезов позволили верифицировать схемы, построенные на основании дистанционных данных.

При картографировании использовалось наиболее общее определение понятия “речная долина” как линейной отрицательной формы рельефа,

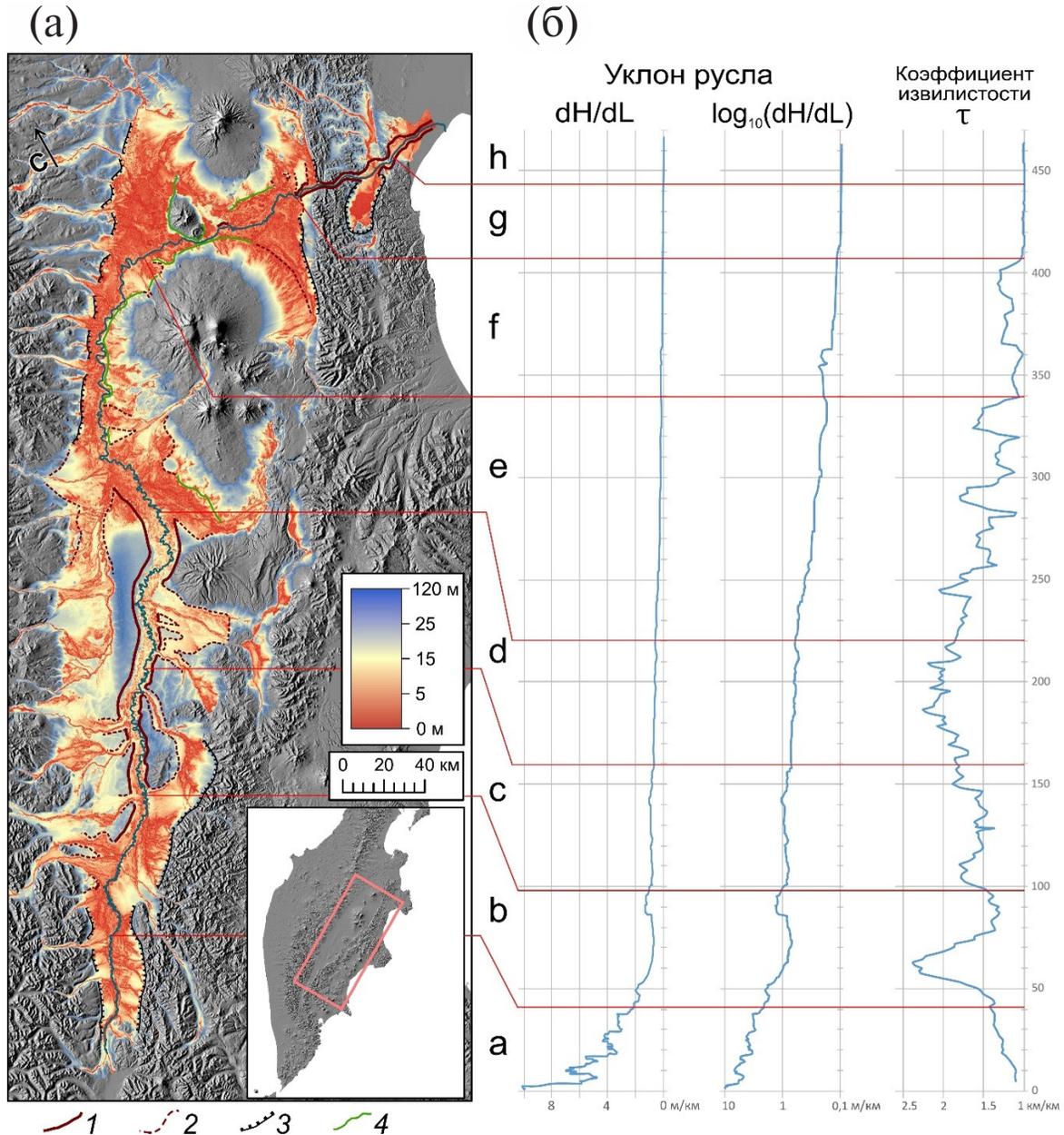


Рис. 2. (а) – Схема превышения рельефа над речной сетью (REM) и границы долины р. Камчатка (не показаны при впадении притоков): 1 – эрозионные границы; 2 – эрозионные границы долин крупнейших притоков; 3 – тектонические границы; 4 – фронт лавовых потоков и обломочных лавин. (б) – Морфометрические характеристики русла р. Камчатка: частный уклон (м/км) с равномерной (dH/dL) и логарифмической шкалой (log₁₀(dH/dL)), коэффициент извилистости (τ). Строчными латинскими буквами подписаны морфологически различающиеся участки долины (см. текст).

Fig. 2. (a) – Relative elevation model (REM) and boundaries of the Kamchatka River valley (not shown at tributaries): 1 – fluvial boundaries; 2 – fluvial boundaries of Kamchatka River tributaries; 3 – tectonic boundaries; 4 – front of lava flows and debris avalanches. (b) – Morphometric parameters of the Kamchatka River channel: stream gradient, m/km, with regular (dH/dL) and logarithmic (log₁₀(dH/dL)) scales, tortuosity ratio (τ). Valley segments having different morphology are labeled with lowercase letters, see the text.

выработанной постоянным водотоком (например, Рычагов, 2006). В ряде случаев выделение эрозионных бортов долины оказывается невозможно, тогда в качестве границы долины как области рельефообразующего действия постоянного водотока выделялись границы развития флювиальных аккумулятивных форм рельефа и указывался генезис этих границ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате обработки геопространственных данных были рассчитаны средний уклон и коэффициент извилистости русла, получен растр превышения рельефа над речной сетью, по которому с привлечением опубликованных карт (Камчатка, Курильские ..., 1974; Ponomareva et al., 2007; Kozhurin, Zelenin, 2017, Zelenin et al., 2023) были выделены границы долины р. Камчатки (рис. 2). Морфология долины позволила выделить восемь участков долины (индексы **a–h** на рис. 2–6), различающихся по генезису бортов долины, ее ширине и наличию внутри долины речных террас.

Участок **a** соответствует верховью реки Камчатки от ее истока (слияния рек Правой Камчатки илевой Камчатки) до села Шаромы. На этом участке

борта долины образованы прямолинейными тектоническими уступами. В днище долины отсутствуют надпойменные террасы, оно заполнено сливающимися конусами выноса крупных притоков, возвышающимися над водотоками не более чем на 15 м (рис. 3). Эрозионные уступы, фрагментарно проявленные на границах поймы р. Камчатки, позволяют выделить неактивные генерации конусов выноса притоков. Средний уклон русла ступенчато понижается вниз по течению с 10 м/км у истока р. Камчатки до 2 м/км на границе участка. Резкие изменения уклона и общий пилообразный характер графика dH/dL (рис. 2, (б)) связаны с пересечением конусов выноса. Русло р. Камчатки на участке **a** спрямленное, коэффициент извилистости на протяжении участка остается низким (менее 1.5), но с трендом на увеличение вниз по течению.

