

КАРТОГРАФИЯ И ГЕОИНФОРМАТИКА

УДК 556.51:519.8 (470.53)

**В.Г. Калинин, С.В. Пьянков, О.А. Перевощикова
О ФОРМИРОВАНИИ ПОДВОДНОГО РЕЛЬЕФА ДНА ДОЛИННЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ (НА
ПРИМЕРЕ КАМСКОГО)***Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

Рассматриваются вопросы оценки морфологических изменений ложа водохранилища за период его многолетней эксплуатации на примере Обвинского залива Камского водохранилища. Разработанный авторами методологический подход, основанный на объединении топографических карт и материалов детальных промеров глубин с учетом оптимальных линейных размеров растра и пороговых значений сумм направлений стока, позволил создать гидрологически корректную цифровую модель рельефа.

Смоделированная речная сеть подводной части водохранилища практически полностью совпадает с формой русла р. Обвы и ее притоков до создания водохранилища, что подтверждается данными дистанционного зондирования Земли. «Подводные» водотоки, полученные по картам современных промеров глубин, сохранились до сих пор. Причиной сохранения подводных ложбин является их промывание в период снеготаяния при низких уровнях воды в результате глубокой зимней сработки водохранилища.

Ключевые слова: водохранилище, морфология, моделирование речной сети, гидрологически корректная цифровая модель рельефа.

**V.G. Kalinin, S.V. Pyankov, O.A. Perevoshchikova
ON THE FORMATION OF THE UNDERWATER RELIEF OF VALLEY RESERVOIRS
(BY THE EXAMPLE OF THE KAMA RESERVOIR)***Perm State University, Perm*

The article deals with the assessment of morphological changes in the bottom of a reservoir for the period of its long-term exploitation by the example of the Obva Bay of the Kama Reservoir. The authors developed a methodological approach based on combining topographic maps and materials of detailed depth measurements, taking into account the optimal linear dimensions of the raster and the threshold values of the sums of flow directions. Application of this approach made it possible to create a hydrologically correct digital relief model.

The simulated river network of the underwater part of the reservoir almost completely coincides with the shape of the Obva river channel and its tributaries before the creation of the reservoir, which is confirmed by the data of remote sensing of the Earth. «Underwater» watercourses, obtained from maps of modern depth measurements, have survived to this day. The reason for the preservation of underwater troughs is their washing during the snow melting period at low water levels as a result of deep winter drawdown of the reservoir.

Key words: reservoir, morphology, simulation of the river network, hydrologically correct digital relief model.

doi 10.17072/2079-7877-2018-1-128-137

Введение

Исследование пространственно-временной изменчивости формирования рельефа дна водохранилищ и их влияния на характер и интенсивность внутриводоемных процессов – одна из наиболее актуальных проблем, поскольку особенности формы ложа искусственных водоемов существенно трансформируют воздействие природных факторов и хозяйственной деятельности человека на процессы формирования гидрологического режима [1].

В результате стока наносов, процессов абразии и аккумуляции в водохранилищах происходит коренная «перестройка» подводного рельефа. В открытой части водоема это обусловлено

разрушением волновой абразией островов, локальных мелководий (повышенных участков дна), заполнением депрессии продуктами их разрушения и стоком наносов, формированием иловых отложений и их перераспределением сложной системой течений, т.е. происходит нивелировка подводного рельефа [5].

В то же время каждое водохранилище обладает рядом индивидуальных черт, связанных с его морфологическими и морфометрическими характеристиками, положением в каскаде, регламентом работы ГЭС, величиной зимней сработки уровня воды и, как следствие, индивидуальными особенностями формирования гидрологического режима водоема. Поэтому процессы абразии и аккумуляции в разных водохранилищах, а также в разных их частях происходят по-разному.

Возникает вопрос о современном рельефе дна – насколько он изменился по сравнению с первоначальным (до создания водохранилища) и какие морфологические особенности рельефа характерны для водоема в настоящее время.

Рассмотрим решение этого вопроса на примере Камского водохранилища – долинного равнинного водоема, отличающегося большой изрезанностью береговой линии и наличием крупных заливов. Оно осуществляет сезонное, недельное и суточное регулирование стока [5]. В уровенном режиме Камского водохранилища выделяются три четко выраженные фазы: весеннего наполнения, летне-осенней стабилизации и глубокой (до 7,5 м) сработки водохранилища в зимний период. В результате зимнего понижения уровня воды площадь зеркала водохранилища значительно уменьшается и появляются огромные площади, занятые осевшим на дно ледяным покровом [1] (рис. 1).

