

УДК 551.4.012

## СПОСОБ КОРЕГИСТРАЦИИ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ВЫСОТ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИ КОРРЕКТНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ<sup>#</sup>

© 2023 г. С. В. Харченко<sup>1,2,\*</sup><sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия<sup>2</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

\*E-mail: xar4enkkoff@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.05.2022 г.

После доработки 01.11.2022 г.

Принята к публикации 22.12.2022 г.

При создании цифровых моделей высот по данным аэрофотосъемки с БПЛА для их применения в численном моделировании (гидрологическом, эрозионном и др.) возникает проблема корегистрации данных отдельных съемок, которые могут быть произведены в разное время суток, сезоны или даже годы, что затрудняет пространственную привязку данных. Существующие алгоритмы корегистрации обычно осуществляют статистическую подгонку облаков точек или растровых моделей. Такой подход нарушает гидрологическую корректность итоговых данных – возникают артефакты вроде различных уступов и швов. Предлагаемый подход базируется на поиске изолинии “нулевой ошибки” высот, по которой и происходит сшивка отдельных сцен съемки. Поиск этой линии осуществляется как по немодифицированным моделям высот, так и при разделении их на “ведущую” и “ведомые”; последние подвергаются геометрической коррекции. Как критерии качества слияния моделей высот использованы: 1) статистические распределения крутизны (коэффициент ранговой корреляции на ведущей и ведомой моделях), т.е. параметра, влияющего на результаты моделирования стока воды, наносов, устойчивости склонов и т.д., 2) мера постоянства геометрической структуры микроводосборов. Алгоритм апробирован на трех участках, расположенных в равнинных, низкорослых и среднегорных условиях. Во всех примерах показана высокая эффективность методики – по линиям швов полностью отсутствуют артефакты корегистрации. При этом методика построена таким образом, что геометрическая модификация ведомых моделей высот не приводит к существенному искажению их морфологии – средняя крутизна в подавляющем числе случаев не отклоняется более чем на 1° в сравнении с исходными данными, ранговая корреляция крутизны (отвечающая постоянству ее пространственного распределения) меняется в разных случаях в интервале 0.9–0.99 (при среднем значении 0.96), коэффициенты геометрического сходства сеток микроводосборов на объединенных моделях высот показывают во всех случаях даже большие значения (1.09), нежели на исходных данных без какой-либо коррекции (0.98) в областях их взаимного перекрытия.

**Ключевые слова:** беспилотные летательные аппараты, цифровая модель высот, морфометрический анализ рельефа, водосбор, крутизна поверхности

DOI: 10.31857/S2949178923030039, EDN: VSPGKZ

### ВВЕДЕНИЕ

Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для получения цифровых моделей высот и проведения по ним последующих морфометрического анализа рельефа и гидрогеоморфологического моделирования – один из но-

вых стандартов геоморфологических исследований (Hackney, Clayton, 2015; Gafurov, 2021; Śledź et al., 2021). В то же время нерешенными (по крайней мере, без гарантированно рабочего решения) остаются многочисленные технические сложности использования разновременных данных с БПЛА (Kaiser et al., 2018; James et al., 2019), в числе которых неточность привязки в плане и по высоте получаемых данных, различия в освещенности поверхности (Leitão et al., 2016; Revuelto et al., 2021), плотности крон деревьев и травянистой растительности в разные сезоны года, из-

<sup>#</sup> Ссылка для цитирования: Харченко С.В. (2023). Способ корегистрации цифровых моделей высот для получения гидрологически корректного представления земной поверхности // Геоморфология и палеогеография. Т. 54. № 3. С. 150–154. <https://doi.org/10.31857/S2949178923030039>; <https://elibrary.ru/VSPGKZ>

менения цветовой палитры поверхности. Если съемка интересующей поверхности проводится в разное время суток, года или, тем более, в разные годы, корректная стыковка данных в трехмерном пространстве становится затруднительной. Эта же проблема возникает даже в условиях обработки по частям большого массива фотоизображений, полученных в одинаковых условиях. Точная корегистрация данных не всегда возможна даже при абсолютной привязке съемки с использованием наземных геодезических измерений с субсантиметровой погрешностью. Речь идет, разумеется, об области пересечения двух моделей высот в пределах выпуклых оболочек размещения “твердых точек”, использованных для их привязки. При обрезке совмещаемых друг с другом цифровых моделей рельефа (ЦМР) по контуру точек их пространственной привязки — точное соответствие высот (в пределах погрешности метода привязки) возможно лишь в непосредственной окрестности маркера — твердой точки (“ground control point”). В то же время на границах участка, на линиях, соединяющих ближайшие маркеры, — возникают ложные уступы, перепады высот из-за недостаточной густоты этих маркеров. Такие уступы, высотой часто в десятки см, протягиваются вдоль полосы сочленения двух моделей высот и в неудачных случаях могут полностью исказить результаты моделирования стока воды и наносов, очень чувствительных к микроморфологии незамкнутых линейных понижений на ЦМР.

На текущий момент в публикациях, посвященных цифровому представлению рельефа земной поверхности, существует некоторое терминологическое несоответствие. Так, в англоязычной литературе принято разделять понятия “digital terrain model” / DTM и “digital surface model” / DSM, понимая под ними, соответственно, цифровую модель собственно рельефа — границы раздела литосферы с атмосферой и гидросферой или же модель рельефа интегральной поверхности земной тверди и объектов на ней (растительности, строений и т.д.). В этом смысле предлагаемый в настоящей работе алгоритм может быть применен как к DTM, так и к DSM (получаемым без специальной очистки при обработке данных БПЛА). В ряде публикаций отечественных авторов часто встречается использование “калек” с англоязычных терминов, что не общепринято (хотя интуитивно понятно) — т.е. когда ведется речь о модели высот, извлекаемой автоматическим путем из серии аэрофотоснимков, зачастую говорят о “цифровой модели местности” как аналоге DSM. В то же время в русскоязычной картографической терминологии (согласно ГОСТ 28441-99 “Картография цифровая. Термины и определения”) есть три самостоятельных понятия: цифровая модель местности, цифровая модель объектов

местности и цифровая модель рельефа, содержательно включающая англоязычные DTM и DSM. Первые две — такой тип цифровых моделей, которые содержат информацию об объектах местности (преимущественно, “топографической ситуации”), причем второй — категорически без информации о рельефе. Не критикуя ни один из терминологических подходов, в данной работе мы используем термин ЦМР в определении по ГОСТ, в значении как DTM, так и DSM.

Термин “корегистрация” в отношении ЦМР определяется как (Li et al., 2017) процесс трансформации входной ЦМР таким образом, чтобы обеспечить наилучшее (в соответствии с выбранным критерием качества) пространственное ее соответствие с референсной моделью высот во всех пикселях их области пересечения. В строгом смысле, предлагаемый нами алгоритм обеспечивает наилучшее совмещение двух моделей высот по линии их стыка и частично не подпадает под формальное определение корегистрации. Однако, как представляется, необходимость максимального совмещения ЦМР по площади (с возникновением артефактов в виде ступеней по швам) или же, напротив, точного совмещения по линии шва — определяется задачей исследования, и оба подхода являются разными видами корегистрации.

Существует ряд алгоритмов, нацеленных на решение подобных задач, но без акцента на гидрологическую корректность итоговой ЦМР. Под гидрологически корректной ЦМР, вслед за рядом других авторов (Woodrow et al., 2016), понимаем таким образом обработанную модель рельефа, что направления линий тока, восстанавливаемые по ней, отвечают объективному, имеющемуся на местности, их рисунку. В работах (Debella-Gilo M. and Kääb, 2011; Nuth C. and Kääb, 2011) рассматривается оригинальный алгоритм высокоточной корегистрации моделей высот для целей оценки динамики ледников в районах горных и покровных оледенений. Он основан на трехэтапном совмещении моделей высот: 1) устранение планового сдвига, 2) точное устранение систематической разности высот, как правило, связанной с источником данных для ЦМР (радиолокация, оптическая съемка) и характеристикой съемки (углы обзора, направление пролета, плотность трасс и т.д.), 3) устранение по возможности высокочастотного шума, связанного с “дрожанием сенсора”. Авторами заявляется, что алгоритм эффективно решает задачу корегистрации для территорий сильно расчлененного рельефа и, напротив, для условий “спокойного” рельефа. В конечном счете, для корегистрации вычисляются сдвиги по трем осям одной ЦМР относительно другой по трем осям, без искажений длин и направлений в исходных данных.

Существуют подходы (Niitsuma and Maruyama, 2010), где аналогичные поправки рассчитываются по критерию поиска локального минимума для суммы модуля разности высот (sum of absolute differences) в области пересечения двух моделей высот. Так как попиксельный сдвиг одной из них относительно другой — при условии повторения процедуры огромное число раз — может требовать значительного вычислительного времени, обычно используется итеративное совмещение, все более точное и с меньшим допустимым сдвигом по всем осям на каждой итерации.

В работе (Psarakis and Evangelidis, 2005) реализован отчасти похожий подход, однако в качестве меры схожести “пространственного рисунка” распределения высот используются корреляционные коэффициенты для распределений выборок из ЦМР. Последние два подхода также учитывают только взаимный сдвиг двух моделей, без попытки деформировать одну из них.

Более сложная методика предложена в (Beyer, Alexandrov, Moratto, 2014), где алгоритм корегистрации основан на “итеративном алгоритме ближайших точек” (Zhengyou, 1994), предполагающая при совмещении возможность изменения генеральных черт формы поверхности (сжатие, растяжение), вращение и сдвиг. Критерий оценки качества совмещения — наименьшая сумма квадратов расстояний между двумя наборами пикселей.

