



ОСОБЕННОСТИ ОЗЕРА ТВЕРДОГО (АРХИПЕЛАГ СЕВЕРНАЯ ЗЕМЛЯ).

✉ Трунин А.А.¹, Тешебаев Ш.Б.¹, Бородкин В.А.¹, Парамзин А.С.¹¹ФГБУ «ААНИИ», Санкт-Петербург, Россия

✉ trunin@aari.ru

Озеро Твердое расположено в северо-восточной части острова Большевик арх. Северная земля. Климат представлен арктическими пустынями. Основными породами являются алевролиты и аргиллиты, подверженные процессам денудации. Для построения гидрографических характеристик озера проведена планово-высотная привязка с применением профессионального геодезического оборудования. На основании полученных материалов, используя современные методы картографии, съёмки с квадрокоптера и маршрутной геоморфологической съёмки, уточнена батиметрическая карта, построен водосбор озера, уточнено на местности положение водотока (ручья) из озера в бухту Амба. В сезон 2014, 2017-2018 гг. обнаружены уникальные природные явления, происходящие в экосистеме озера. Исследованы 2 промоины, рядом с ними отобран ледовый керн, содержащий по всей длине включения пузырьков, связанных с выделением газа со дна озера (состав газа определить не удалось). Отмечено большое количество кислорода содержащегося в воде озера – более 100% насыщенности. Определён генезис формирования ложа озера, связанный с наложением двух разломов герцинской складчатости.

Ключевые слова: *остров Большевик, озеро Твердое, батиметрия, водосбор, картография, ГИС, гидрология, геоморфология, разлом, газовый пузырь*

Введение. Озеро Твердое – озеро с уникальной экосистемой. В статье представлена технология по топографической съёмки и расчёту морфометрических характеристик озера Твердого на основе геоинформационных систем. Уточнена батиметрическая карта и построен водосбор озера. Обнаружены две промоины и отобран керн рядом с ними содержащий газ выделяющийся со дна озера. Определён генезис озера связанный с наложением двух разломов герцинской складчатости. Описаны основные предпосылки для дальнейшего исследования.

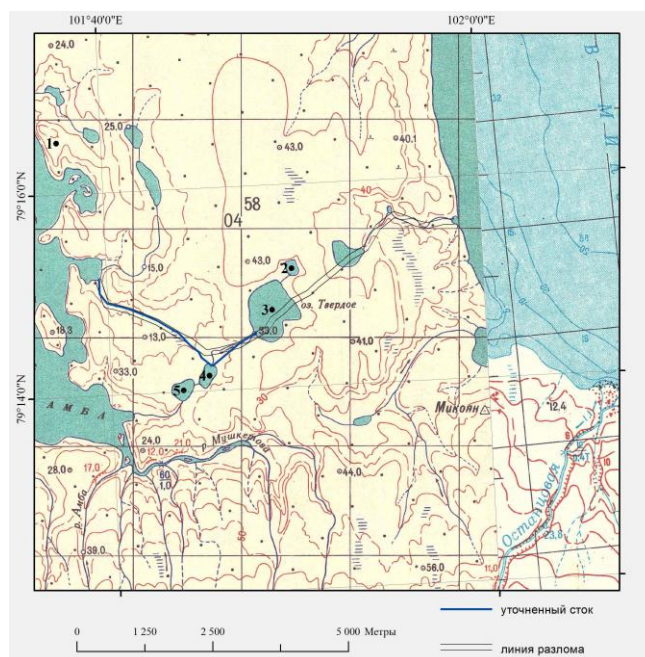


Рис. 1. Расположение объектов: 1 – метеостанция; озеро, 2 – впадающее в озеро Твердое; 3 – озеро Твердое; 4 – первое каскадное озеро; 5 – второе каскадное озеро.

Батиметрическая съёмка Озера выполнена летом в 2016 году [Рачкова и Трунин, 2016]. Промерные работы по уточнению рельефа дна Озера осуществлялись: с помощью лота с гребной лодки, во время штиля. Для точного координирования промерных точек, на лодку было установлено спутниковое двухчастотное геодезическое оборудование GPS/ГЛОНАСС. Оборудование было размещено на лодке таким образом, что сидящие в ней не перекрывали небосвод, не ухудшая условия видимости спутниковой группировки. Уровень воды в Озере за время промерных работ не изменялся, и при работах с лодки выполнялась только привязка промерных точек в плане. Планово-высотным обоснованием съёмки являлись те же геодезические пункты в местной системе координат, что использовались для съёмки рельефа местности для уточнения границ водосбора Озера. Привязка уровня воды в Озере во время работ осуществлялась в Балтийской системе высот с фиксацией времени и даты измерений.