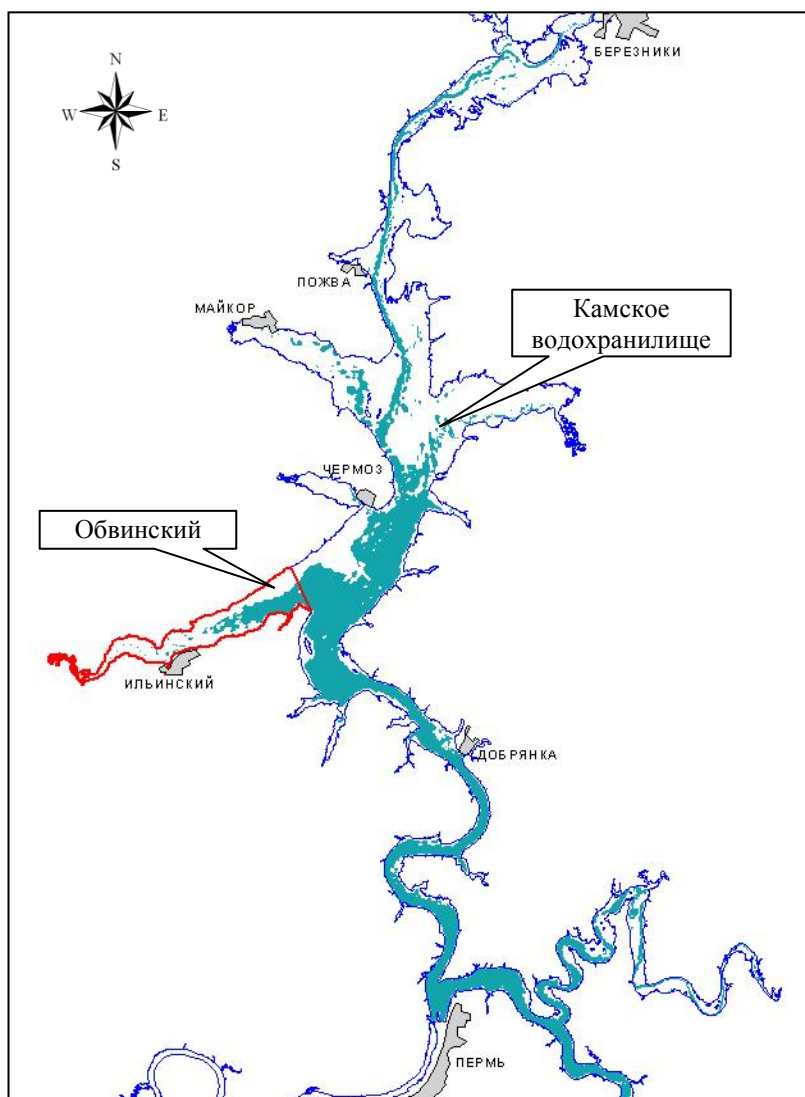


Рис. 1 Обвинский залив Камского водохранилища (белым цветом в контуре водохранилища показаны участки осевшего льда при максимальной зимней сработке)

Целью данной статьи является оценка морфологических изменений ложа водохранилища за период многолетней эксплуатации на основе построения гидрологически корректных цифровых моделей рельефа (ЦМР), применения ГИС-технологий и данных дистанционного зондирования Земли.

Материалы и методы исследования

В качестве модельного участка выбран Обвинский залив Камского водохранилища, где хорошо выражены глубоководная, мелководная и прибрежная зоны. Ранее авторами уже выполнялись исследования и расчет ряда морфометрических параметров Обвинского залива при разных горизонтах сработки водохранилища [8].

Современные методы проведения геоморфологических исследований невозможны без создания гидрологически корректных ЦМР, однако большинство авторов ограничивается созданием ЦМР участков поверхности суши либо ЦМР дна естественных и искусственных водоемов [2; 7; 13].

Проблема объединения и корректного использования топографических карт и результатов промерных работ рассматривается редко. Вместе с тем оценка морфологических изменений ложа водохранилища невозможна без учета рельефа и водных объектов прилегающей территории. Таким образом, у этой задачи существует два аспекта: методический и тематический (анализ результатов моделирования).

Методический аспект создания ЦМР связан с решением ряда самостоятельных задач, представленных в работах [10; 11], в которых показана значимость учета оптимальных линейных размеров раstra и параметров моделирования водных объектов и их водосборов.