Несколько из указанных алгоритмов реализованы на базе единой утилиты для сшивки ЦММ и ЦМР — demcoreg (Shean et al., 2016), библиотеке языка Python.

Новизна предлагаемого нами алгоритма состоит в: 1) гидрологической корректности итоговых ЦМР в контексте отсутствия ложных уступов по швам моделей, чего не дают вышеперечисленные методы, 2) использовании нестатистического подхода к корегистрации моделей высот (т.е. не основанного на минимизации метрики ошибки в целом по площади и выборе в каждом пикселе области пересечения двух или более ЦМР какого-то наиболее вероятного значения высоты), 3) реализации алгоритма на языке R (R Core Team, 2021), наиболее простом и широко распространенном в задачах анализа данных, в том числе пространственных. Помимо прочего, время выполнения расчетов при работе созданного алгоритма и перечисленных выше альтернатив на одних и тех же ЦМР сильно отличается; для методов Niitsuma и Psarakis продолжительность расчетовкратно больше, иногда даже приходится приводить ЦМР к меньшему разрешению для получения результата в допустимое время. Эти же методы, а также метод Nuth, при отсутствии в рельефе выраженного рисунка расчленения (например, междуречья со слабо выраженным ри-

сунком ложбинного расчленения, как в бассейне р. Протвы, — см. ниже в данной работе) могут не находить корректные значения оптимального сдвига одной ЦМР относительно другой. Эта ситуация возникает, когда дисперсия высот, отвечающая локальной топографической шероховатости, сопоставима с общим небольшим перепадом высот на участке.

Зачастую требуется использовать ЦМР из двух или более фрагментов для проведения гидрологического или эрозионного моделирования на водосборах, которые невозможно принципиально или не удалось покрыть одной съемкой. При этом не столь важна абсолютная точность высотных отметок в итоговой ЦМР, сколь корректное положение водоразделов и тальвегов, отсутствие ложных уступов, замкнутых понижений и т.д. — конкретно на решение подобных задач, в отличие от аналогичных методов, направлен предлагаемый в данной работе способ. Таким образом, данная статья содержит описание и результаты апробации алгоритма взаимной корегистрации двух (а итеративно — и большего числа) цифровых моделей высот с сохранением корректной конфигурации структурных линий микроводосборов.

## МЕТОДИКА

Базовая идея, лежащая в основе алгоритма, состоит в том, что между любой парой перекрывающихся по площади ЦМР можно определить величину разности высоты (не константную по площади, в противном случае вся корегистрация двух ЦМР сводилась бы к введению одной поправки). На растровой модели пространственного распределения ошибки можно провести бесконечное число изолиний равных значений разности высот. Если обрезать каждую из ЦМР по той или иной изолинии, затем в одну из ЦМР ввести поправку по высоте, равную значению разности высот по этой изолинии, то обе поверхности удастся сшить друг с другом без малейших ложных уступов по всей длине линии. При попытке реализации этого возникают 2 основные ошибки: 1) изолиния той или иного значения ошибки высот ЦМР может свои крайние точки иметь в центральной части одной из ЦМР, а не в точках пересечения границ обеих моделей, это не позволяет устранить ложные уступы по всей длине границы моделей высот; 2) изолинии величин ошибок, имеющие сложную форму, могут не полностью оказываться в области перекрытия двух моделей высот, разбиваться на фрагменты, что затрудняет корректную сшивку данных.

Нужно подчеркнуть, что алгоритм нацелен на создание гидрологически корректно сшитой ЦМР, что производится отчасти в ущерб абсолютной ее точности. В связи с этим в качестве критерия корректности построения итоговой мо-

дели взяты однородность распределения крутизны поверхности и степень близости конфигурации сетки микро-водосборов, выделяемых по шитой ЦМР и по исходным данным или какому-то другому эталону. Если с распределением крутизны все однозначно (приближение значений крутизны на полученной ЦМР к некоторому “эталону” — контрольной модели высот или реальным их значениям на местности — обеспечивает воспроизводимость результатов моделирования стока воды и наносов, без соблюдения формы и значений распределения крутизны получение корректного результата при использовании этих методов невозможно), то стандартной метрики сходства двух полигональных сеток в общем виде не существует. Существует методика (Hargrove, 2006), направленная на установление степени сходства двух наборов площадных категориальных данных, однако ее особенности заключаются, во-первых, в том, что входными данными принимаются векторы точечных значений категорий (например, индексы водосборов), а не полигональные водосборы напрямую, а во-вторых, она не учитывает разброс степени близости полигонов в двух сетках (т.е. случай с полным совпадением части полигонов и полным несовпадением другой части будет характеризоваться таким же значением меры близости, как и частичное совпадение всего набора данных). По этим причинам была реализована собственная метрика, также описанная в настоящей работе.

Алгоритм подгонки в первом приближении обрабатывает 2 перекрывающихся ЦМР, но в случае трех или более фрагментов — возможна итеративная корегистрация. Из пары моделей высот та, которая остается неизменной, по тексту статьи названа “ведущей”, а корректируемая модель высот — названа “ведомой”.

Технически алгоритм включает следующие этапы.

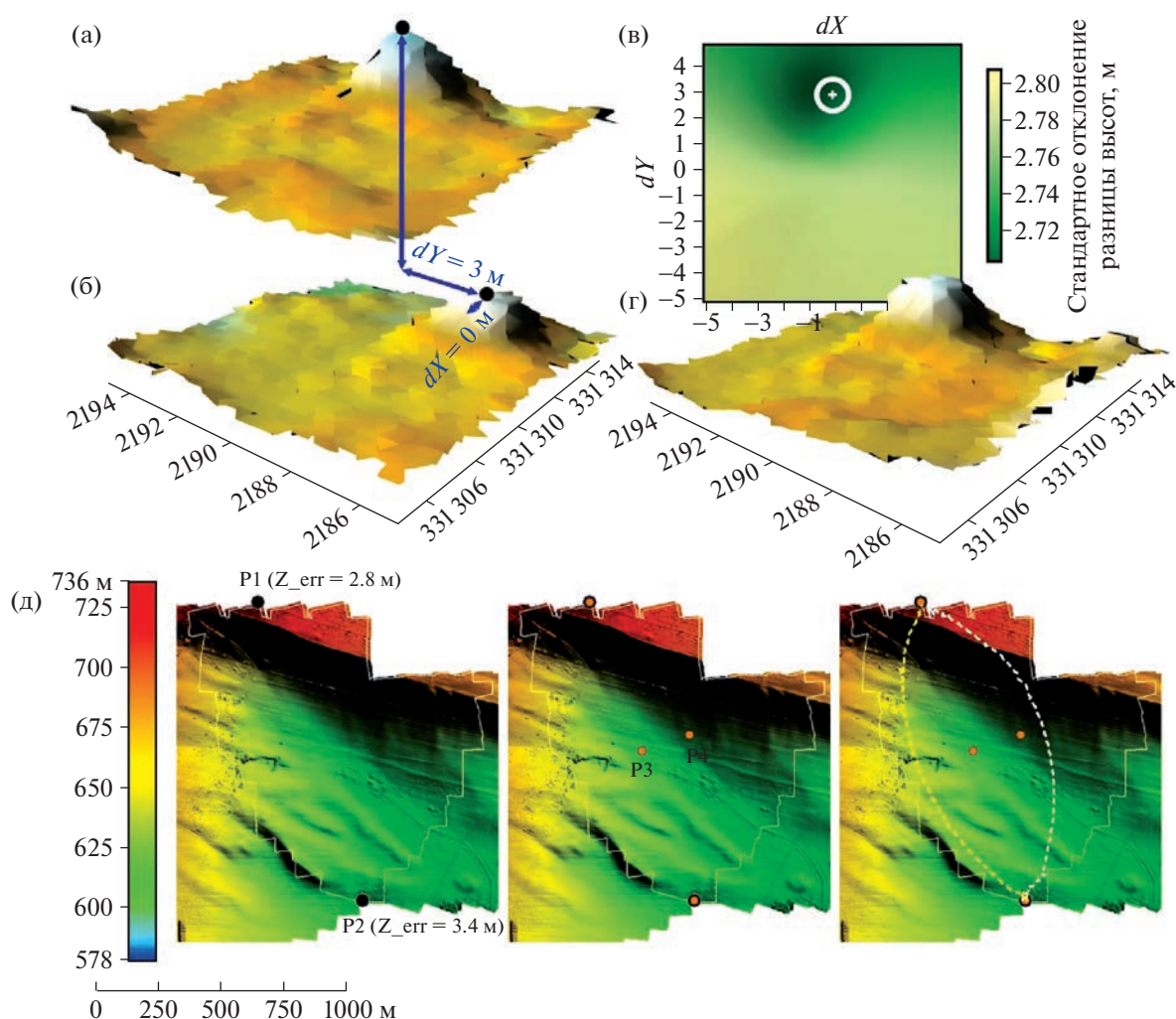
Совмещение 2 ЦМР по их положению в плане. Осуществляется путем простого сдвига по X и Y при условии минимизации стандартного отклонения разности высот. Такой критерий позволяет сопоставить между собой морфологически схожие площадки вне зависимости от их различий по абсолютной высоте. На рис. 1 показано смещение одной поверхности относительно другой при условии минимизации среднеквадратического (стандартного) отклонения высоты. Для осуществления данного этапа в области перекрытия двух ЦМР выбирается участок с отступом W м внутрь данной области (внутренний буфер), чтобы минимизировать эффект ошибок, возникающих в краевых зонах отдельных съемочных сцен, для которых строится модель высот. Такие ошибки возникают по причине низкой плотности аэрофотоснимков на краях сцены. Затем две модели

высот в границах выбранного буфера двигаются друг относительно друга вдоль осей X и Y на величины, кратные величине ячейки исходных ЦМР, и рассчитывается стандартное отклонение разности высот. Величины сдвига, при которых достигается минимум этого параметра, — признаются оптимальными. В дальнейшем работа производится с уже скорректированной на плановый сдвиг моделью высот.