Планово-высотная съёмка рельефа для уточнения границы водораздела Озера выполнена в сентябре 2016 г. при полном отсутствии снежного покрова. Согласно технического задания производилась съёмка масштаба 1:5000 с сечением рельефа через 0,5 метра, что по инструкции [Инструкция, 1982] требует измерения соседних точек рельефа на расстоянии не более 60 м с максимальной допустимой погрешностью определения положения точки рельефа в плане не более 2 м, по высоте не более 16 см.

В качестве измерительного оборудования использовалось профессиональное геодезическое оборудование, состоящее из электронного тахеометра, обеспечивающего точность измерения угла одним приёмом с погрешностью не более 5 секунд. Точность измерения расстояния с погрешностью не более 2 мм на 1 км расстояния, оснащённого зрительной трубой с силой увеличения 30 крат и двухосевым электронным компенсатором положения прибора по горизонту, с диапазоном работы до 6 минут. В комплекте с тахеометром использовались вехи с отражателями.

Исходным планово-высотным обоснованием для выполнения съёмки являлись грунтовые пункты спутниковой геодезической сети сгущения. Сеть развита методами сетевых статических наблюдений с применением спутникового ГЛОНАСС/GPS двухчастотного геодезического оборудования от пунктов государственной геодезической сети триангуляции, имеющей высотные отметки в Балтийской системе высот, полученные в Росреестре, и плановые координаты в местной системе координат.

Процесс съёмки заключался в последовательном измерении координат и высот точек на расстоянии не более чем 60 м от предыдущих измеряемых точек, с последующим контролем качества полученных данных на компьютере в программном обеспечении обработки геодезических измерений и, при необходимости, досъёмки пропущенных участков рельефа. Планово-высотная съёмка велась с таким расчётом, чтобы уточнить границы перегиба рельефа, тем самым, определив границы водосбора Озера. В результате обработки полученных данных, их уравнивания, была выполнена оценка точности измерений, удовлетворившая требованиям инструкции [Инструкция, 1982].

В 2017 г. после построения батиметрической карты Озера возникла необходимость уточнения некоторых участков глубин Озера. Навигация для выхода лодки на место уточняющего промера выполнялась по данным спутникового геодезического оборудования, включённого в режим передачи данных поправок с базовой станции в реальном времени, что обеспечивало определение текущих координат с точностью до 2-3 сантиметров. Ранее снятые промерные точки отображались на терминале управления спутниковым геодезическим оборудованием, выполненном на базе защищённого компьютера. В результате оператору было точно известно его местоположение в данный момент, относительно всех выполненных промеров на озере и точки, необходимые для выполнения сгущения съёмки. Частота промеров, расстояние между соседними точками согласовывалась перед началом работ с сотрудниками гидрологического отряда и при необходимости дополнялась на лодке при производстве работ на основании полученных данных по глубинам. Минимальное необходимое время измерения координат точки

промера с лодки спутниковым геодезическим оборудованием, исходя из местных условий съёмки, удалённости от базовой станции, закрытости горизонта, составляло 3 секунды. Обработка спутниковых измерений в программном обеспечении показала удовлетворительное качество полученных данных, обеспечившее определение плановых координат точек с сантиметровой точностью.