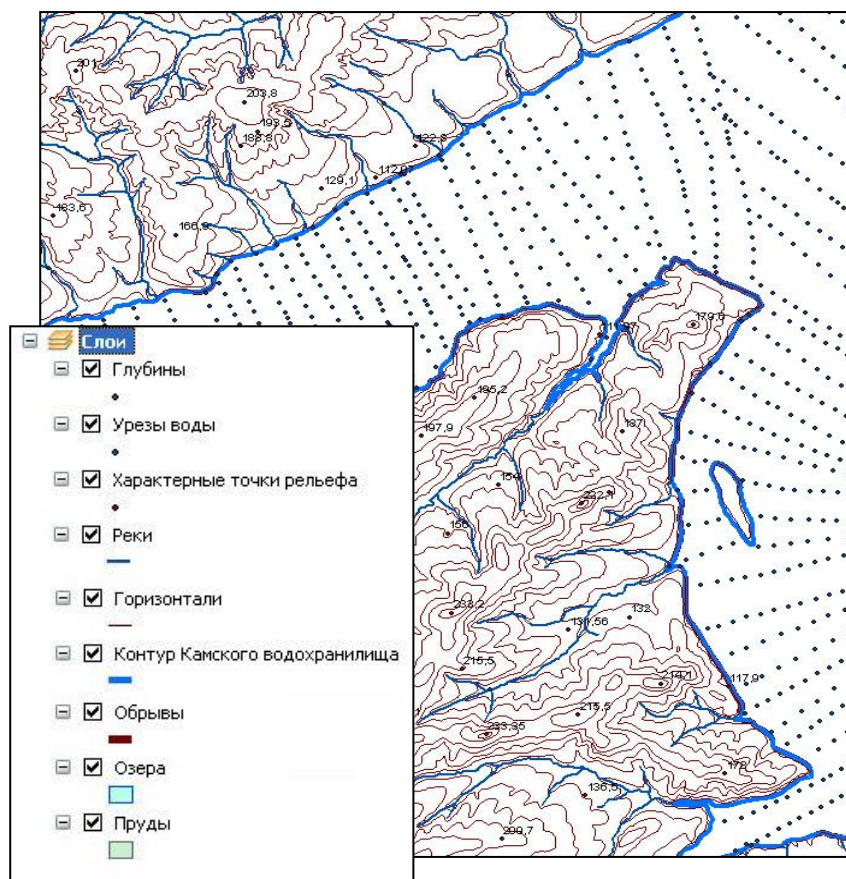


Рис. 2. Послойное представление исходных данных

Определение гидрографических характеристик водных объектов выполняется с использованием топографических карт [12]. Поэтому в качестве исходных данных для создания ЦМР исследуемой территории использованы цифровые топографические карты масштаба 1:100000 и крупномасштабные (1:25000) карты промеров глубин Камского водохранилища, построенные по результатам эхолотной съемки, выполненной Верхнекамским районом водных путей (1993 – 1995 гг.) (рис. 2).

В работах [3; 9; 10] указан перечень природных и антропогенных объектов, влияющих на создание гидрологически корректной ЦМР, а также подробно рассмотрен алгоритм ее создания (рис. 3).

Инструменты пространственного анализа модуля «Гидрология» [14] могут применяться как по отдельности, так и последовательно для построения тальвегов, речной сети (в том числе рельефа дна водохранилища), выделения линий водоразделов, моделирования движения воды по поверхности и т.п. (рис. 4).

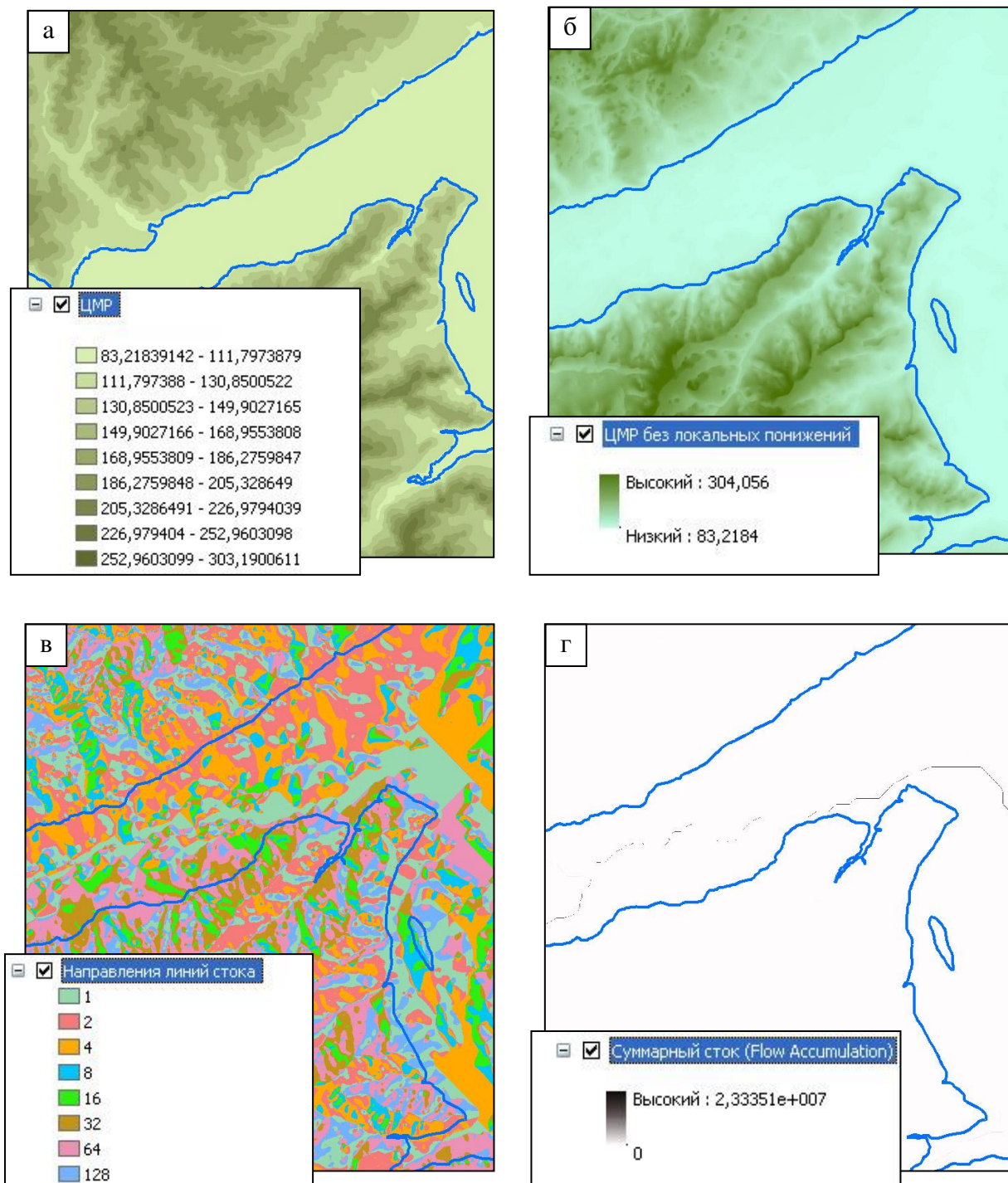


Рис. 3. Последовательность моделирования гидрографических характеристик с использованием модуля «Гидрология»: а – ЦМР; б – ЦМР без локальных понижений; в – направления линий стока (по основным румбам); г – суммарный сток

