

**Национальный центр космических исследований и технологий
Алма-Ата, Казахстан**

**Анализ прорыва плотины
Сардобинского водохранилища на
основе многолетних временных рядов
радарных и оптических данных и
методов моделирования**

Архипкин О.П., Крыленко И.Н., Сагатдинова Г.Н.

**18 Всероссийская открытая конференция «Современные
проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»,
Москва, 16-20 ноября 2020 года.**

Анализ прорыва плотины Сардобинского водохранилища на основе многолетних временных рядов радарных и оптических данных

Прорыв 1 мая 2020 года плотины Сардобинского водохранилища, расположенного на территории Узбекистана, привел к катастрофическому наводнению и затоплению больших площадей в Узбекистане и Казахстане с нанесением им существенного ущерба. Это вызвало большой резонанс и поставило вопрос о выяснении причин, приведших к этой катастрофе. Свой вклад в выяснение возможных причин этого вносят и данные космического мониторинга. Этому способствует появлением в последние годы в свободном доступе оптических (Landsat-8, Sentinel-2A и 2B) и радарных (Sentinel-1A и 1B) данных среднего разрешения. Они появились как раз когда шло строительство, заполнение и начало работы водохранилища, которое вступило в строй в 2017 году, что позволило отследить эти этапы. Первые годы строительства (2010-2012) можно было наблюдать с помощью данных Landsat-5 и Landsat-7.

В октябре 2010 года стали уже проявляться первые контуры строительства, но тело плотины еще не фиксировалось, а в апреле 2011 уже проглядывалась северо-восточная часть тела плотины. В апреле 2012 фиксировалось строительство восточной части плотины. В декабре 2013 года вся северная и большая часть восточного тела плотины были. К октябрю 2014 года была построена западная часть тела плотины как раз до места прорыва 2020 года, а 3 ноября уже фиксировалась вся западная часть плотины ниже и включая место прорыва. Это состояние плотины фиксировалось вплоть до 2 апреля 2015 года, и лишь 2 мая была зафиксирована часть плотины выше прорыва.

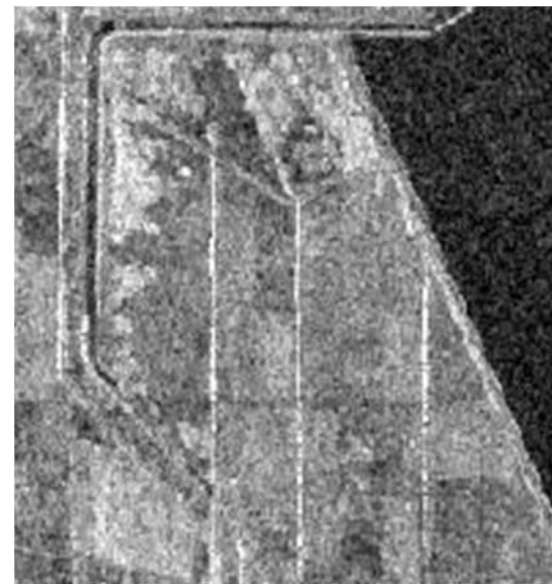
Что касается заполнения водохранилища, то здесь также есть интересная информация. К 20 мая 2015 года северо-западная часть водохранилища была заполнена как раз до места прорыва. В таком состоянии она пребывала и 13 июня 2015 года. При этом контур заполнения в точности совпадал с контуром после прорыва.

Следующий важный момент зафиксирован в 2020 году. Уже с 4 февраля уровень водохранилища превысил отметку 50 кв. км, а с 15 марта и до прорыва он был выше 55 кв. км. Это фактически на максимальном уровне.

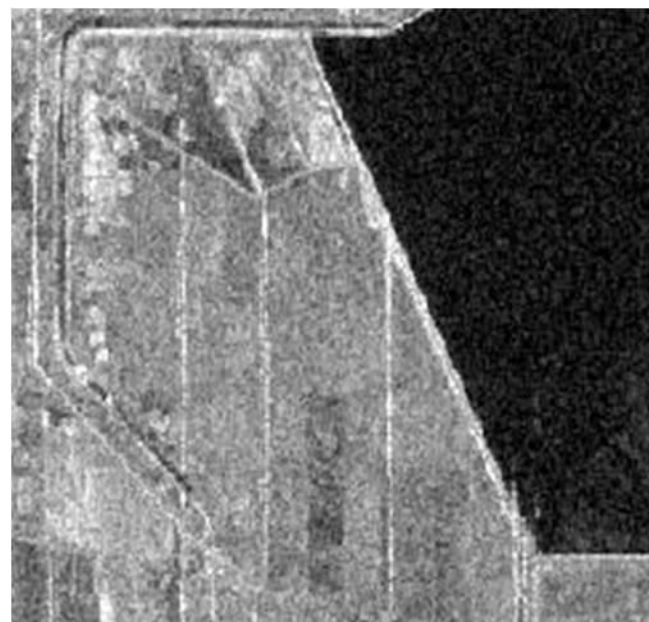
Ретроспективный анализ строительства, заполнения и режима эксплуатации Сардобинского водохранилища по данным среднего разрешения за 2010-2020 годы



**Sentinel – 1,
3 ноября 2014 г.
Западная часть
плотины севернее
прорыва
постороена**



**Sentinel – 1,
2 апреля 2015 г.
Западная часть
плотины южнее
прорыва ещё не
строится**



**Sentinel – 1,
2 мая 2015 г.
Западная часть
плотины
южнее прорыва
построена**



**Sentinel – 1,
20 мая 2015 г.
Западная часть
плотины
южнее прорыва
заполнена**

Ретроспективный анализ строительства, заполнения и режима эксплуатации Сардобинского водохранилища по данным среднего разрешения за 2010-2020 годы