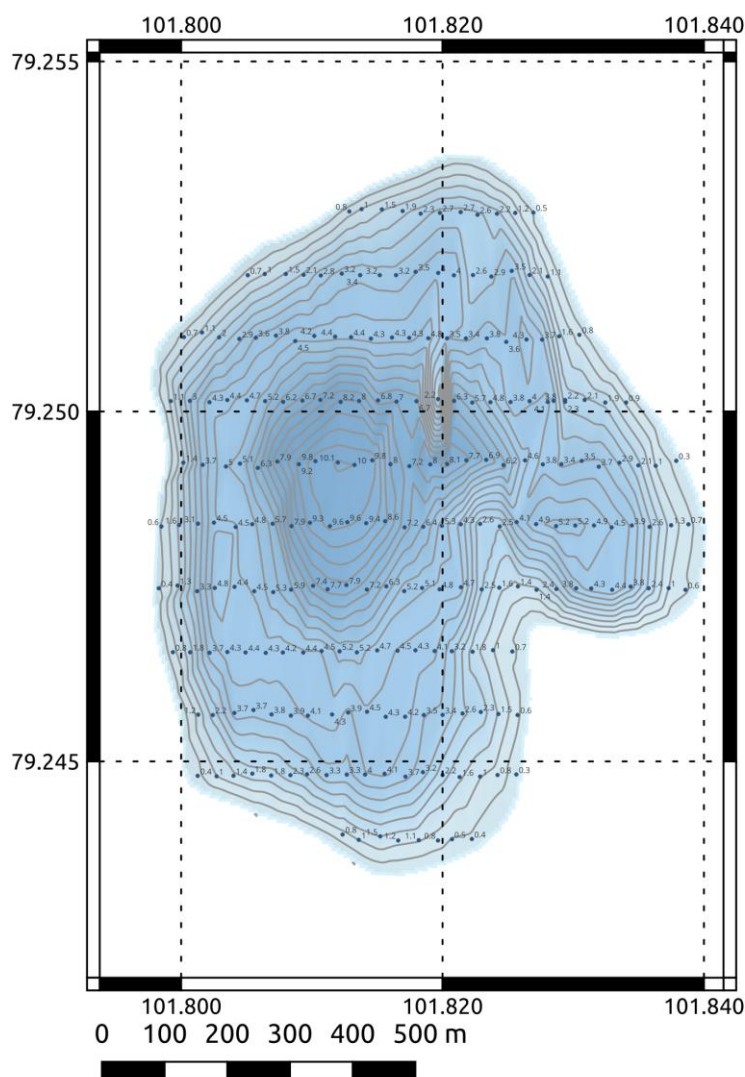


Рис. 2. Батиметрическая карта озера Твердого. Изолинии проведены через 0,5 метра. Точки со значениями - пункты промера с глубиной Озера.

Для компьютерной обработки полученных данных использовалась современная геоинформационная система (ГИС). Расчеты проводились в проекции Гаусса-Крюгера на эллипсоиде Красовского.

Методы глобальной и локальной интерполяции, а также детерминированные и геостатистические методы подробно описаны [desktop.arcgis.com]. Анализ методов построения матриц рельефа позволил выбрать наиболее подходящий для гидрологических объектов метод ANUDEM [Jenson, Domingue, 1988].

Особенностью метода является возможность учёта точечных и линейных данных с разными весами. При большем весе «горизонталей» алгоритм сначала строит генерализованную морфологию поверхности, основываясь на кривизне горизонталей. Горизонталы служат надёжными индикаторами водотоков и линий водоразделов. Границы водосборов рассчитывались на основании методики, реализованной в инструментах Spatial Analyst-Hydrology-Watershed, ArcMap v. 10.0 [Hutchinson et al., 2000].

Построена батиметрическая карта рельефа (рис. 2), водосбор озера и водосборы пунктов исследования (рис. 3). Площадь зеркала озера составила $0,69 \text{ км}^2$. Глубины озера характеризуются двумя впадинами 10м, 6м. Характерна вытянутость озера (овальность) в меридиональном направлении. Рядом с впадиной глубиной 6м. расположен мыс, вытянутый в юго-восточном направлении. Площадь водосбора озера составила $3,14 \text{ км}^2$.