На рис. 4 представлена модель линий водотока с учетом оптимальных значений линейных размеров ячеек растра ($a=9,13259$), а также пороговых значений сумм направлений стока

($K_r=5548,215$), которые ограничивают длину и количество восстанавливаемых водотоков: чем выше пороговое значение, тем меньше количество водотоков и их длина и наоборот.

В работе [10] показано, что модельная суммарная длина рек, вычисленная при вышеуказанных оптимальных параметрах, равна 211532 м, т.е. отклонение от данных, полученных по топографической карте, составляет 0,52%. Именно при таких параметрах генерализации восстановленная речная сеть практически полностью совпадает с фактической (рис. 4).

Разумно предположить, что найденные параметры дают возможность также корректно восстановить линии тальвегов подводной части рельефа дна водохранилища.

Результаты и их обсуждение

При максимальном понижении уровня Камского водохранилища до горизонта сработки (7,5 м) в Обвинском заливе затопленными остаются только 24,7% общей площади этого участка при НПУ. Отступление уреза воды наблюдается равномерно по обоим берегам и достигает 2,5 км (рис. 4).

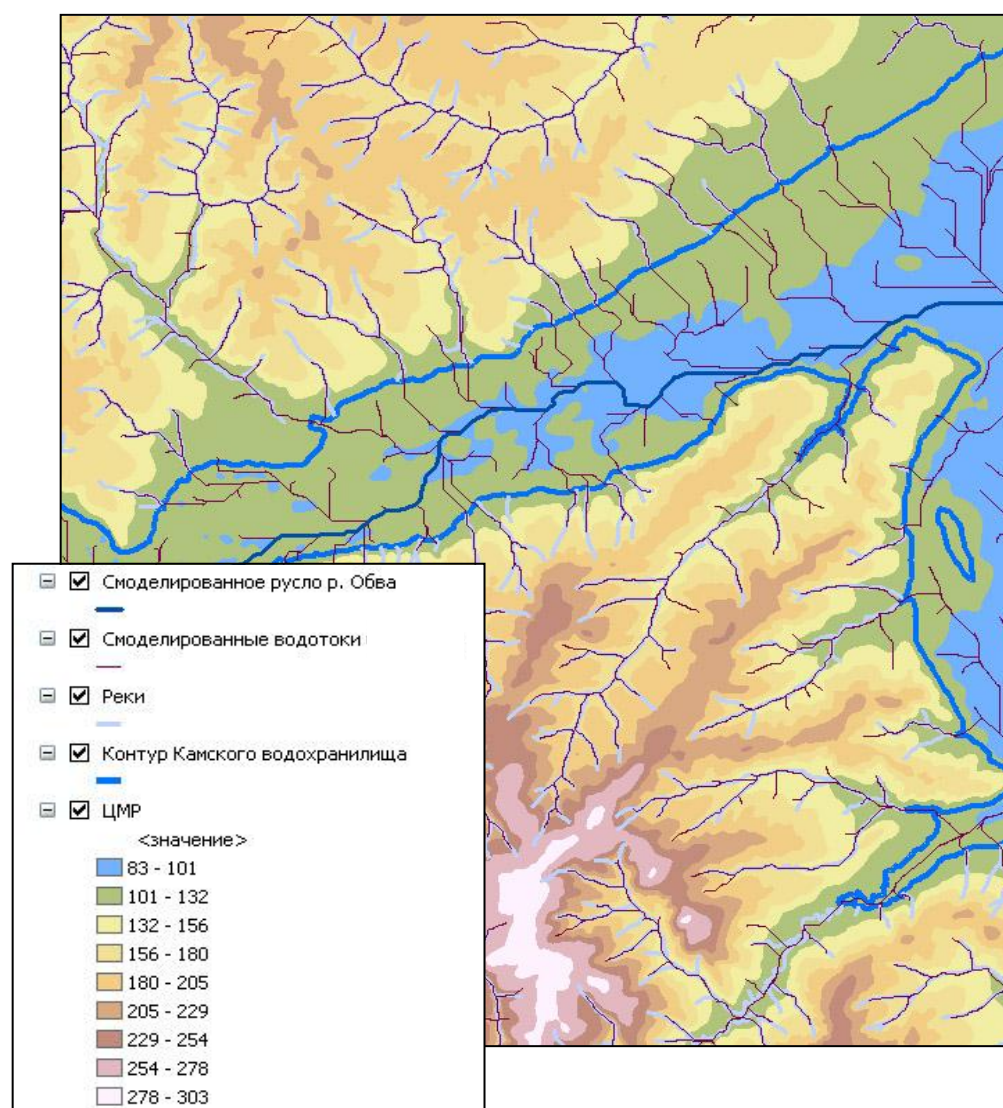


Рис. 4. Исходная и модельная речная сеть при оптимальных значениях линейных размеров ячейки раstra и пороговом значении сумм направлений стока