Нахождение краевых точек пересечения границ двух ЦМР производится построением векторных границ каждой модели и извлечения из них общих точек (точки P1 и P2 на рис. 1, д), исходные разницы высот в них на двух ЦМР — 2.7 и 3.2 м). Эти точки и линия между ними создают базис, относительно которого ведомая ЦМР будет корректироваться для точной сшивки с ведущей моделью. В двух краевых точках ошибка высот между двумя моделями всегда будет неодинакова. Для построения на следующих этапах изолинии нулевой ошибки, замыкающейся на краевых точках, требуется преобразовать ведомую ЦМР таким образом, что разницы высоты в краевых точках совпали. Для этого рассчитывается двухмерный линейный тренд ошибки, нарастающий или убывающий по линии между краевыми точками, после чего цифровая модель этого тренда вычитается из ведомой ЦМР. После этого привязка моделей высот в двух точках завершена.

В области перекрытия моделей высот от одной краевой точки до другой можно провести изолинию нулевой ошибки, в случае если таковая линия нигде не выходит за пределы этой области. Зачастую изолиния нулевой ошибки оказывается фрагментирована, так как выходит за границы участка перекрытия, затем снова в ней появляется и т.д. В этом случае требуется искусственно создать более интенсивный градиент разности высот на двух ЦМР, наклонив одну из них, используя в качестве оси вращения линию между краевыми точками. В результате увеличения градиента ошибки в обе стороны от этой линии, изолиния нулевой ошибки приближается к ней. Требуется выбрать такой градиент, чтобы изолиния нулевой ошибки поместилась полностью или почти полностью внутри области перекрытия ЦМР. В результате образуется наклоненная модель, морфометрические характеристики которой, в частности, крутизна поверхности, оказываются сильно искаженными. Для балансировки этого эффекта необходимо повторить процедуру с обратным наклоном ведомой ЦМР на такую же величину, а результирующую ЦМР получить усреднением обеих (или большего числа, если использовать несколько симметричных их пар).

На рис. 1, д) ведомая ЦМР (восточная) по линии между точками P1 и P2 совмещена с ведущей ЦМР (западной). По этой линии устранен линейный тренд ошибки, нарастающий с севера на юг



**Рис. 1.** (а, б) – фрагменты разных цифровых моделей высот одной территории со взаимным сдвигом ( $dX$ ,  $dY$ ) в силу неточного GPS-позиционирования БПЛА; (в) – модель ошибки при разных сдвигах по X и Y, минимальная ошибка (показана меткой) достигается при сдвиге  $dX = 0$  м и  $dY = 3$  м; (г) – скорректированная модель высот с изображения 1(б); (д) – структурные точки и линии преобразования ведомой ЦМР, линия P1-P2 – для устранения линейного тренда разницы высот, линия p3-p4 – для вращения ведомой модели.

**Fig. 1.** (a, б) – Parts of the different digital terrain models at the same area with a shift ( $dX$ ,  $dY$ ) related with inaccurate GPS-positioning of a UAV; (в) – vertical error model at the different shifts by X and Y axes, the minimum value (white circle) estimated with the shift  $dX = 0$  m and  $dY = 3$  m; (г) – rectified terrain model from the 1(б) figure; (д) – the structural points and lines of slaved DEM processing, line P1-P2 for linear detrending of slaved DEM, the line p3-p4 for rotation of slaved DEM.

от 2.8 до 3.2 м. Параллельным переносом поправка на величину разности высот применяется для всей ведомой модели (вектор параллельного переноса ошибки показан точками p3 и p4, линия между ними – плечо вращения ведомой ЦМР относительно ведущей на следующем этапе). В точках P1 и P2 разность высот нулевая, между ними можно провести линию с таким же значением разности. Если эта линия “нулевой ошибки” или точнее нулевой разности выходит за пределы области пересечения двух ЦМР – вращаем по вертикали ведомую ЦМР, используя плечо вращения на угол  $\pm \alpha$  так, чтобы линия нулевой ошибки поместилась внутри области пересечения.

На рис. 1, (д) таких линий две (желтый и белый пунктиры при наклоне моделей высот на  $\pm 5$  м при длине плеча 200 м, т.е. при наклоне  $\pm 2.5\%$ ), отвечающих симметричным направлениям вращения. Для обоих преобразований (а лучше – для большего числа вращений на разные углы для получения более гладкого результата) сшиваем ведущую ЦМР и ведомые, а затем вычисляем среднее значение из всех растров – это и будет итоговая модель высот.

Процедура предполагает участие пользователя на этапах выбора рабочей директории и файлов моделей высот, пространственного разрешения итоговой модели, ввода градиента наклона ведомой

ЦМР. Прочие редактируемые параметры имеют значения по умолчанию (например, глубины буфера в области наложения ЦМР, используемого как выборка для подгонки данных в плане, и др.).

### ОЦЕНКА КАЧЕСТВА

Метриками качества корегистрации ЦМР и ЦММ традиционно являются величины ошибок привязки, например, среднеквадратическое отклонение высот привязанной модели относительно эталона (ведущей модели, наземных геодезических измерений или др.). При этом на процедуру привязки не накладывается требование гладкости поверхности и сохранения исходной структуры потоков (талвегов) и водоразделов. Качество построения гидрологически корректной поверхности в этой работе оценим следующим образом.

Во-первых, должно сохраняться исходное статистическое распределение крутизны поверхности. Проведение различных манипуляций с ведомой (ведомыми) моделями высот может приводить к завышению или занижению крутизны, что соответствующим образом скажется на моделировании параметров стока воды или наносов. Значения крутизны поверхности в разных структурных частях и на разных высотных уровнях в пределах водосбора оказывают решающее воздействие на результаты эрозионного моделирования с помощью широко распространенной модели USLE (и ее модификаций), расчеты связности потоков наносов (различные индексы *sediment connectivity*) и т.д.

Во-вторых, преобразование ведомых моделей для бесшовного соединения ее с ведущей не должно принципиальным образом менять пространственную структуру водосборов. Нами разработана собственная метрика качества, основанная на анализе постоянства структуры водосборов на объединенной модели высот и ее отдельных частях, полученных непосредственно фотограмметрическим путем из снимков с беспилотных летательных аппаратов. Разумеется, ошибочно утверждать, что отдельные части исходной ЦМР можно рассматривать в качестве некоторого эталона, с которым затем сравнивается результат — единая на весь интересующий участок модель высот. К сожалению, полноценного подобного эталона — модели высот, по которой восстанавливается корректная, объективная сетка водосборов — в наличии обычно не оказывается. В то же время, если сравнивать сетки водосборов, реконструированные из исходных данных в области перекрытия двух сцен, — в идеальном случае они должны совпадать, но никогда не совпадают в точности. Если по единой ЦМР сетка водосборов восстанавливается с большей степенью подобия каждой отдельной модели, нежели отдельные мо-

дели между собой — можно признать, что результирующее поле высот, ее каркас переданы корректно. Так или иначе, подход к сравнению ЦМР и ЦММ, основанный на различиях гидро-морфологических расчетных величин, использовался разными авторами ранее (например, Walker and Willgoose, 1999; Kenward et al., 2000). В отдельных работах даже сама конфигурация сети стока (в частности, центроиды водосборов, использованы для корегистрации ЦМР (Li, Deng, Wang, 2017). Но обычно используются сравнения статических распределений (например, распределений площадей микроводосборов), а не метрики для оценки геометрического подобия каркасных линий рельефа.

Методика расчета меры сходства состоит в следующем. При одинаковых параметрах расчета (разрешение, максимальная глубина заполняемых локальных понижений, минимальная площадь водосбора) реконструируются сетки водосборов на отдельных сценах ЦМР и на сшитой модели. Парно сетки водосборов накладываются друг на друга, и вычленяется результат их пересечения. Если пара наборов данных с  $M$  объектами в первом и  $N$  объектами во втором абсолютно идентична — то каждому  $1, \dots, i$ -му объекту из первого набора будет строго соответствовать по площади один и только один  $1, \dots, j$ -й объект из второго. Но так как реальные сетки водосборов, получаемые из данных аэрофотосъемки на одну и ту же территорию, всегда немного отличаются — каждому водосбору в первом наборе данных будут соответствовать отдельные фрагменты или даже целые водосборы меньшей площади из другого набора данных. Верно и обратное — отдельно взятую контуру из второго набора данных будут соответствовать фрагменты контуров из первого набора. При небольших различиях между двумя наборами — отдельно взятый полигон  $M_i$  будет в основном перекрываться полигоном  $N_j$  и лишь незначительно другими полигонами.

В результате пересечения двух сеток водосборов из  $M$  и  $N$  объектов каждая — получаем таблицу площадей из пересечений с размерностью  $M$  строк и  $N$  столбцов. После чего рассчитываем относительные значения площадей в каждой строке. Отношение доли площади  $M_i$  полигона, перекрываемого  $N_j$  полигоном (т.е. наибольшим в границах  $M_i$  полигона), к общей площади  $M_i$  полигона — есть мера сходства формы двух водосборов. Потенциально этот параметр заключен для каждого  $M_i$  полигона в интервале от 0 до 1, на практике он чаще всего принимает значения от 0.3–0.5 до 1. Так как возможна ситуация, что все контуры водосборов в сетке № 1 попадут в единственный контур в сетке № 2, необходима перекрестная проверка на предмет того, что водосборы в сетке № 2 также приурочены преимущественно к конкретным контурам в сетке № 1, а не

распределены случайно по площади. То есть для перекрестной проверки рассчитываем относительные значения площадей еще и в каждом столбце. Итоговое значение меры близости для каждого объекта в сетке № 1 получаем как евклидову дистанцию между каждой парой наиболее полно перекрывающихся контуров в двух сетках.