В верхнем течении р. Камчатки между с. Шаромы и с. Мильково выделяется участок **b** (рис. 3). Ширина долины на этом участке возрастает по сравнению с участком **a** и достигает 35 км. Правый борт долины сформирован тектоническими уступами, а левый эрозионный борт долины отходит от тектонической границы внутрь ЦКД. Днище долины по-прежнему выполнено сливающимися конусами выноса притоков. Коэффициент извили-

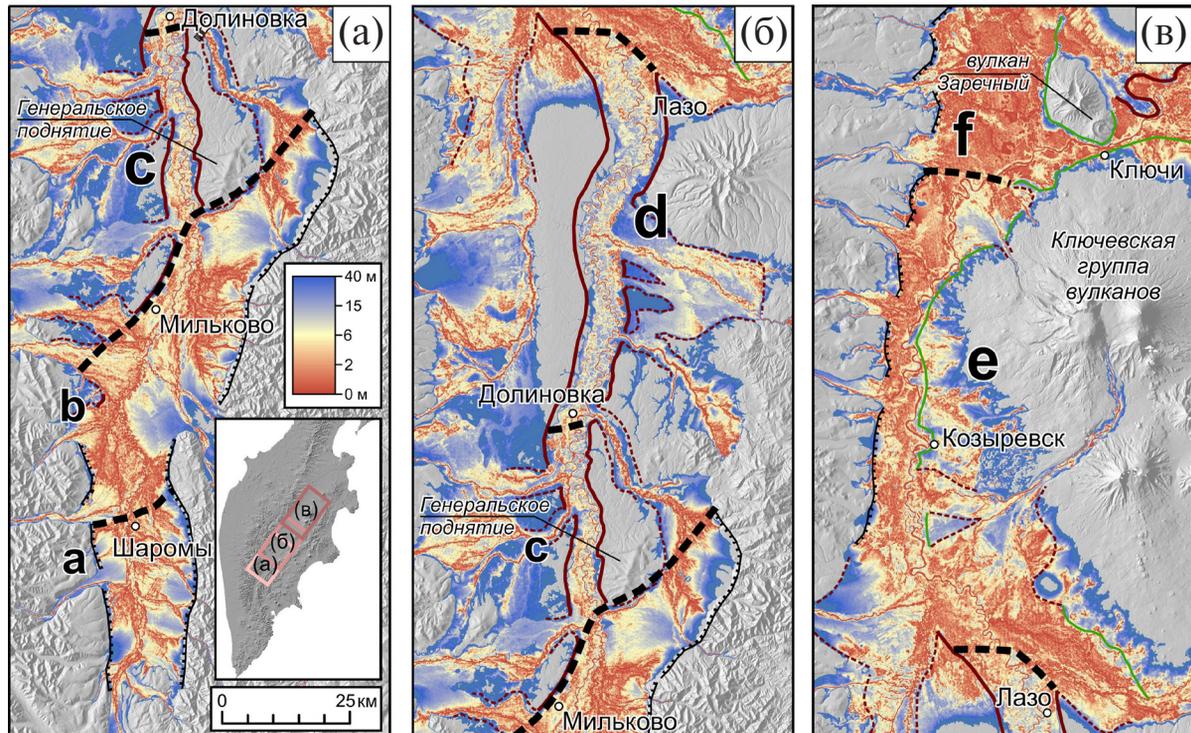


Рис. 3. Строение бассейна верхнего и среднего течения р. Камчатка. Пунктирными линиями показаны границы морфологически различающихся участков долины (а–f). Усл. обозначения см. рис. 2, (а).

Fig. 3. Topography of upper and middle reaches of the Kamchatka River valley. Dashed lines separate valley segments of different morphology (labeled a–f). Other symbols as in fig. 2, (a).

стости русла на участке **b** возрастает до 2.4 – самого высокого значения для р. Камчатки. Средний уклон русла р. Камчатки, напротив, снижается до 0.7 м/км (рис. 2). Граница со следующим участком отвечает резкому сужению долины и началу ее врезания в рыхлое заполнение ЦКД. Эрозионные останцы, включающие в себя выступы фундамента ЦКД, ограничивают долину реки, поэтому граница между участками, проводимая по появлению эрозионных останцов, не перпендикулярна направлению течения реки, а вытянута с ЮЗ на СВ.

Участок **c** расположен в среднем течении р. Камчатки между с. Мильково и с. Долиновка. Несмотря на расширяющееся днище ЦКД, долина имеет ширину всего 4–6 км. Долина р. Камчатки зажата между эрозионными останцами высотой 100–150 м над урезом на правом берегу и 30–100 – на левом. В них вскрываются озерные, аллювиальные, ледниковые и эоловые покровные отложения от ранне- до позднелайстоценового возраста (Брайцева и др., 1968). Эти останцы представляют собой обширные террасовидные поверхности (или фрагменты приподнятых участков равнин), густо расчлененные сетью оврагов и промоин, с эрозионными склонами вдоль р. Камчатки и ее притоков высотой до 80–100 м, зачастую прислоненные к низкогорным (до 550 м) выступам фундамента ЦКД. Большую часть ширины долины занимает пойма высотой до 5 м над урезом, однако на этом участке впервые появляются разрозненные фрагменты террас до высоты около 30 м над урезом, нигде не образующие более одного уровня (рис. 3). Террасы сложены нормальным двучленным аллювием, залегающим на цоколе разнообразного генезиса. Русловой аллювий представлен косослоистым галечником с гравийно-грубопесчаным заполнителем, пойменный аллювий – горизонтально-слоистой супесью с включением гравия и мелкой гальки. Средние уклоны русла локально возрастают до 1.2 м/км на границе участков **b** и **c** и сохраняются в диапазоне 0.8–1 м/км на всем протяжении участка **c**. Коэффициент извилистости снижается до 1.35 в области максимальных уклонов и ниже по течению поднимается до значения 1.5–1.9 (рис. 2, (б)).

Участок **d** начинается от с. Долиновка и заканчивается ниже с. Лазо по течению р. Камчатки. Современная узкая (4–6 км) долина р. Камчатки врезана в осадочное заполнение ЦКД на глубину до 50 м (рис. 3). Как и выше по течению, почти на всю ширину долина занята поймой высотой 5–7 м. Особенностью этого участка долины являются протяженные террасы одного или нескольких сближенных ярусов на высотах 18–25 м над урезом, строение разреза террас аналогично

участку **c**. Ниже по течению террасы отсутствуют. Средние уклоны русла здесь меньше, чем на предыдущем участке (0.5–0.8 м/км). В отличие от участка **c**, они плавно уменьшаются вниз по течению. Коэффициент извилистости возрастает и на большей части участка составляет 1.8–2.2, что является одним из самых высоких значений для р. Камчатки (рис. 2, (б)).

Участок **e** самый протяженный. Он начинается ниже по течению с. Лазо и заканчивается у поворота р. Камчатки на восток. Долина снова расширяется, а ее границами становятся флексура западного ограничения ЦКД и фронт лавовых потоков Ключевской группы вулканов с востока. Пойма занимает всю ширину долины, и на нее опираются конусы выноса притоков. На этом участке долины отсутствуют надпойменные террасы, а внутри конусов выноса притоков более древние неактивные генерации наблюдаются только у подножия Срединного хребта. С востока к руслу р. Камчатки подходят лавовые потоки, образующие ступени рельефа высотой 10–30 м (рис. 3), перекрытые озерными отложениями (Ponomareva et al., 2021) и почвенно-пирокластическим чехлом, а вблизи долин, спускающихся с Ключевской группы вулканов – селевыми (лахаровыми) отложениями. Средние уклоны русла равномерно понижаются с 0.5 до 0.17 м/км, а коэффициент извилистости колеблется в диапазоне 1.1–2.0, с трендом на понижение к нижней границе участка. Максимумы извилистости соответствуют крупным вынужденным меандрам при огибании руслом лавовых потоков пьедестала Ключевской группы вулканов.