Смоделированная речная сеть подводной части водохранилища совпадает с формой русла р. Обвы и ее притоков до создания водохранилища (рис. 5). Следует отметить, что «подводные» водотоки были получены не по исходным картам до создания водохранилища, а по картам современных промеров глубин, т.е. эти подводные ложбины стока сохранились до сих пор. Причиной, на наш

взгляд, является глубокая сработка и промывание (восстановление) стоковых ложбин в период снеготаяния перед наполнением водохранилища (рис. 5).

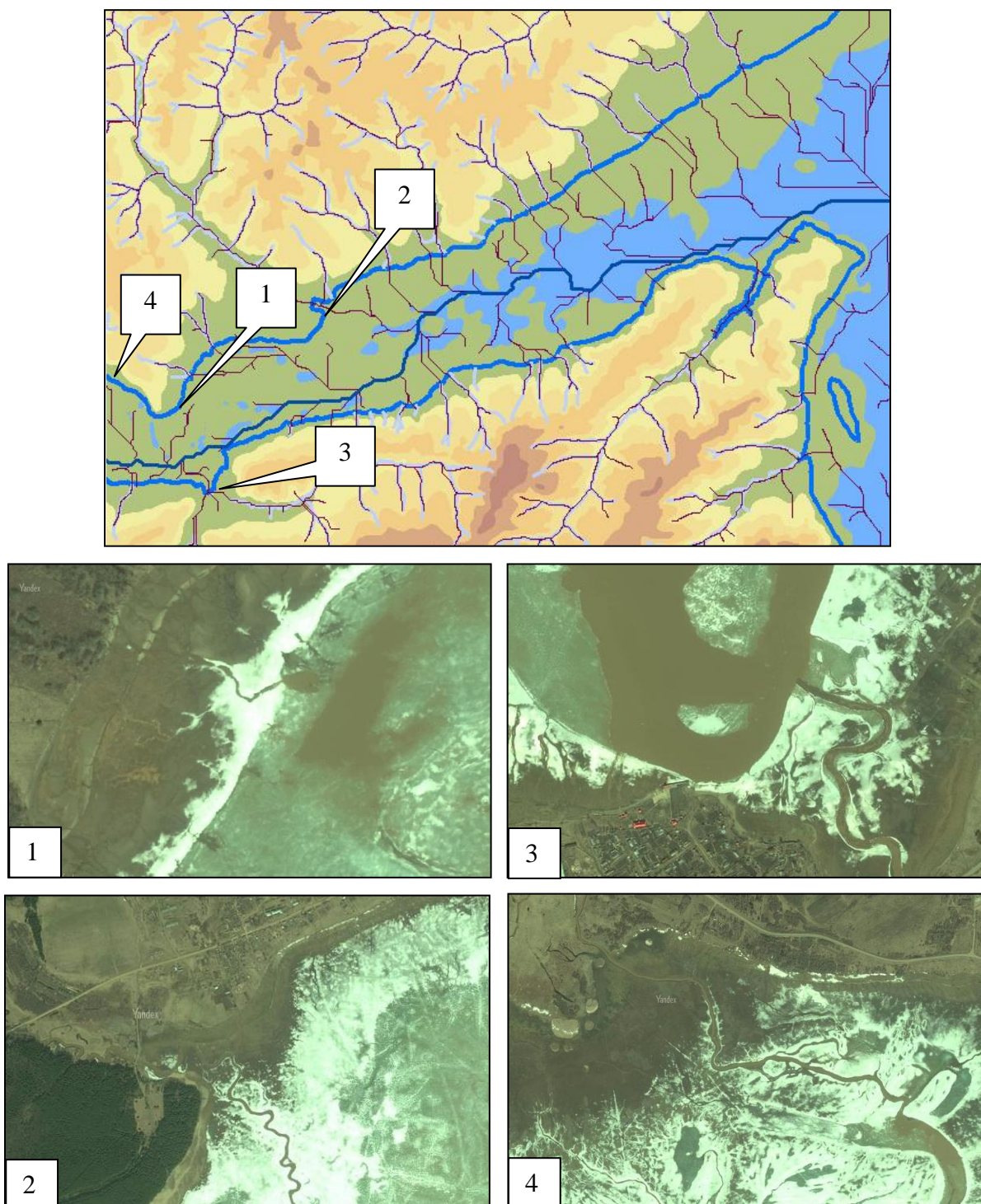


Рис. 5. Соответствие восстановленной речной сети подводной части водохранилища с формой русла р. Обвы и ее притоков при зимней сработке уровня воды: 1, 2, 3, 4 – космические снимки, подтверждающие результаты моделирования

Это предположение подтверждается результатами исследований Н.Н. Назарова [6], посвященных изучению направленности и активности экзодинамических процессов в морфогенезе прибрежных мелководий на Камском водохранилище при низких уровнях воды в весенний период. Им отмечено,

что воздействие временных водотоков, образующихся в результате таяния снежного покрова, на поверхность берегового склона сопровождается формированием промоин и овражков глубиной до 2,5 м, которые «разрезают» вдольбереговые валы, осуществляя этим большую работу по перераспределению наносов в верхней и средней частях абразионных террас. Эти промоины обычно образуются на крутых перегибах свала глубин – в самой нижней части абразионно-аккумулятивной террасы. Борты промоин, как правило, представляют собой вертикальные уступы (рис. 6). Многие овраги, даже находясь в подводном состоянии, большую часть времени года (до 10 месяцев), остаются хорошо морфологически выраженными по прошествии нескольких лет после их образования, т.е. одним из основных процессов, происходящих в аккумулятивной части отмелей, является линейная эрозия [6].