Формальным образом алгоритм представим в следующем виде. Путем пространственного наложения двух сеток получаем матрицу площадей (1).

$$\begin{array}{ccccc}
 & 1 & 2 & \dots & N \\
 1 & S_{1,1} & S_{1,2} & S_{1,\dots} & S_{1,N} \\
 2 & S_{2,1} & S_{2,2} & S_{2,\dots} & S_{2,N} \\
 \dots & S_{\dots,1} & S_{\dots,2} & S_{\dots,\dots} & S_{\dots,N} \\
 M & S_{M,1} & S_{M,2} & S_{M,\dots} & S_{M,N}
 \end{array} \quad (1)$$

Делим величину площади в каждой ячейке на сумму площадей в каждой строке (т.е. на площади первого, второго, ...,  $M$ -го объектов в сетке № 1), затем повторяем процедуру для сумм площадей в столбцах (т.е. делим площадь каждого пересечения на площади первого, второго, ...,  $N$ -го объектов в сетке № 2). Получаем две матрицы  $MX1$  и  $MX2$  размерностью  $M \times N$  каждая, над которыми затем проводим матричную операцию вычисления дистанции между соответствующими парами ячеек (2):

$$MX_{\text{result}} = (MX1^{0.2} + MX2^{0.2})^{0.5} \quad (2)$$

Подчеркнем, что речь идет о поэлементном возведении в квадрат каждой из матриц и затем поэлементном же суммировании и извлечении корня, а не о стандартной процедуре умножения матриц, требующей их согласованности (равенства числа столбцов первой матрицы числу строк второй). Такие операции (а именно поэлементное возведение матриц в степень и извлечение корня) называются операциями Адамара (соответственно, произведением Адамара и корнем Адамара) и, как один из вариантов, обозначаются символом “ $\circ$ ”.

При абсолютном совпадении двух сеток, в каждой строке и каждом столбце итоговой матрицы будет лишь по одному ненулевому значению (например, на главной диагонали, но не обязательно). Затем для каждой строки итоговой матрицы находится максимальное значение, а для всей матрицы — среднее из строковых максимумов. Эта мера (3) и будет степенью сходства рисунка полигонов —  $MaxOL$ . В то же время некоторые полигоны могут совпадать в точности, а другие — лишь незначительно. Поэтому в каждой строке итоговой матрицы вычисляется еще и мера разброса совпадения полигонов (4).

$$MaxOL = \sum_{i=1}^M \max(MX\_result_{i,.}) \quad (3)$$

$$SdOL = \sum_{i=1}^M sd(MX\_result_{i,.}) \quad (4)$$

Итоговая мера близости может меняться в пределах  $(0; \sqrt{2})$ , крайний правый случай достигается при полном морфологическом сходстве двух контуров. Случайные пересечения контуров без явно выраженной пространственной корреляции дают значения около 0.5–0.7.

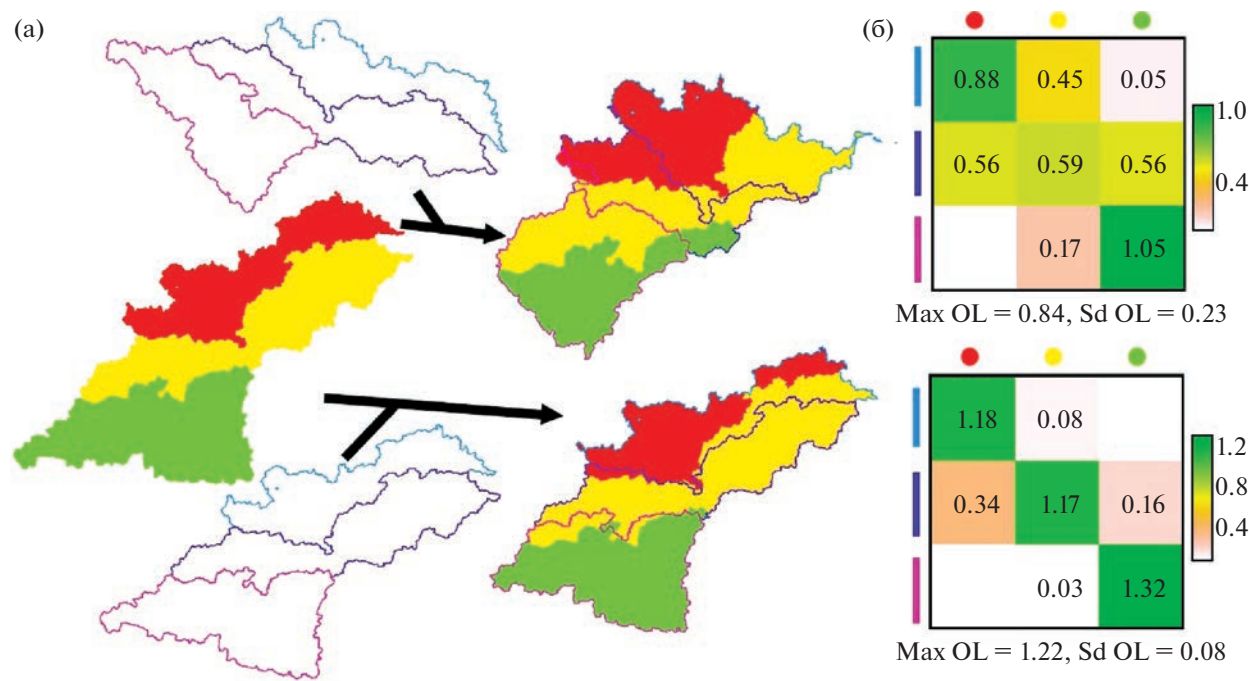
В качестве примеров приведены расчеты мер близости двух сеток полигонов — 1) эталона и его же, повернутого на  $45^\circ$  по направлению хода стрелок часов, и 2) эталона и его же, повернутого на  $10^\circ$  в том же направлении (рис. 2). Очевидно, во втором случае степень сходства контуров двух сеток больше. Промежуточные значения относительных площадей контуров одной из сеток внутри контуров другой приведены в табл. 1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Алгоритм был протестирован на трех различных участках, описание их приведено в табл. 2. Все они расположены в различных геоморфологических условиях, характеризуются принципиально разными морфометрическими параметрами. Первый расположен в равнинных условиях в пределах центра Восточно-Европейской равнины, два другие — в предгорьях-низкогорьях и среднегорьях Центрального Кавказа.

**Участок № 1.** Междуречье рр. Протвы и Исьмы. Площадка находится в северной части Калужской области (центр участка —  $55.218^\circ$  с.ш.,  $36.3484^\circ$  в.д.), неподалеку от границы с Московской областью, частично на левом борту долины р. Протвы и лежащем севернее фрагменте междуречья, в 1–1.5 км к северо-западу от учебно-научной базы МГУ “Сатино”. Большая часть площади участка — пологоволнистая поверхность вторичной моренной равнины, северный край — склон долины р. Исьмы (покрыт лесом), юго-восточный край — склон долины р. Протвы. Участок вытянут примерно на 800 м с запада на восток и на 1150 м с севера на юг, общая площадь не превышает 1 км<sup>2</sup>. За вычетом крон деревьев, отражаемых на ЦМР, абсолютные высоты на участке составляют примерно 160–187 м. В качестве ведущей ЦМР избран северный фрагмент территории, ведомой — южный (рис. 3). В принципе, при связке двух фрагментов моделей высот, избранные роли для каждой из них — не принципиальны. Средняя начальная ошибка высот в области перекрытия составляет  $-0.24 \pm 4.3$  м, при этом положительные и отрицательные ошибки по площади распределены почти равномерно. Высоты ложных уступов на стыках ЦМР достигают 6–7 м.

В качестве критерия точности корегистрации моделей высот использована мера геометриче-



**Рис. 2.** Способ оценки меры близости двух сетей водоразделов. (а) – цветная заливка – сетка № 1, цветные контуры – два варианта сетки № 2. (б) – Max OL (Overlay) – средние значения максимальных относительных площадей для каждого из полигонов эталона (цветная заливка), Sd OL – разброс максимальных относительных площадей для них же.

**Fig. 2.** The way to estimate of the similarity value for two watershed networks. (а) – colour filling – network No. 1, colour contours – two versions of the network No. 2. (б) – Max Overlay – average values of maximum relative areas for each polygon in the network No. 1. Sd Overlay – variance of these maximum relative areas.