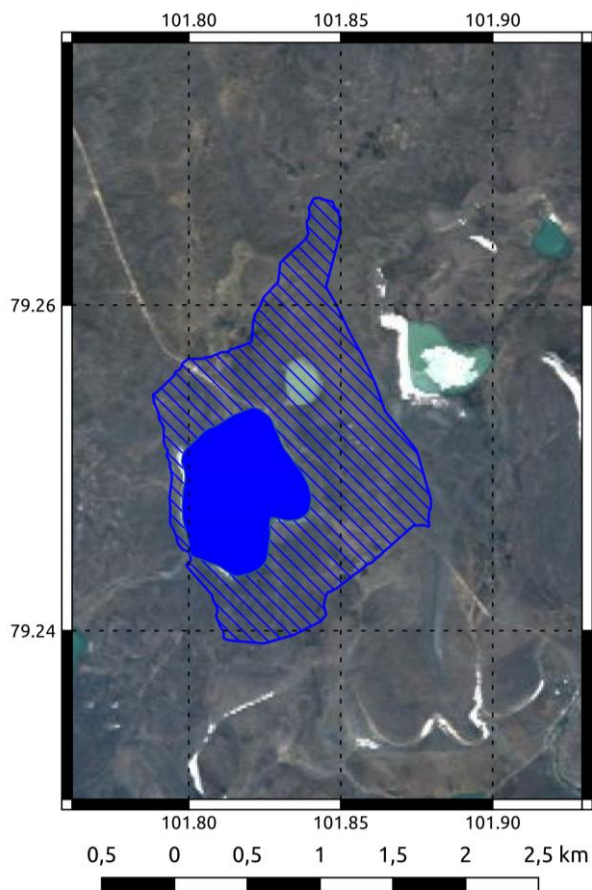


Рис. 3. Границы озера Твердое обозначены синим цветом. Площадь – $0,69 \text{ км}^2$. Водосбор озера Твердого обозначен штриховкой синего цвета. Площадь – $3,14 \text{ км}^2$.

Исследование возникновения промоин. Лед на озере Твердом в 2014 г. до конца не растаял в связи с затяжной весной и холодным летом. Вдоль берега по периметру озера размер ширины закраин составлял от 1 до 10м. Остаточная толщина льда в озере изменялась в пределах метра. На расстоянии 300-400 м от мыса, располагалась первая промоина, за ней метрах в 200-300 на восток вторая, затем третья. Расположение промоин было линейное с запада на восток. Промоины имели округлую форму и их размеры уменьшались по мере движения на восток с 20-25 до 8-10 метров в диаметре.

В сезон 2017 году оз. Твердое не полностью освободилось ото льда, что определило специфику ледообразования в северной части озера. На основании визуальной оценки были выбраны три пункта наблюдения. Первый пункт наблюдения расположен рядом с вытекающим ручьём и первой полыньёй. Второй пункт наблюдения расположен рядом с полыньёй на траверсе мыса. Третий пункт наблюдения расположен рядом с ручьём в северной части Озера (рис. 4).

29 августа 2017 г. на фоне начинающегося процесса ледостава (рисунок 4) обнаружены две полыньи, соединяющиеся протокой между собой. 1-я полынья оказалась в пункте наблюдения № 1, 2-я полынья примерно в 300 м выше на северо-восток от 1-й. В это же время отмечено отсутствие промерзания вытекающего ручья (под тонким льдом ручья текла вода). Выяснилось, что температура воды во 2-й полынье была $0,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, что на

0,5 °С выше, чем в 1-й (0,3 °С). С геологической точки зрения рельеф (ложе) Озера сформировалось путем наложения двух тектонических процессов (герцинская складчатость): зоны сжатия и зоны растяжения. Зона сжатия связана с преобладающим направлением разломов в северо-восточной части о. Большевик. Характерной чертой наложения двух разломов является сформировавшийся мыс озера (рис. 2).

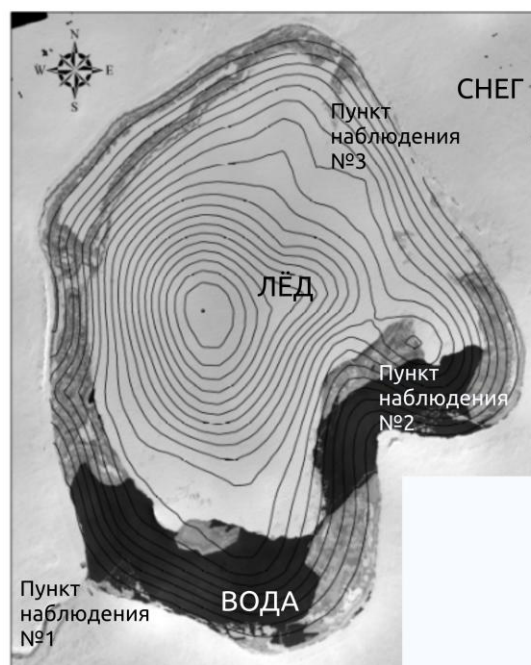


Рис. 4. Образование ледяного покрова на озере Твердом (29 августа 2017 года). Сглаженные изолинии проведены через 0,5 метра.