Рис. 6. Овраг, формирующийся на крутом перегибе аккумулятивной части береговой отмели [6]

Здесь речь идет о временных водотоках. В случае же наличия постоянных ручьев и рек, впадающих непосредственно в водохранилище (рис. 5), действие линейной эрозии увеличивается пропорционально размерам этих водотоков.

И.В. Кошмяков и Т.П. Девяткова [4] отмечают, что в водохранилищах над наиболее глубокими частями водоемов, которым соответствуют старые затопленные русла рек, наблюдается сгущение линий тока струй руслового течения. И наиболее сильный промыв затопленных русел происходит в период весеннего половодья на реках, когда уровень водохранилища еще находится на относительно низких отметках.

Выполненное моделирование водотоков, впадающих в Обвинский залив, дает возможность рассчитать изменения длин водотоков и площадей их водосборов, которые происходят при понижении уровня воды в результате зимней сработки (таблица).

Изменение длин водотоков и площадей их водосборов при зимней сработке Обвинского залива

№ п/п	Характеристика	Длина, м		Изменение длины		Площадь, км ²		Изменение площади	
		НПУ	ГС	м	%	НПУ	ГС	км ²	%
1	Сумма	193,62	271,96	78,34	40,46	593,05	656,43	63,38	10,69
2	Средняя	3,46	4,86	1,40	81,30	10,59	14,27	1,38	30,93
3	Максимум	27,66	30,62	5,49	413,34	209,04	234,64	8,11	325,97
4	Минимум	0,00	0,51	0,00	0,00	0,00	0,24	0,00	0,00