Условное начало участка **f** – поворот русла на восток, а конец – восточный борт ЦКД. На этом участке долина имеет наиболее сложную конфигурацию. Река Камчатка огибает пьедестал Ключевской группы вулканов и течет далее в субширотном направлении. Соответственно, южный борт долины сформирован фронтом лавовых потоков Ключевской группы вулканов. Долина с запада ограничена тектоническим бортом ЦКД, а затем, после поворота русла на восток, вулканическими постройками влк. Харчинского и Заречного. В месте наибольшего сближения постройки Заречного и лавового пьедестала Ключевской группы ширина долины сокращается до 1.5 км, а затем резко расширяется. Далее северной границей долины становится фронт обломочных лавин, неоднократно сходявших с вулкана Шивелуч в голоцене и в конце позднего плейстоцена (Пономарева и др., 2014). Характерная величина отдельных обломков составляет 1–100 м и более (Belousov et al., 1999), поэтому воздействие речной эрозии на них минимально. Река Камчатка и ее притоки на этом

участке долины формируют широкую (до 20–30 км) низкую (до 5 м) аллювиальную равнину (рис. 4), полностью занятую поймой, надпойменные террасы отсутствуют. Средние уклоны русла продолжают снижаться вниз по течению, составляя меньше 0.2 м/км. Небольшое увеличение, а затем резкое снижение уклона связано с сужением долины у влк. Заречный. Коэффициент извилистости падает по сравнению с участком е до менее чем 1.3 (рис. 2, (б)); формируется пойменная многорукавность. Шлейфы лахаровых отложений, как и на предыдущем участке, сохраняются только на лавовых плато и в долинах притоков, а достигающий долины Камчатки материал не формирует собственных форм рельефа, но участвует в заполнении дна долины.

Суженный V-образный участок долины на пересечении р. Камчаткой хребта Кумроч соответствует сегменту g. Река последовательно прорезает моренную гряду, примыкающую с запада к хр. Кумроч, а затем коренные породы хребта, в которых вырабатывает спрямленные эрозионные борта. Долина на этом участке сужается до первых километров и состоит из дна, почти полностью занятого руслом, и склонов (рис. 4). S-образный в плане изгиб долины связывают с позднечетвертичными сдвиговыми деформациями внутри хребта Кумроч (Кожурин и др., 2023). Средние уклоны русла достигают минимума для р. Камчатки – менее 0.1 м/км. Коэффициент извилистости также падает до минимальных значений

и не превышает 1.1 (рис. 2). Область минимальных уклонов (~ 0.04 м/км) приурочена к урочищу Большие Щеки. Локальное возрастание уклонов отмечено в начале участка при прохождении руслом позднеплейстоценовой моренной гряды (Камчатка, Курильские..., 1974; Zelenin et al., 2023b) и на выходе из участка – в урочище Малые Щеки.

Последний участок р. Камчатки – от выхода из хребта Кумроч до устья (h). Современное спрямленное русло реки (рис. 2) вырабатывает эрозионные борта глубиной до 5 м в аллювиально-морских осадках (Пинегина и др., 2014). Появляются пойменные рукава основного русла р. Камчатки.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для участка a, помимо ожидаемой крайне интенсивной аккумуляции при выходе рек из горных областей, значимой особенностью является симметричное строение долины (рис. 5). Поскольку восточный борт долины сформирован зоной активных разломов (Kozhurin et al., 2006), активные тектонические деформации весьма вероятны и на западном борту. Вплоть до настоящего времени таковые на западной границе ЦКД на этом участке описаны не были, однако симметричное строение со сбросовыми и восточной, и западной границами известно для примыкающего с юга к ЦКД грабена р. Быстрой (Кожурин и др., 2008).

Начиная с границы участков b и c, ЦКД перестает иметь симметричное строение, а долина р. Камчатки становится врезанной в отложения

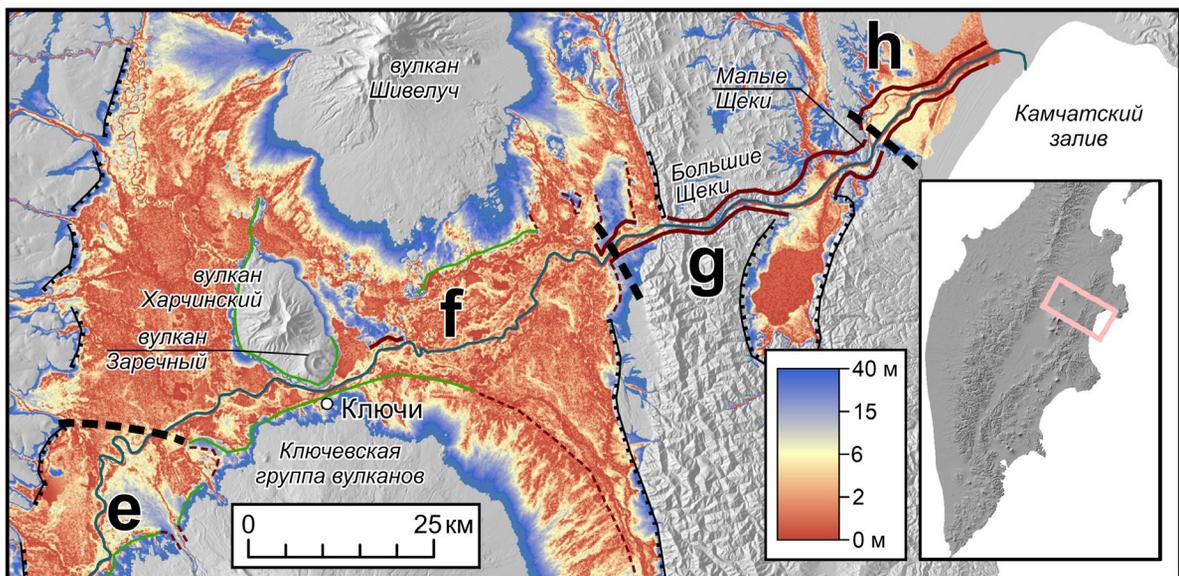


Рис. 4. Строение бассейна нижнего течения р. Камчатка. Пунктирными линиями – границы морфологически различающихся участков долины (e–h). Усл. обозначения см. рис. 2, (a).

Fig. 4. Topography of lower reaches of the Kamchatka River valley. Dashed lines separate valley segments of different morphology (labeled e–h). Other symbols as in fig. 2, (a).