Следует отметить: 29 августа, 3 сентября, 11 сентября визуальный метод наблюдения не позволил охарактеризовать интенсивность потока ручья впадающего в озеро, т.е. сток воды отсутствовал. Визуальный метод наблюдения позволил также установить, что сток воды из озера в период наблюдений постоянно присутствовал. При этом интенсивность стока с 29.08.2017 по 11.09.2017 уменьшалась. В период наблюдений в пунктах № 1, № 2 изменение толщины льда не установлено. Нарастание льда в пункте наблюдения № 3 29.09 – 1 см, 03.10 – 4 см, 11.10 – 12 см. Уменьшение интенсивности стока из Озера видимо связано с нарастанием льда в пункте № 3, на поверхности льда наблюдались бьющие фонтаны около 5 см высотой. 29 августа 2017 г. площадь открытой воды составила 0,274 км². 11 сентября 2017 г. площадь открытой воды уменьшилась и составила 0,118 км². За 2 недели площадь открытой воды сократилась в 2,3 раза.

Диаметр промоин составлял около 1 метра. Толщина льда по кромке составляла 1,5 метра. Глубина в промоине № 1 составила 6 метров, причём промоина № 2 находилась во второй впадине Озера. Глубина в промоине № 2 составила 3 метра. Линия простираения местоположений промоин совпадает с линией зоны растяжения (с линией разлома). Исследование образцов льда, отобранных с помощью керноотборника «Kovacs Enterprise» диаметром 14 см показал, что в текстуре льда преобладают цилиндрические воздушные включения вертикального развития с оплавленными в результате процессов термометаморфизма стенками, размером примерно 1 см в диаметре и 10-20 см по высоте. Присутствие таких включений указывает, что формирование ледяного покрова протекало при наличии температурного градиента в приледном слое воды. Частота включений позволяет предположить, что на их появление могло оказывать влияние не только выделение газов при замерзании воды, но и поступающие газы из донных отложений (рис. 6).

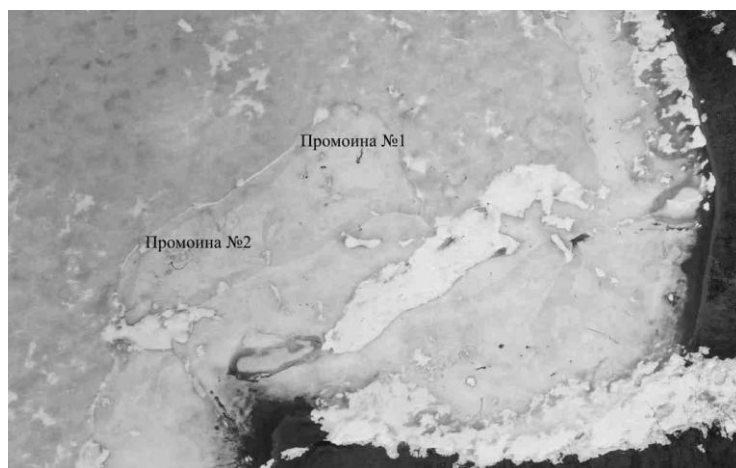


Рис. 5. Обнаруженные промоины. 21 июня 2018 года.

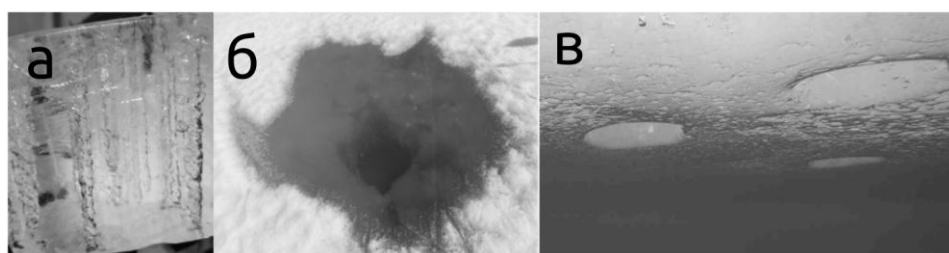


Рис. 6. Не образовавшиеся промоины. а) Керн с пузырьками. б) Промоина. в) Снимок нижней поверхности льда (рядом с промоиной).