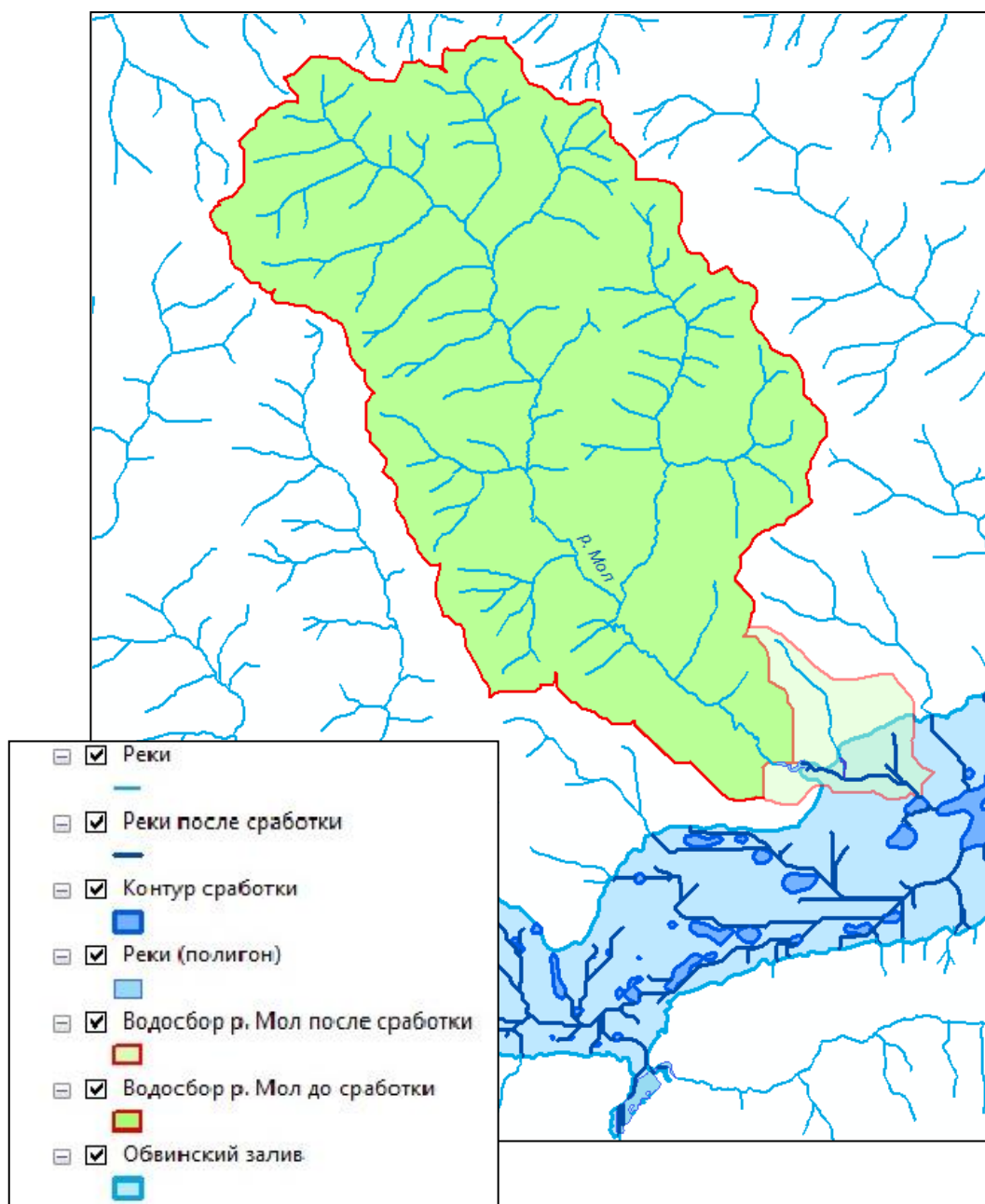


Рис. 7. Увеличение водосбора р. Мол в результате зимней сработки при объединении водосборов двух водотоков

При НПУ количество водотоков, впадающих непосредственно в Обвинский залив, составляло 51, после сработки уровня воды до ГС их количество возросло на 13,73%. Сумма длин водотоков увеличилась более чем на 40%. Суммарная площадь водосборов рек увеличилась на 10,69%, при этом образовалось пять новых водосборов в результате слияния двух, а также два водосбора путем слияния трех и четырех соответственно (рис. 7). Так, р. Мол увеличивает свой водосбор на 7,99%, а суммарная длина водотоков (талвегов) на 19,81% в результате объединения водосборов двух водотоков.

Таким образом, ежегодная глубокая (до 7,5 м) сработка водохранилища способствует сохранению линий тальвегов и общего облика рельефа дна. Получить такой результат стало возможным благодаря разработанному авторами методологическому подходу создания корректной ЦМР на основе объединения топографических карт и материалов детальных промеров глубин.

Библиографический список

1. Калинин В.Г. Водный режим камских водохранилищ и рек их водосбора в зимний сезон: монография. Пермь, 2014. 184 с.
2. Калинин В.Г., Назаров Н.Н., Пьянков С.В., Смиренов С.А., Тюняткин Д.Г. Изучение оползневой деятельности на берегах Камского водохранилища с применением ГИС-технологий // Геоморфология. 2004. №4. С. 55–62.
3. Калинин В.Г., Пьянков С.В. Гидрография. Определение гидрографических характеристик рек и их водосборов с применением цифрового картографического моделирования: учеб. пособие. Пермь, 2013. Ч. II. 71 с.
4. Кошмяков И.В., Девяткова Т.П. О построении плана проточных течений камских водохранилищ // Закономерности формирования, методы расчетов водных и климатических ресурсов. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1982. С. 37–47.
5. Матарзин Ю.М. Гидрология водохранилищ: учебник. Пермь: Изд-во ПГУ, ПСИ, ПССГК, 2003. 296 с.
6. Назаров Н.Н. Эрозионно-аккумулятивный морфолитогенез в зоне сезонной осушки водохранилищ // Современные проблемы науки и образования. 2012. №5. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=7260> (дата обращения: 10.07.2017).
7. Погорелов А.В., Думит Ж.А. Рельеф бассейна р. Кубани: морфологический анализ. М.: ГЕОС, 2009. 208 с.
8. Пьянков С.В., Калинин В.Г. ГИС и математико-картографическое моделирование при исследовании водохранилищ (на примере камских). Пермь: Изд-во ООО «Алекс-Пресс», 2011. 158 с.
9. Пьянков С.В., Калинин В.Г. Гидрография. Создание цифровых моделей рельефа для определения гидрографических характеристик рек и их водосборов: учеб. пособие. Пермь, 2014. Ч. 1. 63 с.
10. Пьянков С.В., Калинин В.Г. Определение оптимальных параметров растровой модели при расчете гидрографических характеристик водных объектов // Интеркарто/ИнтерГИС-21. Устойчивое развитие территорий: картографо-геоинформационное обеспечение: мат. Межд. науч. конф. Краснодар, 2015. С. 282–288.
11. Пьянков С.В., Калинин В.Г. Метод вычисления линейных размеров раstra и порогового значения сумм направлений стока при построении гидрологически корректных ЦМР // Географический вестник=Geographical bulletin. 2017. №1(40). С. 138–145. doi 10.17072/2079-7877-2016-3-71-78.
12. Руководство по определению гидрографических характеристик картометрическим способом. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 92 с.
13. Яковченко С.Г. Создание геоинформационных систем в инженерной гидрологии: дис. ... д-ра техн. наук. Барнаул, 2007. 406 с.
14. ПО «ArcGIS Spatial Analyst» [Электронный ресурс]. URL: <http://dataplus.ru/products/spatialanalyst/detail/review> (дата обращения: 10.07.2017).