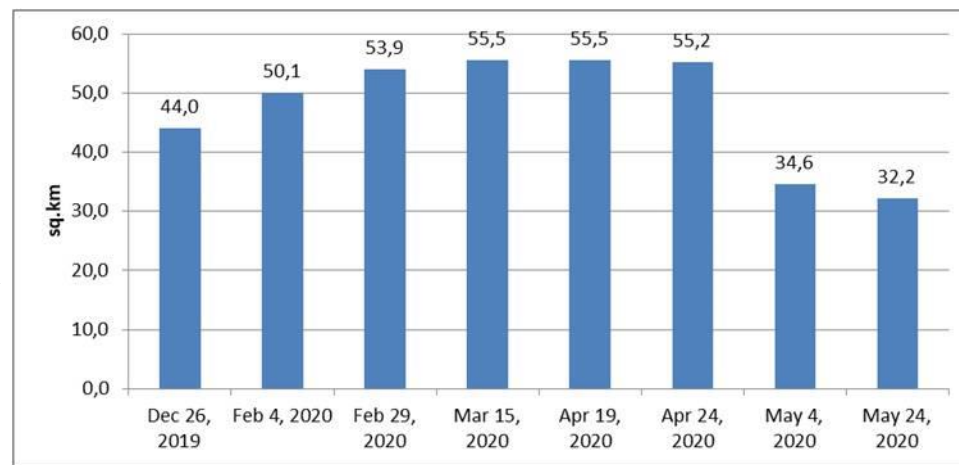
**Sentinel – 1,
13 июня 2015 г.
Западная часть
плотины
южнее прорыва
заполнена
аналогично**



**Sentinel – 2
4 мая 2020 года
после прорыва.
Конфигурация
фактически
совпадает**



**Landsat-8,
декабря 2015 г.
Западная часть
плотины
южнее прорыва
заполнена
почти
аналогично**

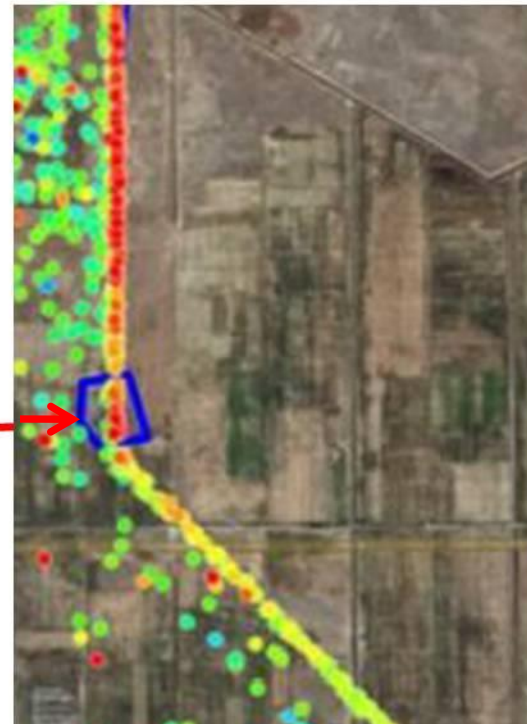
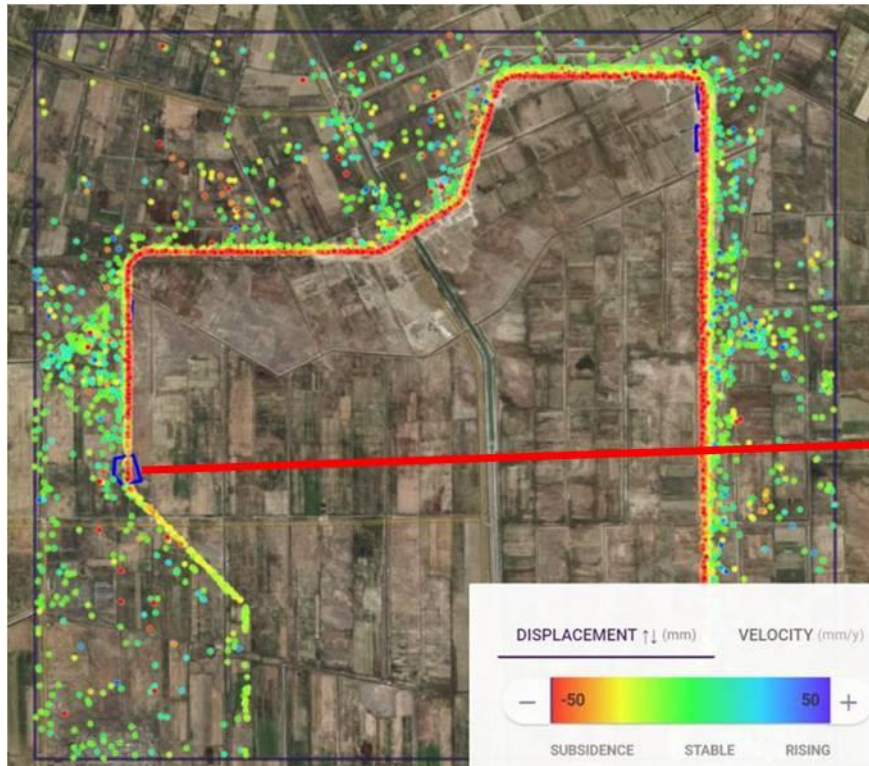


**Динамика площади водной поверхности
Сардобинского водохранилища.
Почти два месяца на максимальном уровне**

ВЫВОДЫ

Вероятными могут быть следующие причины или их совокупность. Западная часть тела плотины севернее прорыва была построена существенно раньше ее южной части ниже прорыва. Также часть севернее прорыва на несколько месяцев раньше была заполнена водой. Возможно, также сказалось, что перед прорывом уровень заполнения водохранилища был максимальным или близким к нему в течение длительного времени в марте и апреле. В результате на стыке могли возникнуть деформации тела плотины, приведшие к прорыву.

Санджай Гири, Геннадий Донциц, Марк Хегнауэр
Независимый исследовательский институт DELTARES, Нидерланды



Результат обработки InSAR, показывающий относительную деформацию плотины (красные точки обозначают оседание) на основе анализа изображений с января 2019 Г.

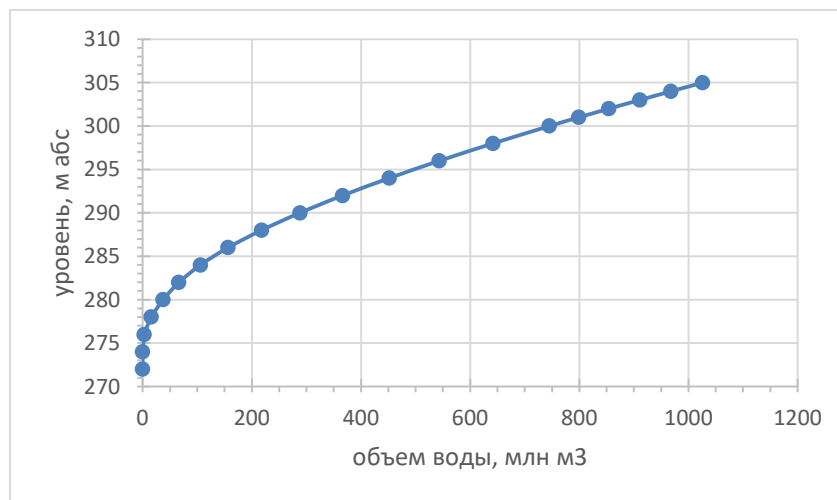
Анализ прорыва плотины Сардобинского водохранилища на основе методов моделирования