Выводы. Рельеф озера Твердое значительно отличается по глубинам от остальных исследованных озер, глубина которых не превышает 5 м. Остров Большевик характеризуется сильными процессами эрозии при воздействии ветров, льда, воды, следовательно, интенсивным процессом осадконакопления. Возникновение промоин может служить индикатором дополнительного поступления воды в озеро Твердое.

Гидрологические, геоморфологические исследования дадут возможность приобрести новые знания об экосистеме озера Твердое и связанного с ним каскада озер.

Одной из причин образования промоин на озере Твердое возможно являются процессы нерегулируемого, спонтанного газообразования из метангидратов и газогидратов вечной мерзлоты со дна озера. Необходимо, при последующих работах, исследовать воду озера на наличие в ней таких газов как метан, сероводород, азот, кислород, углекислый газ.

Мы полагаем, что необходимы дополнительные комплексные геоморфологические и гидрологические исследования.

Авторы выражают благодарность за поддержку начальнику ВАЭ Соколову В.Т., начальникам стационаров: Ипатову А.Ю., Семенову С.А, а также Кушеверскому И.А. Отдельная благодарность выражается Лебедеву Г.Б.

ЛИТЕРАТУРА

Рачкова А.Н., Трунин А.А. Гидрологические исследования и работы в сезонной экспедиции «Север-2016» на НИС «Ледовая база «Мыс Баранова»» // Российские полярные исследования. 2016. № 4(26). С. 22-25.

Инструкция по топографической съёмке масштаба 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500. ГКИНП-02-033-79. М. Недра, 1982. 158 с.

<http://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-spatial-analyst-toolbox.htm> (дата обращения: 09.10.2021)

Jenson S., Domingue J. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1988. Vol. 54. Is. 11. P. 1593–1600.

Hutchinson M. F., Gallant J. C. Digital Elevation Models and Representation of Terrain Shape // Terrain Analysis: Principles and Applications /Eds. J. P. Wilson, J. C. Gallant. N.Y.: John Wiley & Sons, 2000. P. 29–50

THE FEATURE OF THE LAKE TVERDOE (SEVERNAYA ZEMLYA ARCHIPELAGO)

Trunin A.A.¹, Teshebaev S.B.¹, Borodkin V.A.¹, Paramzin A.S.¹

¹Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

Lake Tverdoe is located in the north-eastern part of the Bolshevik island, arch. Northern land. The climate is represented by arctic deserts. The main rocks are siltstones and mudstones, subject to denudation processes. To build the hydrographic characteristics of the lake, a vertical-height reference was made using professional geodetic equipment. Based on the materials obtained, using modern methods of cartography, quadrocopter survey and route geomorphological surveys, the bathymetric map was refined, the lake's catchment was built, and the position of the watercourse (stream) from the lake to the Amba Bay was clarified on the ground. In the season 2017-2018. unique natural phenomena occurring in the ecosystem of the lake were discovered. Two gullies were investigated, an ice core was taken next to them, containing along the entire length of the inclusion of bubbles associated with the release of gas from the bottom of the lake (gas composition was not determined). A large amount of oxygen was found in the lake water, more than 100 % saturation. The genesis of the formation of the bed of the lake associated with the superposition of two faults of the Hercynian folding is determined.

Keywords: *Bolshevik Island, Tverdoe Lake, bathymetry, watershed, cartography, GIS, hydrology, geomorphology, fault, gas bubble*

REFERENCE:

Rachkova A.N., Trunin A.A. Hydrological research and work in the seasonal expedition "North-2016" on the research vessel "Ice base "Mys Baranova" // Russian polar research. 2016. No. 4 (26). P. 22-25.

Instructions for topographic survey at a scale of 1:5000, 1:2000, 1:1000 and 1:500. GKINP-02-033-79. M. Nedra, 1982. 158 s.

<http://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-spatial-analyst-toolbox.htm> (accessed: 09.10.2021)

Jenson S., Domingue J. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1988. Vol. 54. Is. 11. P. 1593–1600.

Hutchinson M. F., Gallant J. C. Digital Elevation Models and Representation of Terrain Shape.// Terrain Analysis: Principles and Applications /Eds. J. P. Wilson, J. C. Gallant. – N. Y.: John Wiley & Sons, 2000. P. 29-50.