ской близости сетей локальных водосборов на исходных и преобразованных данных (описана выше), а также коэффициент ранговой корреляции Спирмана для крутизны поверхности в этих случаях. Первый критерий обусловлен самой постановкой задачи – предлагаемый способ корегис-

трации не сохраняет в точности отметки высот привязываемых ЦМР, но должен позволять корректно восстанавливать геометрическую структуру сети транзита воды и наносов. Второй критерий – требование к постоянству пространственного распределения относительных значений крутизны

**Таблица 1.** Относительные площади полигонов сетки № 1 (цветовая заливка, по строкам) и сетки № 2 (цветные контуры, по столбцам)

**Table 1.** Relative areas for networks No. 1 (colour filling, by rows) and No. 2 (colour contour, by columns)

|                 | 1 (гол.) | 2 (син.) | 3 (фиол.) | Сумма |
|-----------------|----------|----------|-----------|-------|
| <b>1 (кр.)</b>  | 0.68     | 0.28     | 0.04      | 1     |
| <b>2 (ор.)</b>  | 0.35     | 0.28     | 0.37      | 1     |
| <b>3 (зел.)</b> | 0        | 0.12     | 0.88      | 1     |

|                 | 1 (гол.) | 2 (син.) | 3 (фиол.) | Сумма |
|-----------------|----------|----------|-----------|-------|
| <b>1 (кр.)</b>  | 0.94     | 0.06     | 0         | 1     |
| <b>2 (ор.)</b>  | 0.19     | 0.7      | 0.1       | 1     |
| <b>3 (зел.)</b> | 0        | 0.02     | 0.98      | 1     |

|          | 1 (гол.) | 2 (син.) | 3 (фиол.) | Сумма |
|----------|----------|----------|-----------|-------|
| 1 (кр.)  | 0.56     | 0.35     | 0.03      | 1     |
| 2 (ор.)  | 0.44     | 0.52     | 0.41      | 1     |
| 3 (зел.) | 0        | 0.12     | 0.56      | 1     |
| Сумма    | 1        | 1        | 1         | 1     |

|       | 1    | 2    | 3    | Сумма |
|-------|------|------|------|-------|
| 1     | 0.72 | 0.04 | 0    | 1     |
| 2     | 0.28 | 0.94 | 0.12 | 1     |
| 3     | 0    | 0.02 | 0.88 | 1     |
| Сумма | 1    | 1    | 1    | 1     |

*Примечание.* Жирным выделены полигоны, которые разбиваются полигонами другого слоя. То есть левые таблицы – разбивка сетки № 1 сеткой № 2, правые таблицы – наоборот.

**Таблица 2.** Характеристика участков апробации алгоритма корегистрации ЦМР  
**Table 2.** Characteristics of test sites used for DTM co-registration algorithms testing

| Участок                                                   | Площадь, км <sup>2</sup> | Кол-во сцен | Высота, м* | Крутизна, град.** |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------|-------------|------------|-------------------|
| Междуречье рр. Протвы и Исьмы (Калужская область)         | 0.78                     | 2           | 160–187    | $3.4 \pm 1.2$     |
| Верховья водосбора пруда Песковский (Ставропольский край) | 4.05                     | 3           | 588–731    | $6 \pm 2.2$       |
| Водосбор пруда Гитче-Гижгит (Кабардино-Балкария)          | 1.92                     | 2           | 1183–1843  | $26.7 \pm 6.5$    |

*Примечание.* \* – 95% амплитуды высот (для устранения локальных выбросов); \*\* – среднее значение  $\pm$  половина межквартильного размаха ( $0.5 \times \text{IQR}$ ), т.е. меры разброса числовой величины между квартилями – 25% и 75%.

(больше-меньше) – обусловлен тем, что по получаемой сшитой ЦМР при проведении гидрологического или эрозионного моделирования распределение крутизны будет отвечать результату. Иными словами, если для точной сшивки без ложных уступов требуется значительно зависеть или занизить уклоны – это сводит на нет всю формальную “гидрологическую корректность” модели высот.

Коэффициент линейной корреляции крутизны на исходных ЦМР и итоговой – 0.97, что говорит о почти полной неизменности распределения наклона поверхности. Мера сходства сеток водосборов, получаемых из двух исходных моделей (ведущей и ведомой),  $-0.89 \pm 0.21$ . В то же время мера сходства итоговой ЦМР с ведущей –  $0.99 \pm 0.26$ , а с ведомой –  $1.08 \pm 0.2$ . Иными словами, даже несмотря на то, что краевые части обоих исходных ЦМР построены по одним и тем же снимкам, подобие сеток в итоговой модели и в исходных оказывается выше, нежели в двух исходных между собой (рис. 4).

*Участок № 2.* Водосбор пруда Песковский. Территория расположена в Ставропольском крае (центр участка –  $43.965^\circ$  с.ш.,  $43.035^\circ$  в.д.), примерно в 3 км к югу от г. Пятигорск. Водосбор ограничен вершинами одиночных гор-лакколитов, в частности, г. Джуца 1-я (Юца) и г. Золотой Курган. В северо-западной части водосбора пруда Песковский, верхние части которого расположены на склонах Юцы, отснят участок общей площадью около 4 км<sup>2</sup> (рис. 5). Максимальная протяженность с запада на восток – 3 км, с севера на юг – 2.6 км. В качестве ведущей ЦМР взята центральная – склоны Юцы, в качестве ведомых – примыкающие к ней с юга и востока сцены. Для первой ошибка высотной привязки составила  $-1.63 \pm 1.82$  м, на пятой части площади перекрытия отрицательная ошибка (т.е. ведущая ЦМР оказывается мнимо выше ведомой), на четырех пятых частях площади – положительная ошибка (ведущая ЦМР оказывается ниже ведомой). Таким образом, возникает эффект ложной ступени (возвышающейся преграды) при движе-

нии вниз по склонам горы к ее подножию и обе части водосбора гидрологически оказываются не связаны. Средние высоты локальных “уступов”, обусловленные неточной привязкой ЦМР из-за погрешности GPS БПЛА, составляют 2–3 м. Для примыкающей восточной сцены ошибки высотной привязки не меньше, они составляют по всей площади перекрытия сцен  $-2.17 \pm 1.92$  м. Из них отрицательные ошибки – на седьмой части области перекрытия, положительные – на шести седьмых. Таким образом, и здесь наблюдается мнимая возвышающаяся преграда для стока.

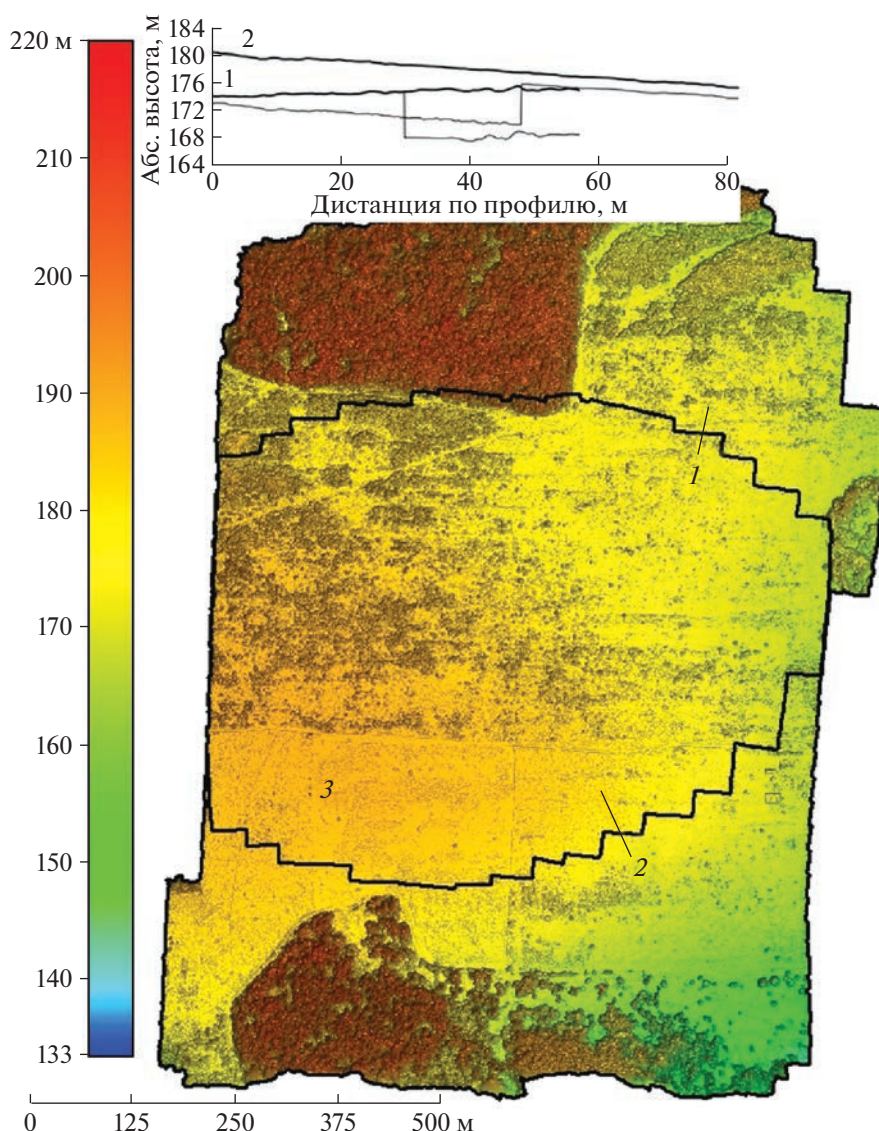
Результаты оценки качества корегистрации трех цифровых моделей местности приведены в табл. 3. Расхождения среднего значения крутизны поверхности в областях пересечения различных моделей меняются от 0 до  $0.8^\circ$ , при этом во всех случаях величины крутизны на исходных моделях высот равны или несколько выше, чем на итоговой. Максимальное значение разности средней крутизны при этом характерно для центральной сцены – склонов г. Юца, что может показаться странным, с учетом того, что эта модель высот использовалась в качестве ведущей и, таким обра-

**Таблица 3.** Средние значения крутизны и сходство рисунка микроводосборов в областях пересечения исходных и результирующей моделей высот

**Table 3.** Average slope gradient values and the measure of microcatchments spatial patterns in the overlapping areas of original and final DTMs

|              | “Центр”                    | “Юг”            | “Восток”        |
|--------------|----------------------------|-----------------|-----------------|
|              | Крутизна, град.            |                 |                 |
| Исходные ЦМР | 10.47                      | 8.5             | 9.55            |
| Результат    | 9.63                       | 8.52            | 8.92            |
|              | Сходство водосборов, коэф. |                 |                 |
| Результат    | $1.04 \pm 0.25$            | $1.03 \pm 0.22$ | $1.17 \pm 0.22$ |
| “Юг”         | $0.99 \pm 0.18$ *          |                 |                 |
| “Восток”     | $0.98 \pm 0.21$ **         |                 |                 |

*Примечание.* \* – область 5 на рис. 5; \*\* – область 6 на рис. 5.