Проведено также исследование прорыва с помощью программы моделирования FLO-2D, свободно распространяемой в интернете. Здесь также использовались многолетние временные ряды поверхности заполнения водохранилища, которые позволили сформировать на базе SRTM рельеф его дна, а также построить кривую объемов водохранилища и оценить потери воды в результате катастрофы. В итоге получено, что до прорыва было 854 млн.м³, а после осталось 156 млн. м³, что близко к величинам, полученными в других работах. Кривая объемов водохранилища использовалась при моделировании как входные данные для расчета расходов воды в проране. Расходы воды в проране достигали большой величины (почти 16000 м³/с), а это, к примеру, уже больше расходов такой реки как Ока в сильное половодье.

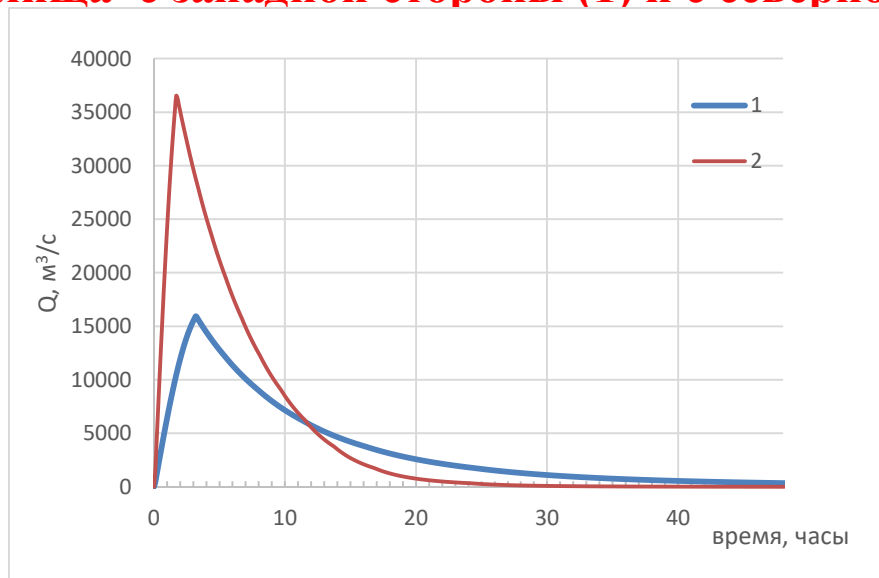
Выполнены сценарные расчеты характеристик затопления, опасности затопления и времени добегания для фактически случившегося прорыва водохранилища. Проведено сценарное моделирование прорывного паводка в случае, если бы проран сформировался в северной части плотины Сардобинского водохранилища. Показано, что данный сценарий значительно превосходит по опасности затопления фактически случившийся паводок. По результатам моделирования на основе программного комплекса FLO_2D для обоих сценариев были получены глубины затопления, скорости течения, время добегания, оценена опасность затопления в баллах для территории, прилегающей к Сардобинскому водохранилищу, для каждого из сценариев за 7 суток от момента прорыва.

Максимальный расход по результатам расчетов при первом сценарии составляет 15 900 м³/с и наблюдается через 3,2 ч. от начала прорыва, при втором сценарии максимальный расход составляет 36 515 м³/с и наблюдается через 1,7 ч. от начала прорыва.

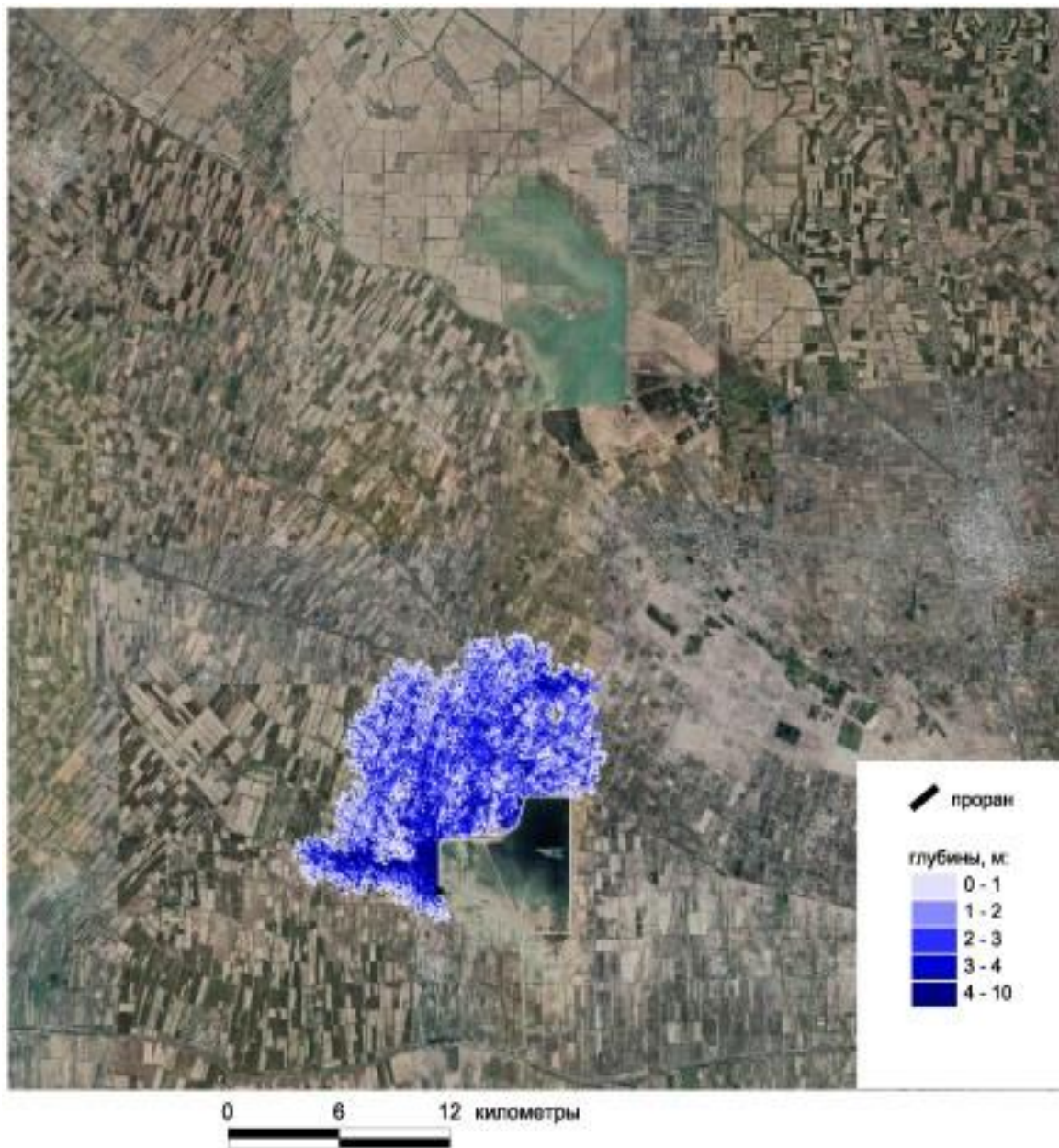
Кривая объемов Сардобинского водохранилища, построенная по данным цифровой модели рельефа SRTM и многолетней динамики его заполнения по данным среднего разрешения



