

## АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ЗОН ФАКТИЧЕСКОГО ЗАТОПЛЕНИЯ МЕСТНОСТИ ПРИ РАЗЛИВАХ РЕК НА ОСНОВЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ И АНАЛИЗА ХАРАКТЕРНЫХ ТОЧЕК РЕЛЬЕФА

О.А. Ефремова<sup>1</sup>, Ю.Н. Кунаков<sup>1</sup>, С.В. Павлов<sup>1</sup>, А.Х. Султанов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

### Аннотация

Статья посвящена проблеме организации совместной обработки пространственных данных в виде цифровых карт и космических снимков в составе программного комплекса органов исполнительной власти для поддержки принятия решений в противопаводковый период. Авторами проведен анализ проблемы построения зон затоплений на основе использования космических снимков и геоинформационных технологий. В работе описан алгоритм построения зон фактического затопления местности при разливах рек на основе радиолокационных космических снимков и анализа характерных точек рельефа, позволяющий повысить точность привязки снимка при малом числе опорных точек. В рамках проведенного экспериментального исследования была показана эффективность применения данного алгоритма: точность совмещения водной поверхности реки, полученной с космического снимка и с цифровой топографической карты с применением предложенного авторами алгоритма, повысилась на 40 %.

**Ключевые слова:** пространственные данные, зоны затопления, космические снимки, опорные точки, цифровые карты, программный комплекс, алгоритм обработки пространственных данных.

**Цитирование:** Ефремова, О.А. Алгоритм построения зон фактического затопления местности при разливах рек на основе радиолокационных космических снимков и анализа характерных точек рельефа / О.А. Ефремова, Ю.Н. Кунаков, С.В. Павлов, А.Х. Султанов // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 4. – С. 695-703. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-4-695-703.

### Введение

Одной из важнейших проблем при управлении крупными территориями является затопление территорий промышленных объектов, которое может привести к повреждению или разрушениям инфраструктуры предприятий, нарушениям производственного цикла, выбросам загрязняющих веществ в окружающую среду [1]. Для снижения рисков, связанных с негативным воздействием окружающей среды на опасные производственные объекты в период весеннего половодья, необходимо осуществлять комплекс мероприятий, который включает в себя определение границ зон затоплений (ЗЗ). При этом основным фактором, влияющим на качество принимаемых решений по обеспечению промышленной безопасности, является наличие актуальной, полной, точной и достоверной информации об объектах и изменениях состояния окружающей среды.

Для решения задачи поддержки принятия решений органов исполнительной власти в период паводков необходима полная и достоверная информация о состоянии водных объектов, уровнях воды на гидрологических постах наблюдения (ГПН), рельефе местности, населённых пунктах, хозяйственных и промышленных объектах, расположенных в прибрежных зонах и находящихся под угрозой затопления [2].

Однако ограниченное число ГПН (например, на территории Республики Башкортостан всего 41 ГПН, передающих данные ежесуточно) и недостаточное качество информации о водных объектах и рельефе

местности снижает достоверность оценок текущей и прогнозируемой паводковой ситуации на всей территории в целом. Исходя из этого, для повышения оперативности и качества принимаемых решений более полезными оказываются космические системы наблюдения, способные предоставлять оптические и радиолокационные космические снимки (КС) с фактическими изображениями зон затопления в оперативном режиме с высоким пространственным разрешением. Обобщенная схема технологического процесса определения зон затопления по геопрограммным данным представлена на рис. 1.

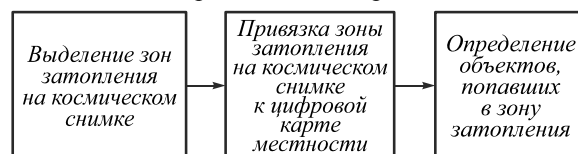


Рис. 1. Обобщенная схема технологического процесса определения зон затопления по геопрограммным данным

Для обработки значительного объема информации о пространственно-распределенных объектах в период динамически изменяющейся паводковой ситуации и последующего оперативного принятия противопаводковых мер необходимо автоматизировать процесс расчета параметров зон затоплений, для чего предлагается разработать программный комплекс для органов исполнительной власти, позволяющий осуществлять совместную обработку цифровых карт и космических снимков [3, 4].

Исследованию и решению подобного рода задач, связанных с оценкой, прогнозированием паводковой ситуации и формированием информационной поддержки соответствующих управленческих решений, посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых и специалистов [5–12]. Однако в методах построения зон затоплений, основанных на использовании цифровых топографических карт местности, недостаточно рассмотрены проблемы совместной обработки разнотипной пространственной информации, такой как цифровые карты местности, космические снимки и данные с ГПН.

Так, при организации их совместной обработки возникает значительная погрешность совмещения информации о ЗЗ, выделенных на КС, с цифровыми картами местности, что в конечном итоге не позволяет с необходимой достоверностью оценить ущерб от затопления. В связи с этим задача организации совместного использования пространственных данных в виде цифровых карт местности и космических снимков является актуальной как в теоретическом, так и в практическом плане.

### **1. Анализ проблемы построения зон затоплений, основанных на использовании космических снимков и геоинформационных технологий (ГИС-технологий)**

Анализ существующих методов и методических рекомендаций по выполнению комплекса противопаводковых мероприятий показал ориентацию систем мониторинга паводков в сторону применения и развития ГИС-технологий, использования для наблюдений современных аэрокосмических средств, развития методов и способов дешифрирования космических снимков [6, 10, 11]. Основным источником пространственной информации при планировании противопаводковых мероприятий являются цифровые карты местности с нанесенными на них специальными объектами, объектами промышленности и другими объектами, которые могут испытывать негативное влияние паводков. Ввиду этого, одной из первостепенных задач при осуществлении информационной поддержки планирования противопаводковых мероприятий является построение на цифровых топографических картах зон фактического затопления местности при разливах рек и оценка ущерба от затопления промышленных объектов.