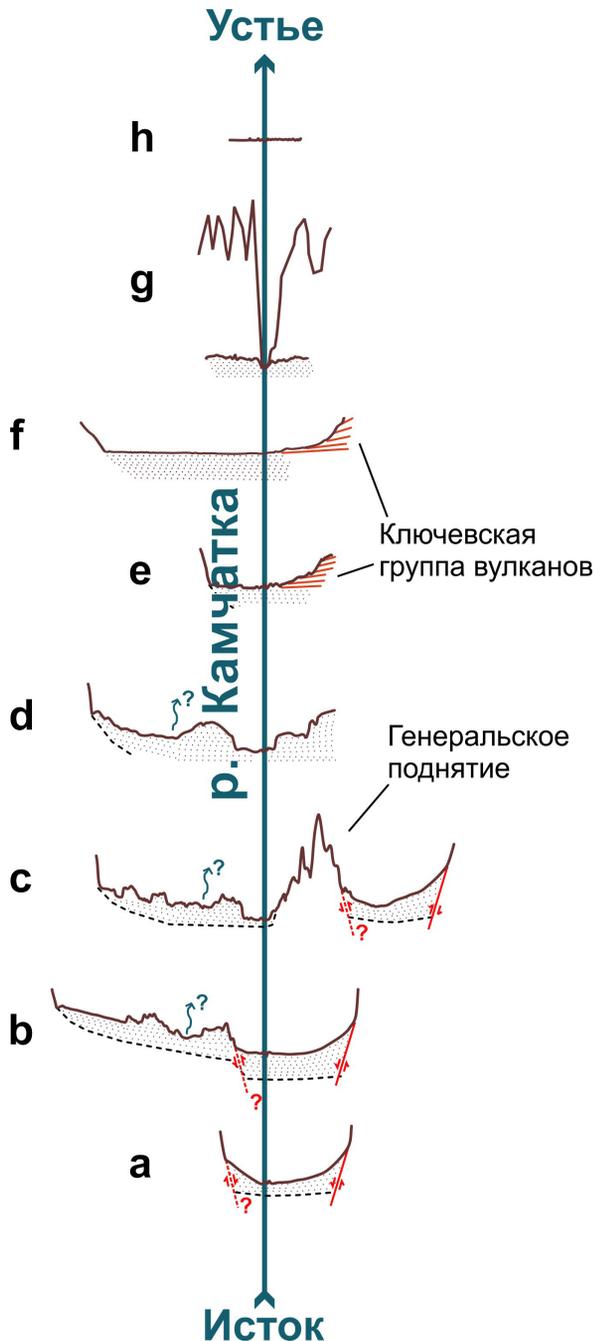


Рис. 5. Схематичные поперечные профили долины р. Камчатки (вертикальный масштаб преувеличен). Красными линиями со стрелками показаны активные разломы, в том числе предполагаемые (пунктирная линия); синими стрелками – возможные брошенные долины; черная пунктирная линия – положение фундамента ЦКД (вне масштаба). Рыхлае заполнение ЦКД показано точками, вулканические отложения – горизонтальной штриховкой.

Fig. 5. Schematic profiles across the Kamchatka River valley (vertical scale exaggerated). Teal arrows show abandoned valleys; red lines – active faults, including inferred (dashed line); black dashed line – basement of the Central Kamchatka Depression (out of scale). Dotted, clastic infill of the CKD; hatched, volcanic rocks.

депрессии (рис. 5), что может быть объяснено тектоническими факторами. Существенная роль Генеральского поднятия в строении долины известна давно, а врезание участка **с** связывалось с его активным ростом (например, Камчатка, Курильские ..., 1974). Однако полученные в настоящем исследовании морфометрические показатели указывают на выработанность продольного профиля участка **с**, тогда как внутри участка **в** отмечаются признаки некомпенсированного прогибания – протяженная область сниженных уклонов и максимальная извилистость меандрирующего русла вплоть до формирования пойменной многорукавности. Эти явления не тяготеют к границе участков **в** и **с**, а на выходе из участка **с** отсутствуют повышенные уклоны, ожидаемые после прохождения руслом активного поднятия. Следовательно, полоса останцов, включающая Генеральское поднятие, является пассивной структурой, обособленной при активном прогибании участка **в**, а граница **в-с**, косо секущая ЦКД, отражает северо-западную границу тектонического прогибания.

Уникальной особенностью участка **е** является выраженная асимметрия – русло максимально смещено на восток, к фронту лав Ключевской группы вулканов. Отсутствие надпойменных террас указывает на интенсивную современную аккумуляцию, которая подтверждает увеличенную скорость прогибания северной части ЦКД, ожидаемую над северным краем зоны субдукции (Schellart et al., 2007, Kozhurin, Zelenin, 2017). Однако это прогибание, по всей видимости, настолько асимметрично, что сток наносов с Ключевской группы вулканов не компенсирует его, и не смещает русло западнее, ближе к оси долины (рис. 5).

Традиционно считается, что порогом стока для всей ЦКД является прохождение долиной реки Камчатки наиболее высокой части хребта Кумроч – урочища Большие Щеки. Однако полученные нами результаты показывают, что данное урочище является наиболее выработанной частью участка **г**. Ранее здесь впервые были описаны сегменты цокольных речных террас высотой до 10 м, сложенные песчано-галечными косослоистыми осадками, перекрытыми горизонтально-слоистыми суглинками с эрозийными границами внутри слоя (Кожурин и др., 2023). Возрастание уклонов русла проявляются не в этом глубоком (свыше 500 м) врезе, а выше по течению, при прохождении рекой позднеплейстоценовой моренной гряды и ниже по течению – в урочище Малые Щеки. Морфология долины позволяет считать, что опускание ЦКД относительно хребта Кумроч (или поднятие хр. Кумроч относительно ЦКД)

не сконцентрировано на фронте горного хребта, а происходит на границах ступеней, разделенных активными разломами, как внутри ЦКД, так и внутри хр. Кумроч. Более того, в недавних исследованиях этой зоны отмечается, что разломы, пересекающие Большие Щеки, имеют преобладающую правосдвиговую (а не сбросовую) компоненту позднечетвертичных движений (Кожурин и др., 2023). Очевидно, что распределение интенсивности вертикальных и горизонтальных движений внутри этой системы активных разломов требует дополнительного изучения.

Наконец, к приустьевому участку **h** приурочена обширная аллювиально-морская равнина, однако на поверхности этой равнины флювиальные формы рельефа развиты только в узкой полосе вдоль русла, а в разрезах вскрываются озерные и лагунные суглинки, а не русловые фации аллювиальных и дельтовых отложений (Пинегина и др., 2014). Это противоречие может быть объяснено тем, что от устья р. Камчатки берет начало Камчатский подводный каньон, который на расстоянии 110 км от берега достигает глубин свыше 6000 м. Н.В. Селиверстов (2013) отмечает, что это один из немногих каньонов Восточной Камчатки, верховья которого достигают глубин 20–30 м и могут питаться обломочным материалом даже в периоды высокого уровня океана, а мощность турбидитовых отложений в его приемном бассейне достигает 1 км. По всей видимости, сток наносов реки Камчатки в значительной мере выносится в этот каньон, не участвуя в осадконакоплении на уровне моря.

Конфигурация долины на разных участках определяется разными факторами и сформировалась в различное время: современный облик аллювиально-морской равнины участка **h** начал формироваться лишь в среднем голоцене, после установления уровня моря близко к современному (Пинегина и др., 2014). Спуск позднеплейстоценового палеозера (Zelenin et al., 2023b) определяет возраст долины около 13 тыс. лет на участках **e–g**, причем на участке **e** более древнее положение долины скорее всего погребено под лавовыми потоками Ключевской группы вулканов – массовых излияний пьедестала Плоских сопок около 30 тыс л. н. (Ponomareva et al., 2021) или под голоценовыми потоками Толбачинского дола (ГИС “Голоценовый вулканизм Камчатки”). Возможно и дальнейшее отодвигание русла на запад будущими лавовыми излияниями. Наиболее древние датировки флювиального рельефа внутри долины приурочены к участку **c**, где для пепла, перекрывающего аллювиальный разрез речной террасы, получена дата 25 тыс. лет (Ponomareva et al.,