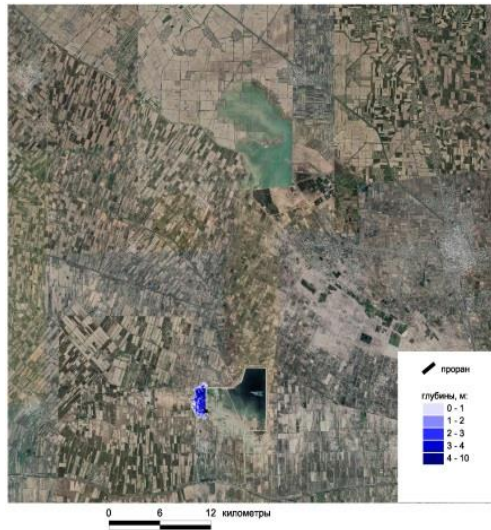
Расчитанные гидрографы излива при прорыве плотины Сардобинского водохранилища с западной стороны (1) и с северной стороны (2)



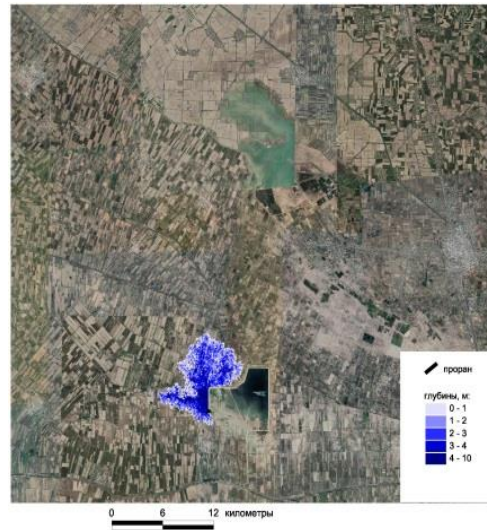
Результат моделирования затопления территории через 6 часов от момента прорыва плотины Сардобинского водохранилища



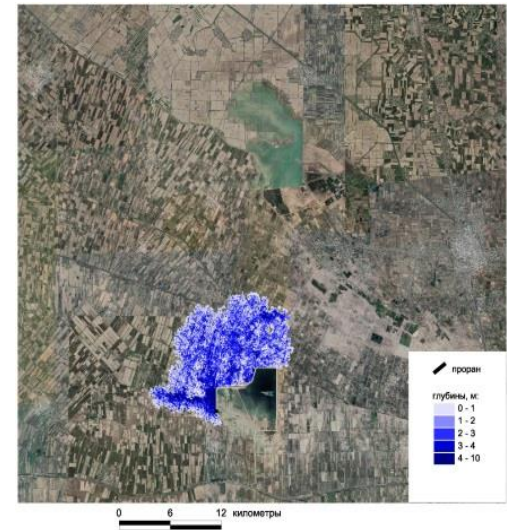
Динамика затопления территории от момента прорыва плотины Сардобинского водохранилища (в часах)