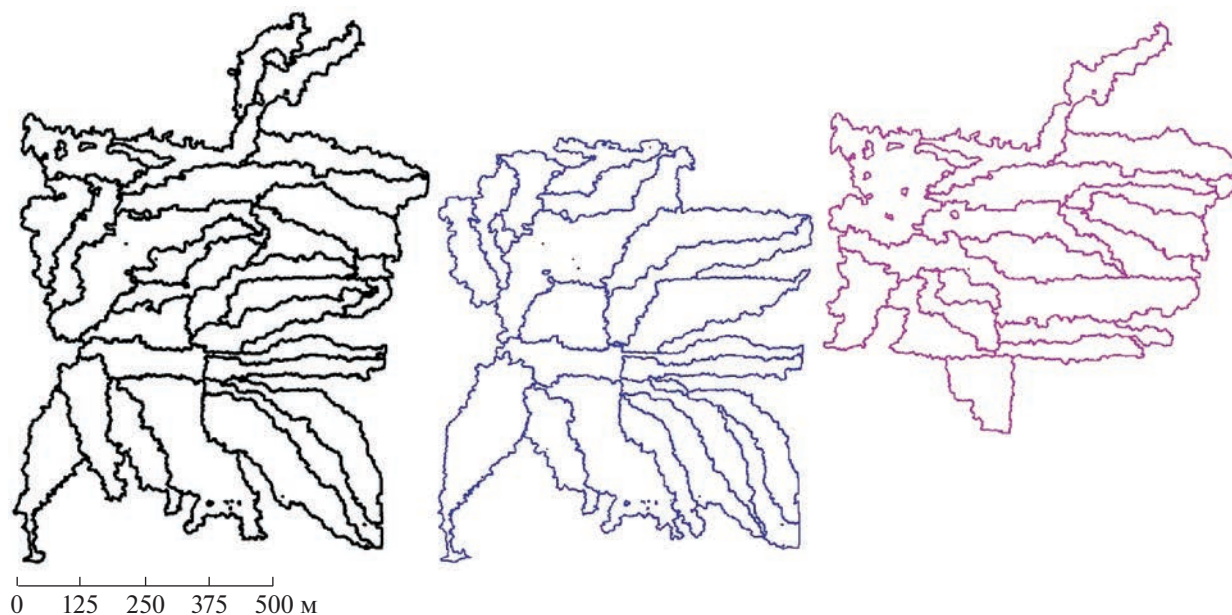
**Рис. 3.** Рельеф участка № 1 “Междуречье рр. Протвы и Исьмы” и области покрытия исходными ЦМР. 1–2 – положение контрольных топографических профилей, 3 – область перекрытия двух сцен.

**Fig. 3.** Topography of site No. 1 “Interfluvium of Protva and Is'ma rivers” and original DTMs coverages. 1–2 – the control topographic profiles position, 3 – area of overlapping for two DTMs.

зом, не трансформировалась. Проверка причин данного явления показывает, что наибольшие разности крутизны в области центральной сцены характерны для краевой зоны ведущей ЦМР с присутствием артефактов, в результате наличия которых крутизна завышается примерно на  $35^\circ$ . На всей остальной площади ранговая корреляция крутизны на парах моделей значительно выше: у итоговой с ведущей сценой – 0.902, с южной ведомой – 0.972, а с восточной ведомой – 0.969. Меры сходства сеток водосборов, реконструируемых по итоговой ЦМР и отдельным исходным моделям, выше единицы во всех трех случаях, в то время как показатели меры сходства для областей пересечения ведущей (“Центр”) и двух ведомых ЦМР (“Юг” и “Восток”) – несколько ниже. Та-

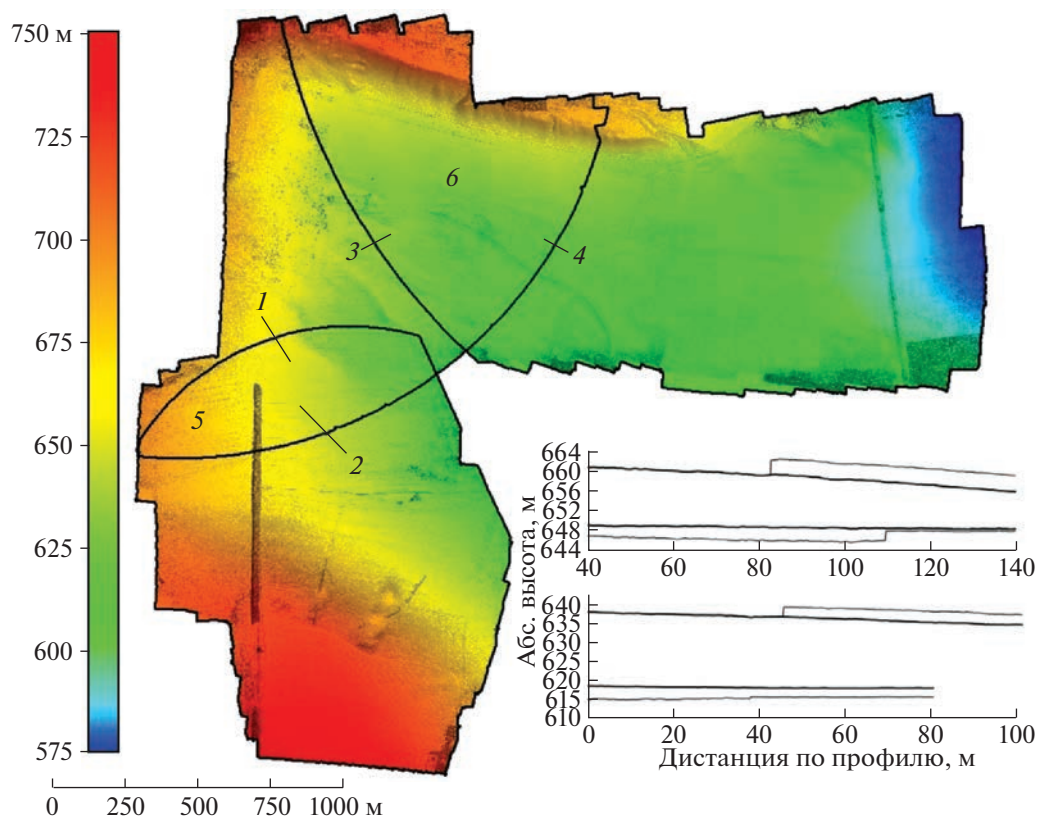
ким образом, корегистрация ведомых моделей с ведущей не ухудшает корректность трассировки водоразделов относительно исходных данных.

**Участок № 3.** Водосбор пруда Гитче-Гижгит. Расположен в Республике Кабардино-Балкария (центр участка –  $43.469^\circ$  с.ш.,  $43.0^\circ$  в.д.) на р. Гижгит – левом притоке р. Баксан. На этой малой реке расположено два пруда-отстойника отходов деятельности Тырныаузского горно-металлургического комбината. В орографическом отношении участок приурочен к южному склону Скалистого хребта Большого Кавказа. Участок вытянут субмеридионально, его максимальная протяженность с севера на юг 2.2 км, с запада на восток 1.3 км, общая площадь 1.9 км<sup>2</sup>. Рельеф сильнорас-