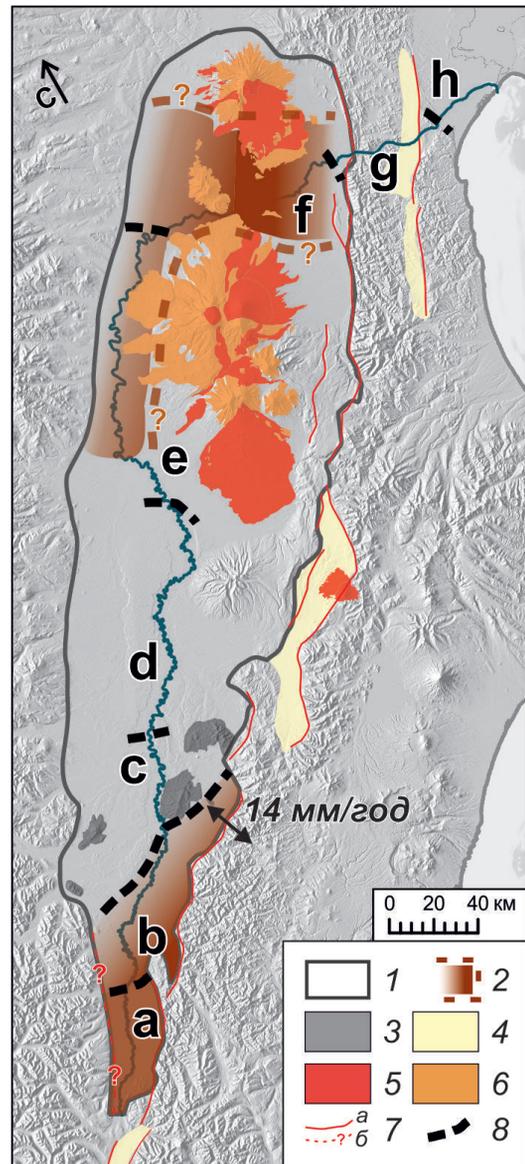


Рис. 6. Неотектоническая схема ЦКД: 1 – Границы ЦКД; 2 – области повышенных скоростей прогибания; 3 – выступы коренного фундамента; 4 – прочие активные грабены (Kozhurin, Zelenin, 2017); 5 – голоценовые, 6 – позднеплейстоценовые; 7 – активные разломы (a – установленные (Kozhurin, Zelenin, 2017), б – предполагаемые); 8 – границы выделенных участков долины. Подписана единственная точка определения скорости растяжения восточного борта ЦКД – 14 мм/год (Kozhurin, Zelenin, 2017).

Fig. 6. Neotectonic scheme of the CKD: 1 – Central Kamchatka Depression; 2 – areas of intensive submergence within the CKD; 3 – bedrock inselbergs within the CKD; 4 – active grabens (Kozhurin, Zelenin, 2017); volcanic deposits (Ponomareva et al., 2007); 5 – Holocene, 6 – Late Pleistocene; 7 – active faults (a – installed (Kozhurin, Zelenin, 2017), б – inferred); 8 – valley segments. Labeled is the only site of estimated rate of extension at the eastern CKD border – 14 mm/yr (Kozhurin, Zelenin, 2017).

2021). Эволюция флювиального рельефа в минимальной степени коснулась участков **a** и **b**, где прямолинейные тектонические борта определяют положение долины со времени заложения ЦКД в плиоцене (Государственная ... 2006). Тем не менее из-за продолжающегося тектонического прогибания и небольшой ширины, долина постоянно заполняется конусами выноса и имеет современный возраст поверхности почти на всем протяжении этих участков.

Несмотря на преобладающий вклад флювиальной аккумуляции в современное осадконакопление ЦКД, унаследованность развития флювиального рельефа проявлена на весьма ограниченных участках долины. Флювиальный рельеф ЦКД неоднократно преобразовывался иными факторами. Деграляция крупных плейстоценовых оледенений (рис. 1, (б)) не могла не приводить к заложению новой речной сети на первичной моренной равнине, тогда как более локальные оледенения и палеозера, отложения которых известны в ЦКД (Брайцева и др., 1968, Куприна, 1970, Ропомарева et al., 2021), воздействовали только на отдельные участки долины. Внутри ЦКД распространены протяженные ложбины, несоразмерные занимающим их водотокам, которые скорее всего являются брошенными долинами р. Камчатки и ее притоков. Для решения вопроса происхождения этих ложбин требуется как характеристика выполняющих их отложений, так и новые датировки. В настоящее время даже для речных террас внутри долины количество известных дат недостаточно для корреляции их между собой и, тем более, для выделения этапов врезания и аккумуляции. В долине р. Камчатки высота террас не может считаться надежным критерием их корреляции в связи с возможными контрастными тектоническими движениями и малой протяженностью их сегментов, нигде не образующих более одного уровня.

Различия в морфологии долины, позволившие выделить обсуждаемые участки, обусловлены почти исключительно эндогенными факторами, как тектоническими, так и вулканическими (рис. 6). В целом особенности строения долины отражают неравномерное прогибание ЦКД, скорость которого превышает скорость адаптации флювиальных процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для бассейна реки Камчатки авторами был рассчитан растр превышения рельефа над речной сетью и основные морфометрические характеристики современного русла р. Камчатки — уклон и коэффициент извилистости. Установлено, что

наиболее общей особенностью долины является ее молодой облик: на всем протяжении долины почти вся она занята современной поймой, а верховьях — активными конусами выноса притоков, спускающихся с горного обрамления ЦКД. Надпойменные террасы имеют малую протяженность и нигде не образуют более одного уровня. Полученные данные позволяют разделить долину р. Камчатки по различиям в ее морфологии и характеристиках русла на восемь участков. Строение долины, состоящее из участков, резко различающихся по морфологии, в первую очередь связано с неравномерным прогибанием ЦКД, скорость которого превышает скорость адаптации флювиальных процессов. Развитие ЦКД могло неоднократно приводить к перестройкам речной сети, поэтому далеко не все осадочное заполнение ЦКД можно напрямую ассоциировать с современной р. Камчаткой. Дальнейшее развитие исследований по этой теме остро нуждается в датировках отложений и форм рельефа.

БЛАГОДАРНОСТИ

Полевые и морфометрические исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-77-10102). Подготовка картографических материалов выполнена за счет государственного задания FMWS-2024-0003 Института географии РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бонк А.А. (2015). Характеристика природных водоемов Камчатки. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, WWF. 52 с.
- Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Евтеева И.С. и др. (1968). Стратиграфия четвертичных отложений и оледенения Камчатки. М.: Наука. 228 с.
- Геосервис “Голоценовый вулканизм Камчатки” [Электронный ресурс]. URL: <http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/geoservices/hvolc.php> (дата обращения: 15.03.2024).
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Корякско-Камчатская. Лист N57. Объяснительная записка. (2006). Под ред. Литвинова А.Ф., Марковского Б.А. СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ. 376 с.
- Ермаков В.А., Милановский Е.Е., Таракановский А.А. (1974). Значение рифтогенеза в формировании вулканических зон Камчатки. *Вестник Моск. ун-та. Сер. 4. Геология*. № 3. С. 3–20.
- Каримов Т.Д., Певзнер М.М., Успенская О.Н. и др. (2020). Высокая пойма р. Камчатка: возраст и особенности формирования отложений. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. №. 3. С. 58–74. <http://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-47-3-58-74>.