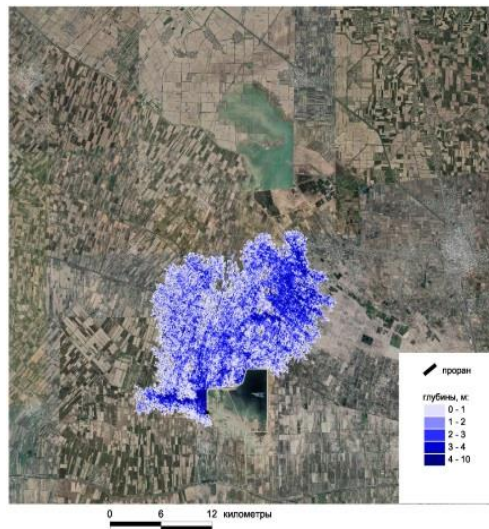
001



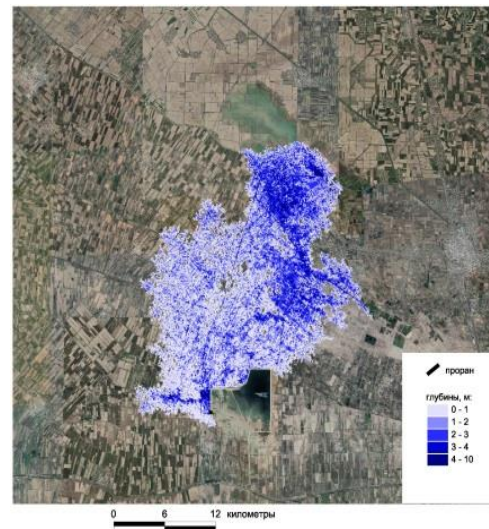
003



006

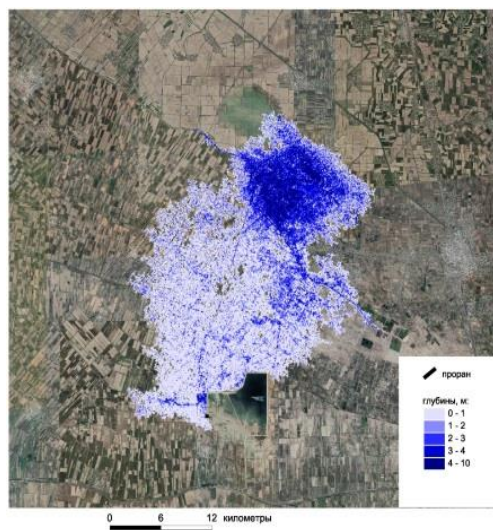


012

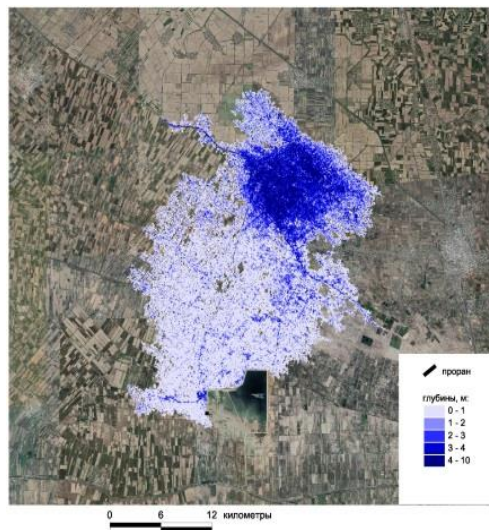


024

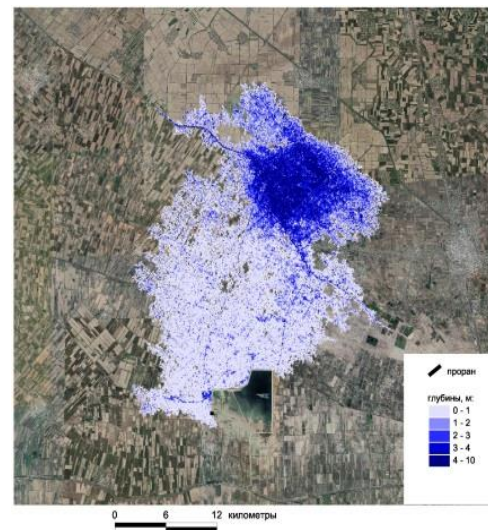
Динамика затопления территории от момента прорыва плотины Сардобинского водохранилища (в часах)