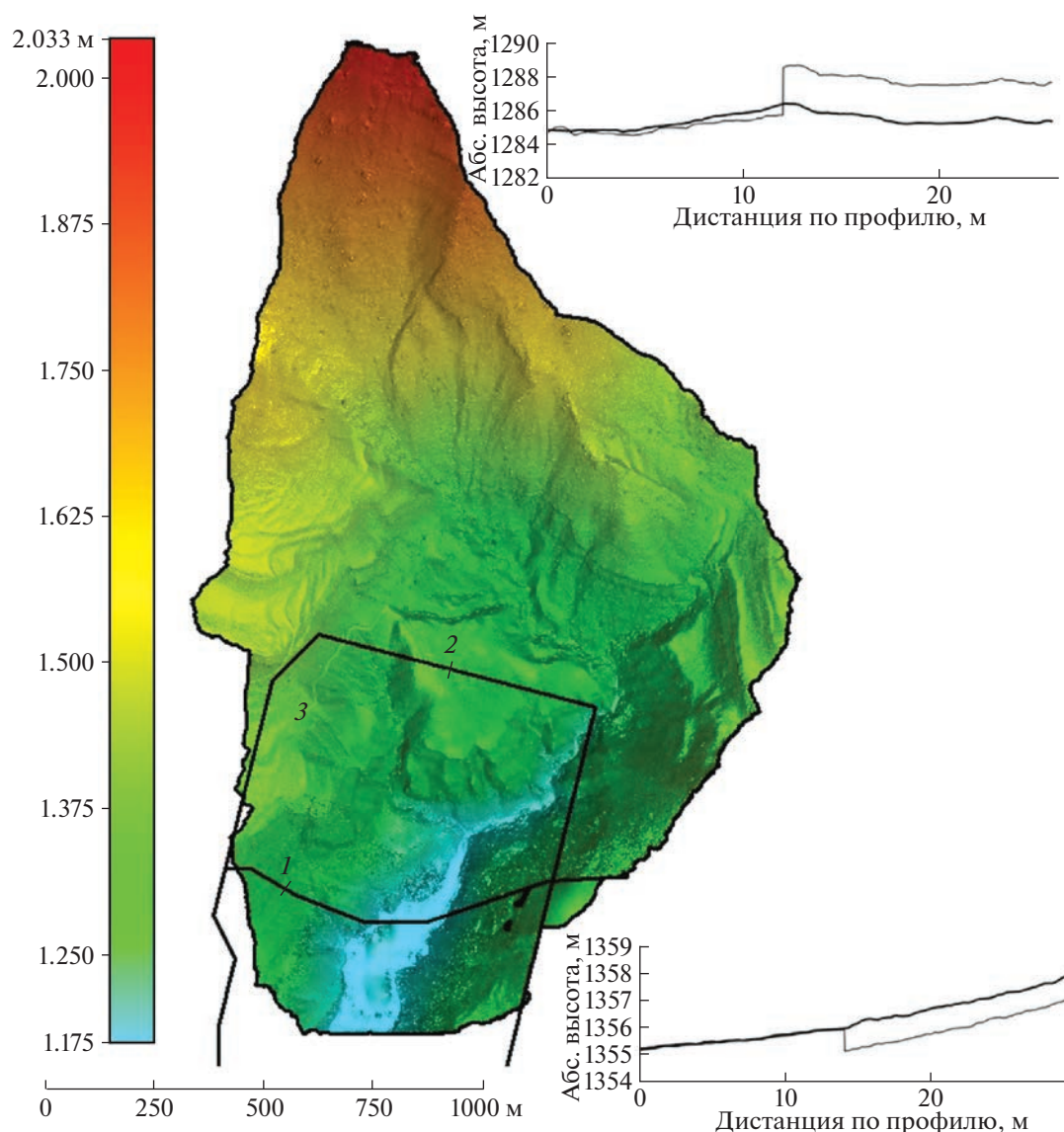
**Рис. 4.** Сетки водосборов ( $S \geq 10000 \text{ м}^2$ ), полученные по итоговой ЦМР (черная) и двум исходным — ведомой (синяя) и ведущей (фиолетовая).

**Fig. 4.** Watersheds networks ( $S \geq 10000 \text{ м}^2$ ) obtained from the final DTM (black) and two original DTMs — the slave (blue) and the master (purple).



**Рис. 5.** Рельеф участка № 2. Водосбор пруда Песковский. 1–4 — положение контрольных топографических профилей, 5–6 — области перекрытия соседних сцен.

**Fig. 5.** Topography of site No. 2. The catchment of the Peskovskiy pond. 1–4 — the control topographic profiles position, 5–6 — the overlapping areas of the neighbour DTMs.



**Рис. 6.** Рельеф участка № 3. Водосбор пруда Гитче-Гижгит. 1–2 – положение контрольных топографических профилей, 3 – область перекрытия соседних сцен.

**Fig. 6.** Topography of site No. 3. The catchment of the Gitché-Gizhgít pond. 1–2 – the control topographic profiles position, 3 – the overlapping areas of the neighbour DTMs.

члененный, общие черты морфологии обусловлены сочетанием аструктурных (чаще) и структурных поверхностей в условиях моноклиального залегания пород с падением пластов к северу. Сам водосбор обращен преимущественно на юг (рис. 6), амплитуда его высот 1175–2033 м.

Показатель сходства сетки микроводосборов на итоговой модели в сравнении с ведущей (большая по площади) составляет  $1.25 \pm 0.18$ , а с ведомой (меньшая по площади, прилегающая к пруду) –  $1.1 \pm 0.19$ ; при этом в области перекрытия двух исходных ЦМР этот показатель равен  $1.05 \pm 0.14$ . Различий по крутизне итоговой ЦМР и ведущей – нет, в то время как величина этого различия с ведомой ЦМР составляет почти  $2^\circ$  (среднее значе-

ние для итоговой модели высот –  $30.6^\circ$ , для ведомой  $32.5^\circ$ ). Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена для крутизны меняются от 0.932 (для ведомой модели) до 0.985 (для ведущей). Наиболее значимые отличия по крутизне локализованы в центральной долине непосредственно вверх по течению от пруда, и, судя по анализу отдельных ЦМР, обусловлены различиями в плотности крон деревьев на съемках июля 2020 г. (древесно-кустарниковый покров хорошо различим на ЦМР и фотоплане) и мая 2021 г. (кроны деревьев не сомкнуты, из-за чего на модели высот почти не различимы). На более ранних данных (используемых в качестве ведомых) возникает искусственная микрошероховатость, существенно завышающая зна-

чения крутизны на площадке размерами лишь около  $100 \times 150$  м. Тем не менее этого оказывается достаточно, чтобы внести отклонение примерно в  $2^\circ$  в показатель среднего значения крутизны земной поверхности на участке. Как и в примере водосбора пруда Песковский, локальные отклонения крутизны при этом не распространяются на остальную площадь ведомой ЦМР, где отклонения крутизны, во-первых, разнонаправленны (т.е. трансформация модели высот не вносит систематической ошибки), а во-вторых — не превышают  $1^\circ$ .

Итоговый алгоритм доступен для скачивания на сервисе GitHub (Sergeikharchenko/rhydrodem-coreg: The R tool ..., 2022). Редактируемые пользовательские параметры отдельно отмечены в скрипте.

## ВЫВОДЫ

Созданный алгоритм позволяет осуществлять сшивку двух ЦМР (а итеративно — и большего их числа) при условии минимизации артефактов, нарушающих гидрологическую корректность моделей высот. То есть в созданной модели сохраняются близкие к исходным значения крутизны поверхностей (и их относительное распределение по площади), а также отсутствуют ложные уступы, прерывающие реальные направления стока, или же создающие по этим направлениям резкие “провалы” высоты поверхности.

Величины подобных искусственных сдвигов поверхности, возникающие из-за погрешности привязки исходных снимков, получаемых с БПЛА, достигают 5–6 м, иногда и более. Такой перепад, даже при условии автоматической коррекции ЦМР (в частности, заполнения локальных понижений), может кардинально менять структуру локальных водосборов и, таким образом, сильно влиять на результаты любых видов моделирования (эрозионного, гидрологического и других), базирующихся на геометрии этой структуры.

Апробация алгоритма на примере 3 различных участков при анализе поперечных профилей показала высокую эффективность устранения ложных сдвигов поверхности. При этом абсолютные высоты поверхности на результирующей модели высот могут существенным образом (на первые метры) отклоняться от значений на ведомой ЦМР. В то же время на итоговых моделях высот практически не меняется распределение крутизны (за счет балансировки результата путем зеркально направленных изменений ведомых ЦМР). Второй индикатор эффективности: во всех трех примерах, пусть и в разной степени, структура стока — рисунок сетки микроводосборов — на итоговых моделях высот оказывается геометрически более схожа с аналогичными рисунками, извлекаемыми из каждой из исходных ЦМР, неже-

ли сами эти сети между собой. Все это в совокупности позволяет заключить, что представленный алгоритм может быть эффективным средством корегистрации моделей высот, если задача исследователя — создать гидрологически корректное цифровое представление земной поверхности.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Разработка алгоритма выполнена за счет гранта РНФ № 19-77-10036. Аэрофотосъемка и фотограмметрическая обработка данных для тестовых участков выполнены за счет гранта РНФ № 19-17-00181.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Beyer R.A., Alexandrov O., Moratto Z.M. (2014). Aligning terrain model and laser altimeter point clouds with the Ames Stereo Pipeline // Lunar and Planetary Science Conference. No. 1777. P. 2902.
- Debella-Gilo M., Käb A. (2011). Sub-pixel precision image matching for measuring surface displacements on mass movements using normalized cross-correlation // Remote Sensing of Environment. Vol. 115. No. 1. P. 130–142. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.08.012>
- Gafurov A. (2021). The methodological aspects of constructing a high-resolution DEM of large territories using low-cost UAVs on the example of the Sarycum aeolian complex, Dagestan, Russia // Drones. Vol. 5. No. 1. P. 7. <https://doi.org/10.3390/drones5010007>
- Hackney C., Clayton A. (2015). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and their application in geomorphic mapping // Geomorphological Techniques (Eds. Clarke L., Nield J.M.). London, GB: British Society of Geomorphology. P. 1–12.
- Hargrove W.W., Hoffman F.M., Hessburg P.F. (2006). Map-curves: a quantitative method for comparing categorical maps // Journal of Geographical Systems. Vol. 8. No. 2. P. 187–208. <https://doi.org/10.1007/s10109-006-0025-x>
- James M.R., Chandler J.H., Eltner A. et al. (2019). Guidelines on the use of structure-from-motion photogrammetry in geomorphic research // Earth Surface Processes and Landforms. Vol. 44(10). P. 2081–2084. <https://doi.org/10.1002/esp.4637>
- Kaiser A., Erhardt A., Eltner A. (2018). Addressing uncertainties in interpreting soil surface changes by multi-temporal high-resolution topography data across scales // Land degradation & development. Vol. 29(8). P. 2264–2277. <https://doi.org/10.1002/ldr.2967>
- Kenward T., Lettenmaier D.P., Wood E.F., Fielding E. (2000). Effects of digital elevation model accuracy on hydrologic predictions // Remote Sensing of Environment. Vol. 74(3). P. 432–444. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00136-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00136-X)
- Leitão J.P., De Vitry M.M., Scheidegger A., Rieckermann J. (2016). Assessing the quality of digital elevation models obtained from mini unmanned aerial vehicles for overland flow modelling in urban areas // Hydrology and Earth System Sciences. Vol. 20. No. 4. P. 1637–1653. <https://doi.org/10.5194/hess-20-1637-2016>
- Li H., Deng Q., Wang L. (2017). Automatic co-registration of digital elevation models based on centroids of subwatersheds // IEEE Transactions on Geoscience and Re-