- Кожурин А.И., Пинегина Т.К., Пономарева В.В. (2023). Продольные сдвиги в островной дуге при нормальном поддвиге океанической плиты: пример Камчатки. *Тихоокеанская геология*. Т. 42. № 5. С. 92–104. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2023-42-5-92-104>
- Кожурин А.И., Пономарева В.В., Пинегина Т.К. (2008). Активная разломная тектоника юга центральной Камчатки. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. Т. 2. С. 10–27.
- Константиновская Е.А. (2003). Тектоника восточных окраин Азии: структурное развитие и геодинамическое моделирование. М.: Научный мир. 223 с.
- Куксина Л.В. (2018). Сезонная изменчивость расхода и мутности воды на реках Камчатского края. *Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География*. № 4. С. 57–67.
- Куксина Л.В., Алексеевский Н.И. (2016). Особенности пространственно-временной изменчивости водного стока рек Камчатского края. *Водные ресурсы*. Т. 43. № 3. С. 254–264.
- Куксина Л.В., Алексеевский Н.И. (2017). Трансформация стока взвешенных наносов рек Камчатки под воздействием вулканизма. *Вулканология и сейсмология*. № 1. С. 63–74. <https://doi.org/10.7868/s0203030617010035>
- Куприна Н.П. (1970). Стратиграфия и история осадконакопления плейстоценовых отложений Центральной Камчатки. *Труды ГИН АН СССР*. Вып. 216. 148 с.
- Кушев С.Л., Ливеровский Ю.А. (1940). Геоморфологический очерк Центральной Камчатской депрессии. М.: Изд-во АН СССР. 85 с.
- Лебедева Е.В. (2017). Кальдера вулкана Ксудач (Камчатка) современные процессы рельефообразования и особенности строения долинной сети. *Геоморфология*. № 3. С. 60–75. <http://doi.org/10.7868/S0435428117030063>
- Лебедева Е.В., Сугробов В.М., Чижова В.П. и др. (2020). Долина р. Гейзерной (Камчатка): гидротермальная деятельность и особенности рельефообразования. *Геоморфология*. № 2. С. 60–73. <https://doi.org/10.31857/S0435428120020066>
- Лебедева Е.В., Черноморец С.С. (2023). Селевая активность и особенности селефообразования в долине р. Гейзерной (Камчатка). *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. № 3. Вып. 59. С. 5–19. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-3-59-5-19>
- Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Эрлих Э.Н. и др. (1974). Камчатка. Курильские и Командорские острова. М.: Наука. 439 с.
- Опасные русловые процессы и среда обитания лососевых рыб на Камчатке. (2014). Под ред. С.Р. Чалова, В.Н. Лемана, А.С. Чаловой. М.: Изд-во ВНИРО. 240 с.
- Певзнер М.М., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д. (2006). Голоценовые почвенно-пирокластические чехлы в Центральной Камчатской: возраст, строение, особенности осадконакопления. *Вулканология и сейсмология*. № 1. С. 24–38.
- Пинегина Т.К., Кожурин А.И., Пономарева В.В. (2014). Активная тектоника и геоморфология побережья Камчатского залива (Камчатка). *Тихоокеанская геология*. Т. 33. № 1. С. 75–88.
- Пономарева В.В., Горбач Н.В., Зеленин Е.А. (2014). Новые данные о крупномасштабных обрушениях постройки вулкана Шивелуч. В сб.: *Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога “Вулканизм и связанные с ним процессы”*. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. С. 109–114.
- Романова И.М., Зеленин, Е.А., Михайлюкова П.Г. и др. (2015). Геопортал Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН и геосервис “Голоценовый вулканизм Камчатки”. *Геодезия и картография*. № 8. С. 17–23.
- Рычагов Г.И. (2006). Общая геоморфология. М.: Изд-во МГУ. 2006. 416 с.
- Сейнова И.Б., Черноморец С.С., Тутубалина О.В. и др. (2010). Условия формирования селевых потоков в районах активного вулканизма (на примере вулканов Ключевской и Шивелуч, Камчатка). Часть 1. *Криосфера Земли*. Т. 14. № 2. С. 29–45.
- Селиверстов Н.И. (2013). Подводные морфоструктуры Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 162 с.
- Фролова Н.Л., Становова А.В., Горин С.Л. (2014). Режим стока воды в нижнем течении реки Камчатки и его многолетняя изменчивость. *Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана*. Вып. 32. С. 73–78.
- Цуканов Н.В. (1991). Тектоническое развитие приокеанической зоны Камчатки в позднем мезозое—раннем кайнозое. М.: Наука. 104 с.
- Чалов С.Р., Чалова А.С., Школьный Д.И. (2021). Количественная оценка плановых переформирования реки Камчатки. *Известия РАН. Серия географическая*. Т. 85. № 2. С. 218–230. <https://doi.org/10.31857/s2587556621020035>
- Школьный Д.И., Чалов С.Р., Цыпленков А.С. и др. (2017). Опасные проявления русловых процессов на реке Аваче Елизаровского района Камчатского края. *ГеоРиск*. № 3. С. 30–41.
- Avdeiko G.P., Savelyev D.P., Palueva A.A. et al. (2007). Evolution of the Kurile-Kamchatkan Volcanic Arcs and Dynamics of the Kamchatka-Aleutian Junction. *Volcanism and Subduction: the Kamchatka Region, American Geophysical Union Geophysical Monograph*. Series 172. P. 37–55. <https://doi.org/10.1029/172GM04>
- Barr I.D., Solomina O. (2014). Pleistocene and Holocene glacier fluctuations upon the Kamchatka peninsula. *Global and Planetary Changes*. V. 113. P. 110–120. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.08.005>
- Belousov A., Belousova M., Voight B. (1999). Multiple edifice failures, debris avalanches and associated eruptions in the Holocene history of Shiveluch volcano, Kamchatka, Russia. *Bull. Volcanol.* V. 61. P. 324–342.
- Kozhurin A., Acocella V., Kyle P.R. et al. (2006). Trenching studies of active faults in Kamchatka, Eastern Russia: Palaeoseismic, tectonic and hazard implications. *Tectonophysics*. V. 417. P. 285–304. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.01.004>

- Kozhurin A., Zelenin E. (2017). An extending island arc: the case of Kamchatka. *Tectonophysics*. V. 706. P. 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.04.001>
- Kozhurin A.I., Pinegina T.K., Ponomareva V.V. (2023). Arc-parallel strike-slip faulting in an island arc under arc-normal subduction: The case of Kamchatka. *Russian J. of Pacific Geology*. V. 17. № 5. P. 489–500. <http://dx.doi.org/10.1134/S1819714023050044>
- Lander A.V., Shapiro M.N. (2007). The Origin of the Modern Kamchatka Subduction Zone. *Volcanism and Subduction: the Kamchatka Region, Geophysical Monograph Series*. V. 172. P. 57–64. <https://doi.org/10.1029/172GM05>
- Ponomareva V., Pendea I.F., Zelenin E. et al. (2021). The first continuous late Pleistocene tephra record from Kamchatka Peninsula (NW Pacific) and its volcanological and paleogeographic implications. *Quat. Sci. Rev.* V. 257. 106838.
- Ponomareva V.V., Churikova T., Melekestsev I.V. et al. (2007). Late Pleistocene-Holocene Volcanism on the Kamchatka Peninsula, Northwest Pacific Region. *Volcanism and Subduction: the Kamchatka Region, American Geophysical Union Geophysical Monograph Series* 172. P. 165–198.
- Salaorni E., Stoffel M., Tutubalina O. et al. (2017). Dendrogeomorphic reconstruction of lahar activity and triggers: Shiveluch volcano, Kamchatka Peninsula, Russia. *Bull. Volcanol.* V. 79. № 1. P. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s00445-016-1094-4>
- Schellart W.P., Freeman J., Stegman D.R. et al. (2007). Evolution and diversity of subduction zones controlled by slab width. *Nature*. V. 446. № 7133. P. 308–311. <https://doi.org/10.1038/nature05615>
- Zelenin E., Gurinov A., Garipova S. et al. (2023). Geomorphology of the Central Kamchatka Depression, the Kamchatka Peninsula, NE Pacific. *J. of Maps*. V. 19. № 1. P. 1–10. <https://doi.org/10.1080/17445647.2023.2252006>
- Zelenin E.A., Gurinov A. L., Zakharov A. L. et al. (2023b). Geomorphological processes in the Central Kamchatka Depression (The Kamchatka Peninsula, NE Pacific) during the last 30 Ka. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. V. 54. № 4. P. 226–237. <https://doi.org/10.31857/S2949178923040175>