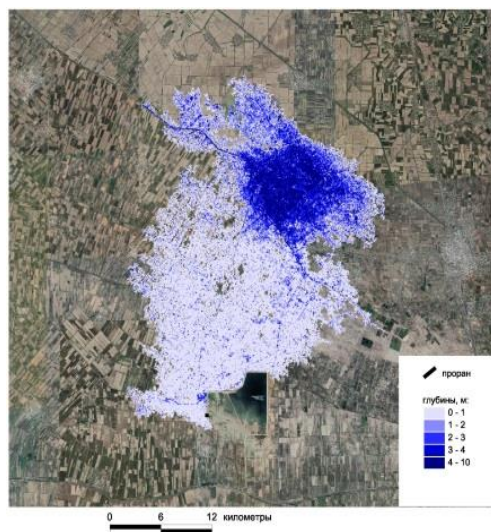
048



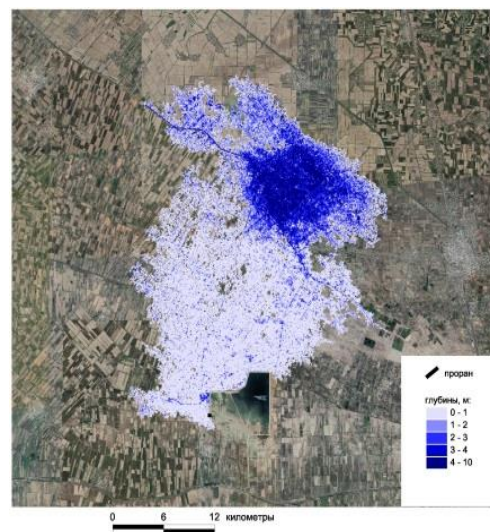
072



096

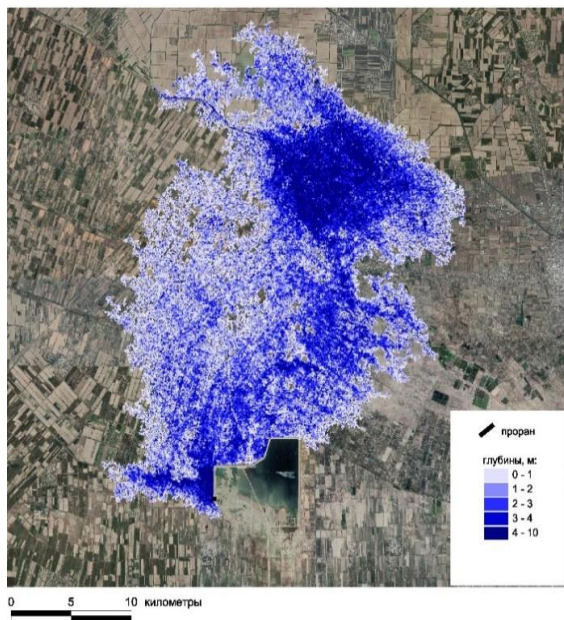


144

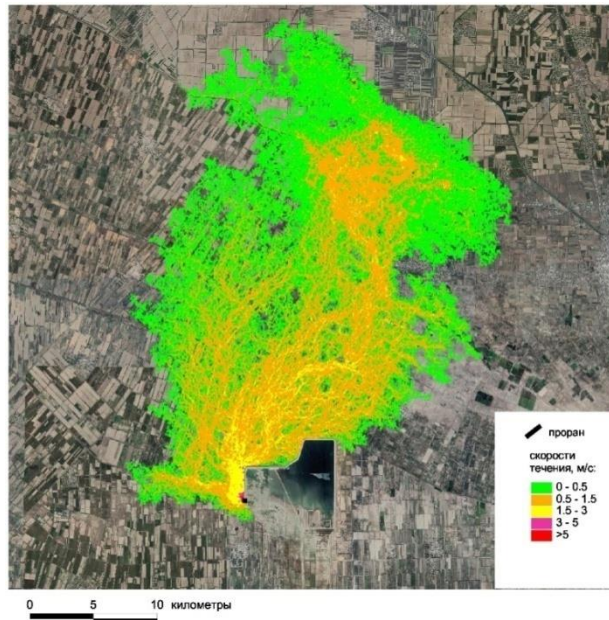


168

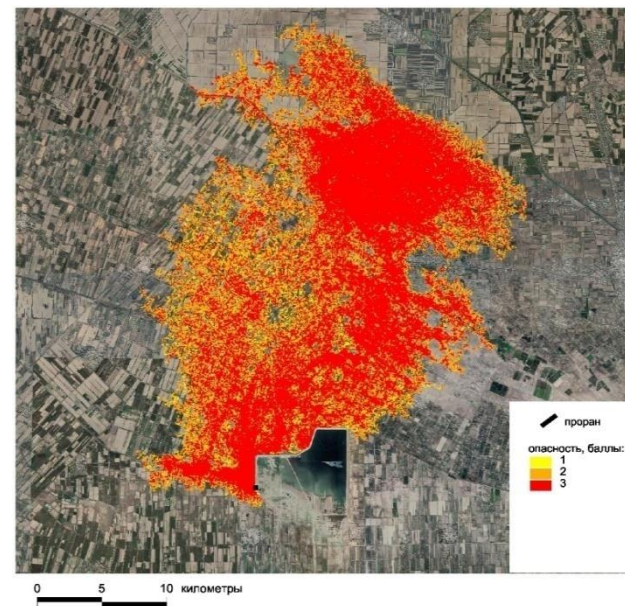
Максимальные глубины, скорости течения, опасность затопления при прорыве плотины Сардобинского водохранилища



максимальные глубины



скорость течения



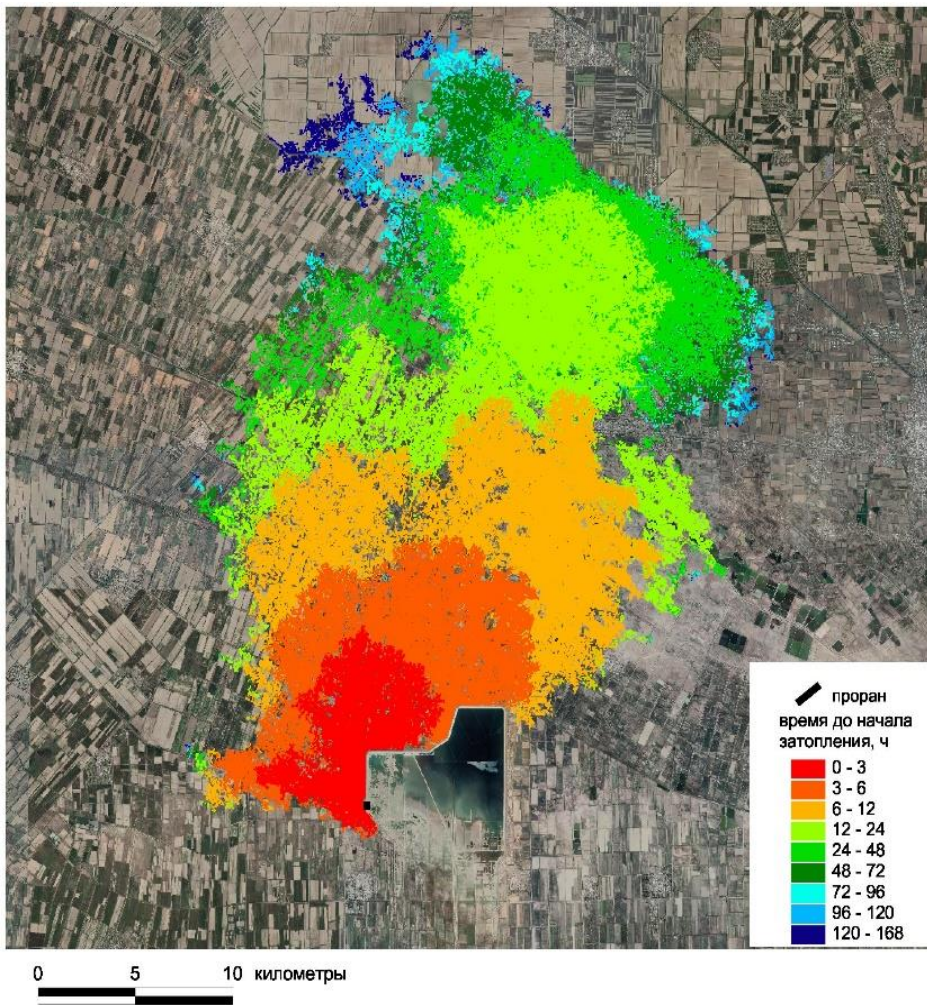
опасность затопления

Метод расчета баллов опасности на затопляемой территории

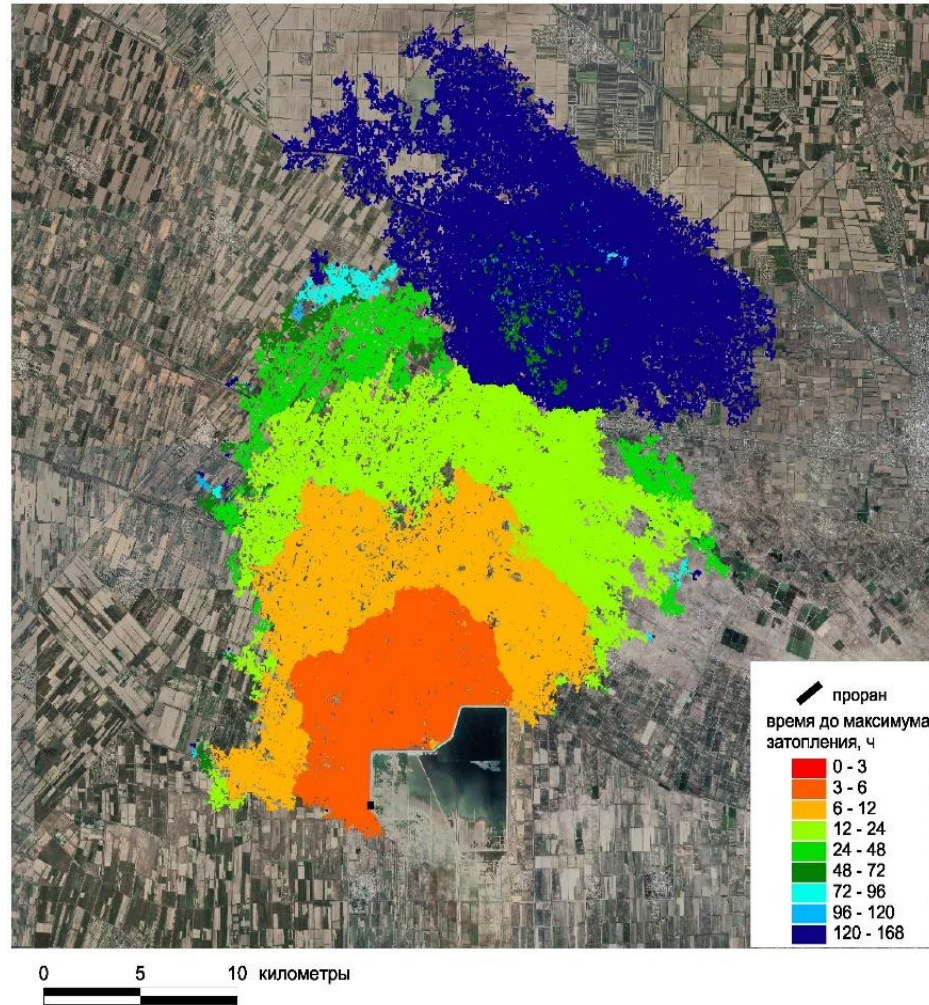
Water flood event intensity	Maximum depth h (mts)	Logical operation	Product of maximum velocity (v) times maximum depth [h] [mts ² /s]
High	<input type="text" value="h"/> \geq <input type="text" value="1.5"/>	OR	<input type="text" value="vh"/> \geq <input type="text" value="1.5"/>
Medium	<input type="text" value="0.5"/> \leq h $<$ 1.5	OR	<input type="text" value="0.5"/> \leq vh $<$ 1.5
Low	<input type="text" value="0.1"/> \leq h $<$ 0.5	AND	<input type="text" value="0.1"/> \leq vh $<$ 0.5