References

1. Kalinin, V.G., (2014), *Vodnyj rezhim kamskih vodohranilishch i rek ih vodosbora v zimnij sezon* [Water regime of Kama reservoirs and rivers of their basin in winter period], Perm, Russia.
2. Kalinin, V.G., Nazarov, N.N., Pyankov, S.V., Simirenov, S.A. and Tynyatkin, D.G., (2004) “Activity of the landslide on the bank of the Kamskoe storage reservoir according to stationary measurements and gis-technology application”, *Geomorphology*, no. 4, pp. 55–62. DOI:10.15356/0435-4281-2004-4-55-62.
3. Kalinin, V.G. and P'jankov, S.V., (2013), *Gidrografija. Opredelenie gidrograficheskikh harakteristik rek i ih vodosborov s primeneniem cifrovogo kartograficheskogo modelirovaniya* [Hydrography. Determination of hydrographic characteristics of rivers and their watersheds using digital cartographic modeling], Perm, Russia.
4. Koshmyakov, I.V. and Devyatкова, T.P., (1982) *O postroenii plana protochnyh techenij kamskih vodohranilishch* " *Zakonomernosti formirovaniya, metody raschetov vodnyh i klimaticheskikh resursov* [Regularities of formation, methods of calculating water and climate resources], Perm, Russia, pp. 37–47.
5. Matarzin, Yu.M. (2003), *Gidrologiya vodohranilishch* [Hydrology of reservoirs], Perm, Russia.
6. Nazarov, N.N., (2012), "Erozionno-akkumulyativnyj morfolitogenez v zone sezonnoj osushki vodohranilishch" *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. Science education [Modern problems of science and education] [Electronic], no. 5, available at: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=7260> (accessed: 10.07.2017).

7. Pogorelov, A.V. and Dumit, Zh.A., (2009), *Rel'ef bassejna r. Kubani: morfologicheskij anali* [Relief of the Kuban river basin: morphological analysis], Moscow, Russia.

8. P'yankov, S.V. and Kalinin, V.G. (2011), *GIS i matematiko-kartograficheskoe modelirovanie pri issledovanii vodohranilishch (na primere kamskih)* [GIS and mathematical-cartographic modeling in the study of reservoirs (on example of Kama)], Perm, Russia.

9. P'jankov, S.V. and Kalinin, V.G. (2014), *Gidrografija. Sozdanie cifrovyyh modelej rel'efa dlja opredelenija gidrograficheskikh harakteristik rek i ih vodosborov* [Hydrography. Creation of digital terrain models for determining the hydrographic characteristics of rivers and their catchments], Perm, Russia.

10. P'jankov, S.V. and Kalinin, V.G., (2015), "Opredelenie optimalnyh parametrov rastrovoy modeli pri raschete gidrograficheskikh harakteristik vodnyh obektov" *Proc. of the International scientific conference "Interkarto / InterGIS-21. Ustojchivoe razvitie territorii: kartografo-geoinformacionnoe obespechenie"*, Kuban state university, Krasnodar, pp. 282–288.

11. P'yankov, S.V. and Kalinin, V.G., (2017), Calculation method for raster linear size threshold value for the sum of runoff directions when constructing hydrologically correct DEM, *Geographical bulletin*, no.1(40), pp. 138–145. doi 10.17072/2079-7877-2016-3-71-78

12. Rukovodstvo po opredeleniju gidrograficheskikh harakteristik kartometricheskim sposobom (1986), [Guidelines for determining the hydrographic characteristics by the cartometric method], Leningrad, USSR.

13. Jakovchenko, S.G., (2007), *Sozdanie geoinformacionnyh sistem v inzhenernoj gidrologii*. Ph.D. dissertation of technical science, Barnaul, Russia.

14. ПО «ArcGIS Spatial Analyst» [Online], Retrieved from: <http://dataplus.ru/products/spatialanalyst/detail/review> (Accessed 10.07.2017).

Поступила в редакцию: 19.04.2017

Сведения об авторах

About the authors

Калинин Виталий Германович,

доктор географических наук, профессор кафедры картографии и геоинформатики, Пермский государственный национальный исследовательский университет; Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15

e-mail: vgakalinin@gmail.com

Vitaliy G. Kalinin

Doctor of Geographical Sciences, Professor, Department of Cartography and Geoinformatics, Faculty of Geography, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia

Пьянков Сергей Васильевич

доктор географических наук, заведующий кафедрой картографии и геоинформатики, Пермский государственный национальный исследовательский университет; Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15

e-mail: pyankovsv@gmail.com

Sergey V. Pyankov

Doctor of Geographical Sciences, Head of the Department of Cartography and Geoinformatics, Faculty of Geography, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia

Перевощикова Ольга Анатольевна

ассистент кафедры картографии и геоинформатики, Пермский государственный национальный исследовательский университет; Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15

e-mail: perevoshchikova@mail.ru

Olga A. Perevoshchikova

Postgraduate Student, Department of Cartography and Geoinformatics, Faculty of Geography, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Калинин В.Г., Пьянков С.В., Перевощикова О.А. О формировании подводного рельефа дна долинных водохранилищ (на примере Камского) // Географический вестник = Geographical bulletin. 2018. №1(44). С.128–137. doi 10.17072/2079-7877-2018-1-128-137

Please cite this article in English as:

Kalinin V.G., Pyankov S.V., Perevoshchikova O.A. On the formation of the underwater relief of valley reservoirs (by the example of the Kama Reservoir) // Geographical bulletin. 2018. №1(44). P. 128–137. doi 10.17072/2079-7877-2018-1-128-137