EXPRESSION OF ACTIVE TECTONICS IN MORPHOLOGY OF A RIVER VALLEY (AN EXAMPLE OF THE KAMCHATKA RIVER VALLEY)¹

E. A. Zelenin^{a,#}, M. N. Kiryakova^b, E. O. Mukhametshina^c, and A. L. Zakharov^c

^aGeological Institute RAS, Moscow, Russia

^bLomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

^cInstitute of Geography RAS, Moscow, Russia

[#]E-mail: egorzelenin@mail.ru

The Kamchatka River is the largest river of the Kamchatka Peninsula. The area of the Kamchatka River basin makes it one of the largest that emerged above the subduction zone. The peninsula is located in a temperate maritime climate, which favors intensive fluvial processes, especially for the largest river system of the peninsula. The study of fluvial processes within the Kamchatka River basin is based mainly on the publications of the mid-XX century. Recently dated deposits and remote sensing data permits us to identify the spatial distribution of the factors affecting the Kamchatka River valley topography.

For this study, the relative elevation model and the main morphometric characteristics of the Kamchatka River - the stream gradient and the tortuosity ratio - have been calculated. Changes in the morphology of the valley and in the characteristics of its modern channel allow us to distinguish eight segments of the Kamchatka River valley. The contrast topography of the Kamchatka River valley, is caused by a non-uniform submergence of the CKD with rates exceeding those of fluvial processes.

Keywords: river valley, morphometric analysis, neotectonic deformations, active continental margin

ACKNOWLEDGMENTS

Field and morphometric studies were carried out under a grant from the Russian Science Foundation (Project № 21-77-10102). Preparation of cartographic materials was carried out at the expense of the state task FMWS-2024-0003 of the Institute of Geography RAS.

REFERENCES

- Avdeiko G.P., Savelyev D.P., Palueva A.A. et al. (2007). Evolution of the Kurile-Kamchatkan Volcanic Arcs and Dynamics of the Kamchatka-Aleutian Junction. *Volcanism and Subduction: the Kamchatka Region, American Geophysical Union Geophysical Monograph Series* 172. P. 37–55. <https://doi.org/10.1029/172GM04>

¹For citation: Zelenin E.A., Kiryakova M.N., Mukhametshina E.O., Zakharov A.L. (2023). Expression of active tectonics in morphology of a river valley (an example of the Kamchatka River valley). *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. V. 55. № 3. P. 109–122. <https://doi.org/10.31857/S2949178924030062>; <https://elibrary.ru/PLOXSZ>

- Barr I.D., Solomina O. (2014). Pleistocene and Holocene glacier fluctuations upon the Kamchatka peninsula. *Global and Planetary Changes*. V. 113. P. 110–120. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.08.005>
- Belousov A., Belousova M., Voight B. (1999). Multiple edifice failures, debris avalanches and associated eruptions in the Holocene history of Shiveluch volcano, Kamchatka, Russia. *Bull. Volcanol.* V. 61. P. 324–342.
- Bonk A.A. (2015). Kharakteristika presnovodnykh vodoemov Kamchatki (Characteristics of freshwater reservoirs of Kamchatka). Petropavlovsk-Kamchatsky: KamchatGTU, WWF (Publ.). 52 p. (in Russ.).
- Braitseva O.A., Melekeshev I.V., Evteeva I.S. et al. (1968). Stratigrafiya chetvertichnykh otlozhenii i oledeniya Kamchatki (Stratigraphy of Quaternary deposits and glaciation of Kamchatka). Moscow: Nauka (Publ.). 228 p. (in Russ.).
- Chalov S.R., Chalova A.S., Shkolnyi D.I. (2021). Quantitative Assessment of Channel Planform Changes of the Kamchatka River. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*. V. 85. № 2. P. 218–230. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/s2587556621020035>
- Chalov S.R., Leman V.N., Chalova A.S. (Eds.). (2014). Opasnye ruslovye protsessy i sreda obitaniya lososevykh ryb na Kamchatke (Dangerous riverbed processes and the habitat of salmon fish in Kamchatka). Moscow: VNIRO (Publ.). 240 p. (in Russ.).
- Ermakov V.A., Milanovskij E.E., Tarakanovskij A.A. (1974). The importance of rifting in the formation of Kamchatka volcanic zones. *Vestnik Mosk. Un-ta. Seriya 4. Geologiya*. № 3. P. 3–20. (in Russ.).
- Frolova N.L., Stanovova A.V., Gorin S.L. (2014). Hydrological regime of the Kamchatka River in the lower reaches and its long-term variability. *Issledovaniya vodnykh biologicheskikh resursov Kamchatki i Severo-Zapadnoi chasti Tikhogo okeana*. Iss. 32. P. 73–78. (in Russ.).
- Geoservice “Holocene Volcanism of Kamchatka” [Electronic data]. Access way: <http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/geoservices/hvolc.php> (access date: 15.03.2024)
- Karimov T.D., Pevzner M.M., Uspenskaya O.N. et al. (2020). Floodplain of Kamchatka River: Age and specific of formation of sediments. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*. № 3. P. 58–74. (in Russ.). <http://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-47-3-58-74>
- Konstantinovskaya E.A. (2003). Tektonika vostochnykh okrain Azii: strukturnoe razvitie i geodinamicheskoe modelirovanie (Tectonics of the Eastern Margins of Asia: Structural Development and Geodynamic Modeling). Moscow: Scientific World (Publ.). 223 p. (in Russ.).
- Kozhurin A., Acocella V., Kyle P.R. et al. (2006). Trenching studies of active faults in Kamchatka, Eastern Russia: Palaeoseismic, tectonic and hazard implications. *Tectonophysics*. V. 417. P. 285–304. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.01.004>
- Kozhurin A., Zelenin E. (2017). An extending island arc: the case of Kamchatka. *Tectonophysics*. V. 706. P. 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.04.001>
- Kozhurin A.I., Pinegina T.K., Ponomareva V.V. (2023). Arc-parallel strike-slip faulting in an island arc under arc-normal subduction: The case of Kamchatka. *Russian J. of Pacific Geology*. V. 17. № 5. P. 489–500. <http://dx.doi.org/10.1134/S1819714023050044>
- Kozhurin A.I., Ponomareva V.V., Pinegina T.K. (2008). Active faulting in the south of Central Kamchatka. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*. V. 2. P. 10–27. (in Russ.).
- Kuksina L.V. (2018). Seasonal variability of water discharge and suspended sediment concentration for rivers of the Kamchatka krai. *Vestnik Mosk. Un-ta. Seriya 5. Geografiya*. № 4. P. 57–67. (in Russ.).
- Kuksina L.V., Alekseevskii N.I. (2016). Space and time variations of the runoff of Kamchatka Krai rivers. *Water Resources*. V. 43. P. 438–447. <https://doi.org/10.1134/S0097807816030106>
- Kuksina L.V., Alekseevskij N.I. (2017). The transformation of the runoff of the suspended load in Kamchatkan rivers due to volcanism. *Vulkanologiya i seismologiya*. № 1. P. 63–74. (in Russ.). <https://doi.org/10.7868/s0203030617010035>
- Kuprina N.P. (1970). Stratigrafiya i istoriya osadkonakopleniya pleistotsenovykh otlozhenii Central’noi Kamchatki (Stratigraphy and sedimentation history of Pleistocene deposits of Central Kamchatka). *Trudy GIN AN SSSR*. V. 216. 148 p. (in Russ.).
- Kushev S.L., Liverovsky Y.A. (1940). Geomorfologicheskii ocherk Tsentral’noi Kamchatskoi depressii (Geomorphological article of the central Kamchatka depression). Moscow: AN USSR (Publ.). 85 p. (in Russ.).
- Lander A.V., Shapiro M.N. (2007). The Origin of the Modern Kamchatka Subduction Zone. *Volcanism and Subduction: the Kamchatka Region, Geophysical Monograph Series*. V. 172. P. 57–64. <https://doi.org/10.1029/172GM05>
- Lebedeva E.V. (2017). Caldera Ksudach (Kamchatka): modern processes of relief forming and main features of the valley network structure. *Geomorfologiya*. № 3. P. 60–75. (in Russ.). <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2017-3-60-75>
- Lebedeva E.V., Chernomorets S.S. (2023). Debris flow activity and specificity of debris flow formation in the Geysernaya river valley (Kamchatka). *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*. № 3. V. 59. P. 5–19. (in Russ.). <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-3-59-5-19>
- Lebedeva E.V., Sugrobov V.M., Chizhova V.P. et al. (2020). The valley of the River Geysernaya (Kamchatka): hydrothermal activity and features of relief forming. *Geomorfologiya*. № 2. P. 60–73. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0435428120020066>
- Litvinov A.F., Markovskiy B.A. (Eds.). (2006). Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Mashtab 1:1 000 000 (tret’e pokolenie). Seriya Koryaksko-Kamchatskaya. List N57. Ob’yasnitel’naya zapiska (State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1 000 000 (Third generation). The Koryak-Kamchatka series. Sheet N57. An explanatory note. Saint Petersburg: SPB kartfabriki VSEGEI (Publ.). 376 p. (in Russ.).
- Melekestsev I.V., Braitseva O.A., Erlich E.N. et al. (1974). Kamchatka, Kuril’skie i Komandorskie ostrova (Kamchatka, Kurilski and Komandorski Islands). Moscow: Nauka (Publ.). 439 p. (in Russ.).