Наибольшие глубины затопления (до 5-6 м) наблюдаются в прилегающей к плотине части, а также в понижении рельефа на севере. В скоростном поле прослеживается линия наибольших скоростей (больше 1.5 м/с) при обтекании потоком плотины с запада на север. На значительной части максимальные скорости течения также существенны (0.5–1.5 м/с). На большей части затопляемой территории наблюдается 3й (наибольший) балл опасности затопления. Значительная часть рассматриваемой территории (до 20 км. от плотины) была затоплена в первые 12 часов., за 24 часа основная зона затопления уже была покрыта водой. В дальнейшем наблюдалось перетекание воды в северном направлении, и максимальные глубины там наблюдались после 5 суток.

Время от момента прорыва плотины Сардобинского водохранилища до начала затопления и до максимальной глубины

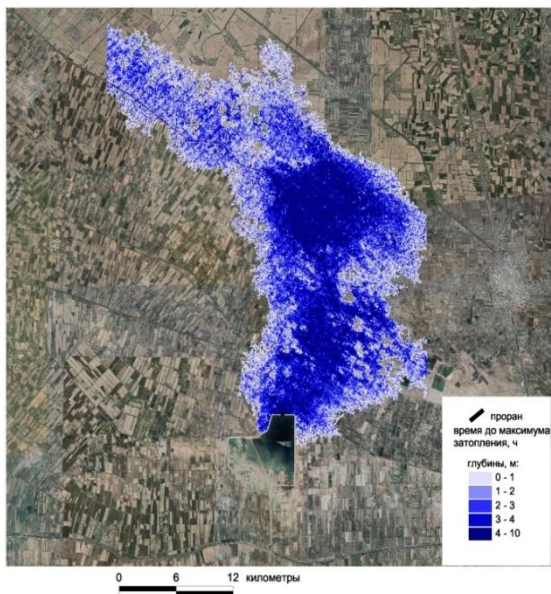


время от момента прорыва до начала затопления

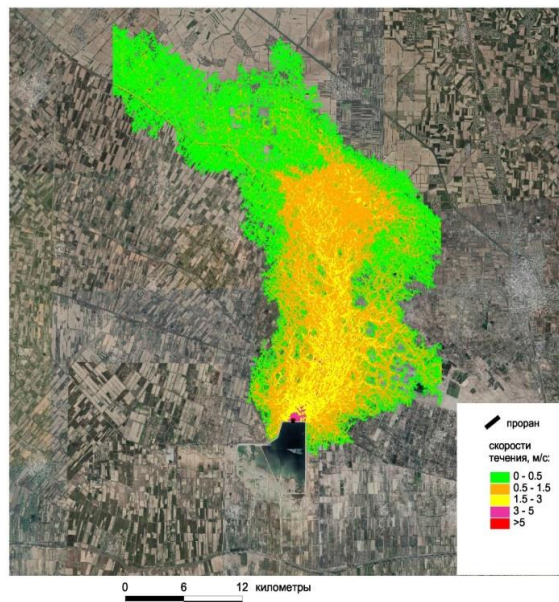


время от момента прорыва до максимальной глубины

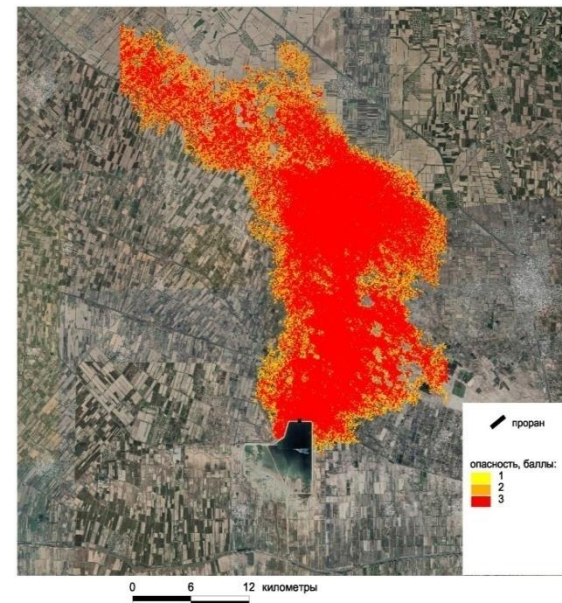
Максимальные глубины, скорости течения, опасность затопления при гипотетическом прорыве плотины Сардобинского водохранилища с севера