- mote Sensing. Vol. 55. No. 11. P. 6639–6650.  
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2731048>
- Niitsuma H., Maruyama T. (2010). Sum of absolute difference implementations for image processing on FPGAs // 2010 International Conference on Field Programmable Logic and Applications. P. 167–170.
- Nuth C., Kääb A. (2011). Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change // *The Cryosphere*. Vol. 5. P. 271–290.  
<https://doi.org/10.5194/tc-5-271-2011>
- Psarakis E., Evangelidis G. (2005). An Enhanced Correlation-Based Method for Stereo Correspondence with Sub-Pixel Accuracy // 10th IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Oct 2005, Beijing, China. P. 907–912.  
<https://doi.org/10.1109/ICCV.2005.33f>
- R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.r-project.org> (дата обращения: 01.01.2022).
- Revuelto J., López-Moreno J.I., Alonso-González E. (2021). Light and shadow in mapping alpine snowpack with unmanned aerial vehicles in the absence of ground control points // *Water Resources Research*. Vol. 57. No. 6. P. e2020WR028980.  
<https://doi.org/10.1029/2020WR028980>
- Sergeikharchenko/rhydrodemcoreg: The R tool for DEMs coregistration with keeping of hydrologically correctness [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://github.com/sergeikharchenko/rhydrodemcoreg> (дата обращения: 01.04.2022).
- Shean D.E., Alexandrov O., Moratto Z.M. et al. (2016). An automated, open-source pipeline for mass production of digital elevation models (DEMs) from very high-resolution commercial stereo satellite imagery // *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* Vol. 116. P. 101–117.  
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.012>
- Śledź S., Ewertowski M.W., Piekarczyk J. (2021). Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) surveys and Structure from Motion photogrammetry in glacial and periglacial geomorphology // *Geomorphology*. Vol. 378. P. 107620.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107620>
- Walker J.P., Willgoose G.R. (1999). On the effect of digital elevation model accuracy on hydrology and geomorphology // *Water Resources Research*. Vol. 35 (7). P. 2259–2268.  
<https://doi.org/10.1029/1999WR900034>
- Woodrow K., Lindsay J.B., Berg A.A. (2016). Evaluating DEM conditioning techniques, elevation source data, and grid resolution for field-scale hydrological parameter extraction // *Journal of hydrology*. Vol. 540. P. 1022–1029.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.018>
- Zhengyou Zh. (1994). Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces // *International Journal of Computer Vision*. No. 13 (12). P. 119–152.

## THE METHOD FOR CO-REGISTRATION OF DIGITAL TERRAIN DATA TO OBTAIN HYDROLOGICALLY CORRECT MODEL OF THE EARTH'S SURFACE<sup>1</sup>

S. V. Kharchenko<sup>a,b,#</sup>

<sup>a</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

<sup>b</sup>Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

<sup>#</sup>E-mail: [xar4enkkoff@yandex.ru](mailto:xar4enkkoff@yandex.ru)

There are problems with the co-registration of digital terrain models which were created by drones to obtain useful data for a numerical hydrological or erosional modeling. The different surveys can be produced at different time of a day, in various seasons or even years, making it difficult spatially reference the data. Many co-registration algorithms usually perform the statistical fitting of point clouds or raster models. Such approach violates the hydrological correctness of the final data, it makes artifacts appearing, such as various escarpes and visible joints. The search for the contour of “zero error” on the raster of elevations difference is the bases of presented algorithm. This contour is used for the stitching of original elevation models together. As criteria for the quality assessment of the final elevation models are used: 1) the statistical distributions of slope gradient, i.e. parameter that affects the results of modeling the water and sediment flows, slope stability, etc., 2) the constancy of the microcatchments geometric structure. The algorithm was tested on three sites located in plain, low-mountain and mid-mountain zones. In all examples, the high efficiency of the method was shown. At the same time, the technique was constructed for keeping the significant features of terrain morphology in data. The average slope does not deviate by more than 1° in comparison with the original data. The Spearman rank correlation of the slope varies in different cases at 0.9–0.99 (with an average value of 0.96). The coefficients of geometric similarity of microcatchment patterns on the final models in all cases show even larger values (1.09) than on the original data without any correction (0.98) in the areas their overlap.

<sup>1</sup> For citation: Kharchenko S.V. (2023). The method for co-registration of digital terrain data to obtain hydrologically correct model of the earth's surface. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 54. No. 3. P. 150–164 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S2949178923030039>; <https://elibrary.ru/10.31857/S2949178923030039>

**Keywords:** unmanned aerial vehicles, digital terrain model, geomorphometric analysis, catchment area, slope gradient

# ACKNOWLEDGMENTS

The development of the algorithm was supported by Russian Science Foundation (project No. 19-77-10036). Aerial surveys and data photogrammetric processing for test sites was supported by Russian Science Foundation (project No. 19-17-00181).

# REFERENCES

- Beyer R.A., Alexandrov O., Moratto Z.M. (2014). Aligning terrain model and laser altimeter point clouds with the Ames Stereo Pipeline. *Lunar and Planetary Science Conference*. No. 1777. P. 2902.
- Debella-Gilo M., Kääb A. (2011). Sub-pixel precision image matching for measuring surface displacements on mass movements using normalized cross-correlation. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 115. No. 1. P. 130–142. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.08.012>
- Gafurov A. (2021). The methodological aspects of constructing a high-resolution DEM of large territories using low-cost UAVs on the example of the Sarycum aeolian complex, Dagestan, Russia. *Drones*. Vol. 5. No. 1. P. 7. <https://doi.org/10.3390/drones5010007>
- Hackney C., Clayton A. (2015). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and their application in geomorphic mapping. *Geomorphological Techniques* (Eds. Clarke L., Nield J.M.). London, GB: British Society of Geomorphology. P. 1–12.
- Hargrove W.W., Hoffman F.M., Hessburg P.F. (2006). Mapcurves: a quantitative method for comparing categorical maps. *Journal of Geographical Systems*. Vol. 8. No. 2. P. 187–208. <https://doi.org/10.1007/s10109-006-0025-x>
- James M.R., Chandler J.H., Eltner A. et al. (2019). Guidelines on the use of structure-from-motion photogrammetry in geomorphic research. *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 44 (10). P. 2081–2084. <https://doi.org/10.1002/esp.4637>
- Kaiser A., Erhardt A., Eltner A. (2018). Addressing uncertainties in interpreting soil surface changes by multi-temporal high-resolution topography data across scales. *Land degradation & development*. Vol. 29 (8). P. 2264–2277. <https://doi.org/10.1002/ldr.2967>
- Kenward T., Lettenmaier D.P., Wood E.F., Fielding E. (2000). Effects of digital elevation model accuracy on hydrologic predictions. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 74 (3). P. 432–444. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00136-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00136-X)
- Leitão J.P., De Vitry M.M., Scheidegger A., Rieckermann J. (2016). Assessing the quality of digital elevation models obtained from mini unmanned aerial vehicles for overland flow modelling in urban areas. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol. 20. No. 4. P. 1637–1653. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-20-1637-2016>
- Li H., Deng Q., Wang L. (2017). Automatic co-registration of digital elevation models based on centroids of subwatersheds. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 55. No. 11. P. 6639–6650. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2731048>
- Niitsuma H., Maruyama T. (2010). Sum of absolute difference implementations for image processing on FPGAs. *2010 International Conference on Field Programmable Logic and Applications*. P. 167–170.
- Nuth C., Kääb A. (2011). Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *The Cryosphere*. Vol. 5. P. 271–290. <https://doi.org/10.5194/tc-5-271-2011>
- Psarakis E., Evangelidis G. (2005). An Enhanced Correlation-Based Method for Stereo Correspondence with Sub-Pixel Accuracy. *10th IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Oct 2005, Beijing, China. P. 907–912. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2005.33f>
- R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria [Electronic data]. Access way: <https://www.r-project.org> (access date: 01.01.2022)
- Revuelto J., López-Moreno J.I., Alonso-González E. (2021). Light and shadow in mapping alpine snowpack with unmanned aerial vehicles in the absence of ground control points. *Water Resources Research*. Vol. 57. No. 6. P. e2020WR028980. <http://dx.doi.org/10.1029/2020WR028980>
- Sergeikharchenko/rhydrodemcoreg: The R tool for DEMs coregistration with keeping of hydrologically correctness [Electronic Data]. Access way: <https://github.com/sergeikharchenko/rhydrodemcoreg> (access date: 01.04.2022).
- Shean D.E., Alexandrov O., Moratto Z.M. et al. (2016). An automated, open-source pipeline for mass production of digital elevation models (DEMs) from very high-resolution commercial stereo satellite imagery. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* Vol. 116. P. 101–117. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.012>
- Śledź S., Ewertowski M.W., Piekarczyk J. (2021). Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) surveys and Structure from Motion photogrammetry in glacial and periglacial geomorphology. *Geomorphology*. Vol. 378. P. 107620. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107620>
- Walker J.P., Willgoose G.R. (1999). On the effect of digital elevation model accuracy on hydrology and geomorphology. *Water Resources Research*. Vol. 35 (7). P. 2259–2268. <https://doi.org/10.1029/1999WR900034>
- Woodrow K., Lindsay J.B., Berg A.A. (2016). Evaluating DEM conditioning techniques, elevation source data, and grid resolution for field-scale hydrological parameter extraction. *Journal of hydrology*. Vol. 540. P. 1022–1029. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.018>
- Zhengyou Zh. (1994). Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. *International Journal of Computer Vision*. No. 13 (12). P. 119–152.