- Pevzner M.M., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D. (2006). Holocene soil-pyroclastic covers in the Central Kamchatka Depression: age, composition, features of sedimentation. *Vulkanologiya i seismologiya*. № 1. P. 24–38. (in Russ.)
- Pinegina T.K., Kozhurin A.I., Ponomareva V.V. (2014). Active Tectonics and Geomorphology of the Kamchatsky Bay Coast in Kamchatka. *Tikhookeanskaya geologiya*. V. 33. № 1. P. 75–88. (in Russ.)
- Ponomareva V., Gorbach N., Zelenin E. (2014). New data on large-scale collapses of Shiveluch volcano edifice. In: *Materialy ezhegodnoi konferentsii, posvyashchennoi Dnyu vulkanologa "Vulkanizm i svyazannyye s nim protsessy"*. Petropavlovsk-Kamchatskii: IViS DVO RAN (Publ.). P. 109–114. (in Russ.)
- Ponomareva V., Pendea I.F., Zelenin E. et al. (2021). The first continuous late Pleistocene tephra record from Kamchatka Peninsula (NW Pacific) and its volcanological and paleogeographic implications. *Quat. Sci. Rev.* V. 257. 106838.
- Ponomareva V.V., Churikova T., Melekestsev I.V. et al. (2007). Late Pleistocene-Holocene Volcanism on the Kamchatka Peninsula, Northwest Pacific Region. *Volcanism and Subduction: the Kamchatka Region, American Geophysical Union Geophysical Monograph*. Series 172. P. 165–198.
- Romanova I.M., Zelenin E.A., Mikhaylyukova P.G. et al. (2015). Geoportal of the Institute of Volcanology and Seismology, RAS and geoservice "Holocene volcanism of Kamchatka". *Geodeziya i kartografiya*. № 8. P. 17–23. (in Russ.)
- Rychagov G.I. (2006). *Obshchaya geomorfologiya (General geomorphology)*. Moscow: Moscow State University. 416 p. (in Russ.)
- Salaorni E., Stoffel M., Tutubalina O. et al. (2017). Dendrogeomorphic reconstruction of lahar activity and triggers: Shiveluch volcano, Kamchatka Peninsula, Russia. *Bull. Volcanol.* V. 79. № 1. P. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s00445-016-1094-4>
- Schellart W.P., Freeman J., Stegman D.R. et al. (2007). Evolution and diversity of subduction zones controlled by slab width. *Nature*. V. 446. № 7133. P. 308–311. <https://doi.org/10.1038/nature05615>
- Seliverstov N.I. (2013). *Podvodnye morfostruktury Kurilo-Kamchatskoi i Aleutskoi ostrovnykh dug (Subaqueous Morphostructures of Kuril-Kamchatka and Aleutian Island Arcs)*. Petropavlovsk-Kamchatskii: IVS FEB RAS (Publ.). 162 p. (in Russ.)
- Seynova I.B., Chernomorets S.S., Tutubalina O.V. et al. (2010). Debris flow formation in areas of active volcanism (case study of Kluchevskoy and Shiveluch volcanoes, Kamchatka). Part 1. *Earth's Cryosphere*. V. 14. № 2. P. 29–45. (in Russ.)
- Shkolnyi D.I., Chalov S.R., Tsyplenkov A.S. et al. (2017). Hazardous manifestations of channel processes on the Avacha river (Yelizovsky district, Kamchatka krai). *GeoRisk*. № 3. P. 30–41. (in Russ.)
- Tsukanov N.V. (1991). *Tektonicheskoe razvitie priokeanicheskoi zony Kamchatki v pozdnem mezozoe–rannem kainozoe (Tectonic development of the Kamchatka Oceanic zone in the Late Mesozoic–Early Cenozoic)*. Moscow: Nauka (Publ.). 104 p. (in Russ.)
- Zelenin E., Gurinov A., Garipova S. et al. (2023). Geomorphology of the Central Kamchatka Depression, the Kamchatka Peninsula, NE Pacific. *J. of Maps*. V. 19. № 1. P. 1–10. <https://doi.org/10.1080/17445647.2023.2252006>
- Zelenin E.A., Gurinov A. L., Zakharov A. L. et al. (2023b). Geomorphological processes in the Central Kamchatka Depression (The Kamchatka Peninsula, NE Pacific) during the last 30 Ka. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. V. 54. № 4. P. 226–237. <https://doi.org/10.31857/S2949178923040175>