максимальные глубины



скорость течения



опасность затопления

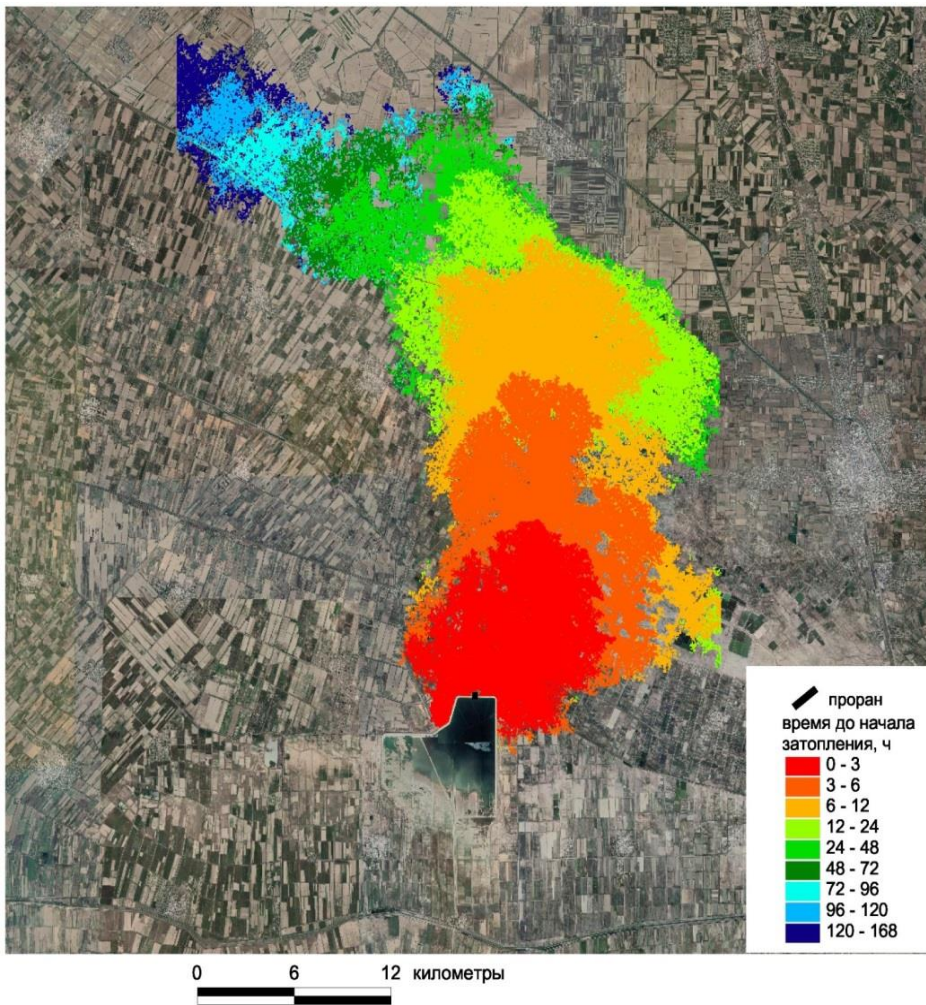
Метод расчета баллов опасности на затопляемой территории

Water flood event intensity	Maximum depth h (mts)	Logical operation	Product of maximum velocity (v) times maximum depth [h] (mts ² /s)
High	$h \geq 1.5$	OR	$vh \geq 1.5$
Medium	$0.5 \leq h < 1.5$	OR	$0.5 \leq vh < 1.5$
Low	$0.1 \leq h < 0.5$	AND	$0.1 \leq vh < 0.5$

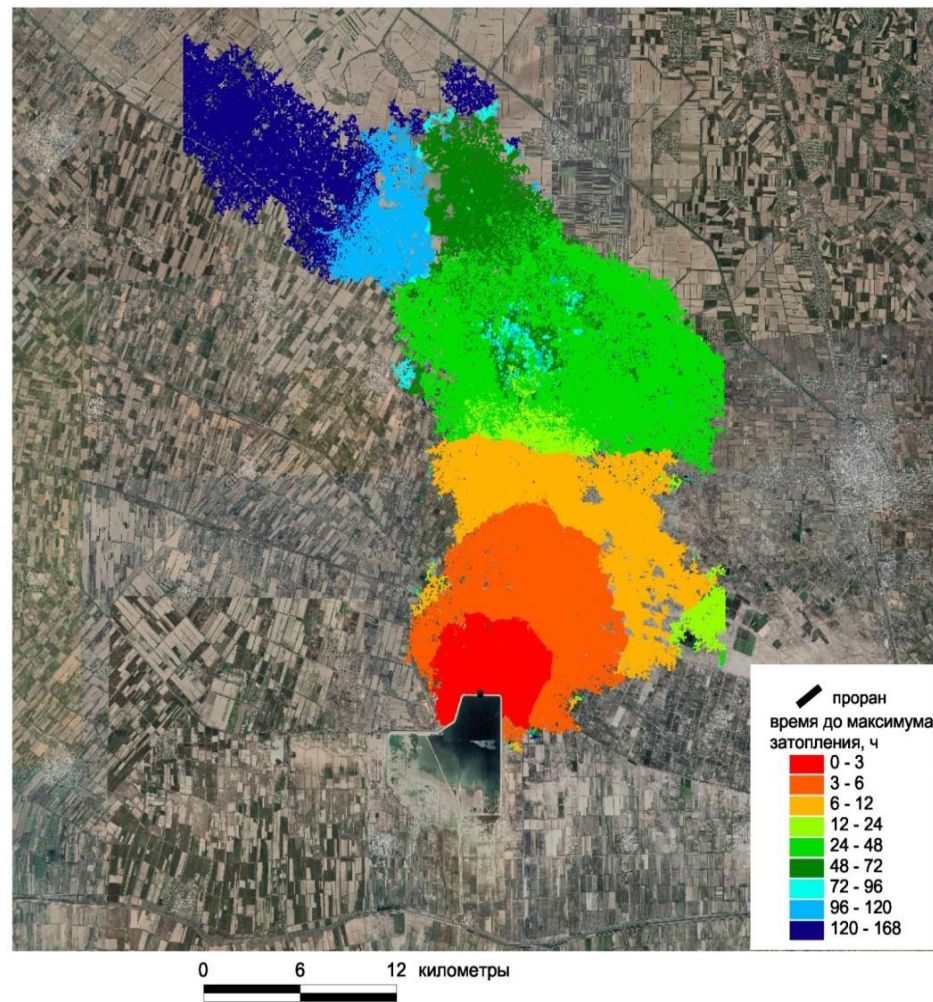
Основная зона затопления наблюдается к северу от плотины, воды прорывного паводка распространяются далее на северо-запад. Наблюдаются глубины более 4 м и скорости течения более 1.5м/с и максимальный балл опасности в практически для всей зоны затопления. На расстоянии 25 км от плотины затопление начинается менее чем через 12 ч от прорыва

По сравнению с фактическим паводком данный сценарий в связи с более высокими расходами излива существенно превышает по глубинам, скоростям течения фактически случившийся паводок и характеризуется меньшим временем добегаания.

Время от момента прорыва плотины Сардобинского водохранилища до начала затопления и до максимальной глубины при гипотетическом прорыве с севера



**время от момента прорыва до
начала затопления**



**время от момента прорыва до
максимальной глубины**