Как известно, для выделения зон затопления успешно используются космические снимки, особенно часто радиолокационные, на которые облачность, сопровождающая паводок, оказывает минимальное влияние. Следует отметить, что зоны затопления, выделяемые с космических снимков, привязанных по орбитальным данным, зачастую имеют погрешность совмещения с цифровой топографической картой масштаба 1:200000, достигающую 1000 м. Это связано, прежде всего, с недостаточной актуальностью большинства цифровых карт местности, а также с особенностями выполнения космической съемки. С

применением существующих методов географической привязки КС, использующих наземные опорные точки, допривязать КС к векторной карте местности с высокой точностью совмещения русел рек, которая необходима для построения зон затопления и определения затопленных промышленных объектов, затруднительно.

Проблема возникает, прежде всего, в выборе необходимого количества опорных точек (порядка 100 точек для привязки снимка с размерами кадра 100×100 км). Во-первых, на цифровых картах местности редко встречается такое количество характерных объектов вблизи русла на всей протяженности реки (пересечение авто- и железных дорог, пересечение улиц и др.), устойчивых к изменению. Во-вторых, одни и те же объекты на космических снимках и векторных картах имеют непропорциональное изменение размеров и геометрии по всей площади снимка, обусловленное особенностью радиолокационной съемки и различными способами представления объектов на двух моделях реального мира – на карте и на снимке (рис. 2).

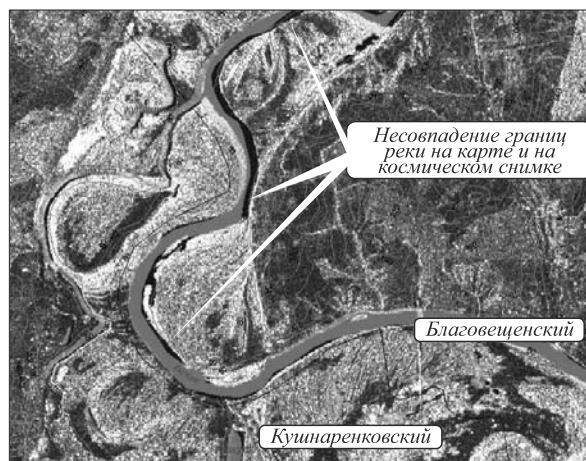


Рис. 2. Космический снимок Radarsat-2, привязанный по орбитальным данным

Таким образом, для снижения влияния вышеперечисленных факторов необходима разработка алгоритма построения локальных зон затопления местности, основанного на обработке космических снимков и характерных точек рельефа местности для построения прогнозных зон затопления и последующего опрелделения объектов промышленности, попавших под негативное влияние паводковой ситуации.

### **2. Разработка алгоритма построения зон затопления местности с использованием данных дистанционного зондирования земли и ГИС-технологий**

Учитывая вышеперечисленные недостатки, авторами предложен алгоритм построения зон фактического затопления местности при разливах рек на основе радиолокационных космических снимков и анализа характерных точек рельефа (далее для простоты будем называть его ПЗК), позволяющий исключить влияние описанных выше факторов и совместить ин-

формацию, полученную с одной модели реального мира (космический радиолокационный снимок), на другой модели реального мира (цифровая топографическая карта).

Алгоритм ПЗК включает:

- 1) нахождение крутых берегов с помощью анализа характерных точек рельефа местности;
- 2) создание множества опорных точек путём выбора на крутых берегах точек максимальной крутизны с учетом данных пунктов ГПН и цифровой модели рельефа местности;
- 3) выделение фрагментов космического снимка (разрешение 6–8 м), содержащих по одному крутому берегу;
- 4) привязку фрагментов путем совмещения крутых берегов на космическом снимке с теми же берегами на карте с использованием опорных точек и объединение привязанных фрагментов с интерполяцией перекрывающихся областей [13].

Нахождение участков крутых берегов на цифровой топографической карте

Анализ характерных точек рельефа местности на цифровой топографической карте позволяет найти крутые берега рек, на которых выбираются опорные

точки для привязки зон затопления с космического снимка. Полигональный водный объект можно представить как совокупность ломаных линий, ограничивающих этот объект [14].

С водными объектами в топологических отношениях находятся (непосредственно примыкают) линейные объекты – берега. Они представлены в виде ломаных линий. Ломаная линия состоит из точек, поэтому берег можно представить как множество точек

$$C_{Pnt}^{\bar{b}} = \{T_{Pnt_j}^{\bar{b}}\} = \{((x^{Pnt_j}, y^{Pnt_j}), Atr^{Pnt_j})_j\}, \quad (1)$$

$$j = \overline{1, n_{Pnt}^{\bar{b}}},$$

где  $T_{Pnt_j}^{\bar{b}}$  –  $j$ -я точка берега,

$x^{Pnt_j}$  – координата долготы  $j$ -й точки,

$y^{Pnt_j}$  – координата широты  $j$ -й точки,

$Atr^{Pnt_j}$  – совокупность атрибутивных характеристик каждой точки.

Для удобства описания обозначим левый берег  $C_L^{\bar{b}.л.}$  и правый берег  $C_L^{\bar{b}.п.}$ . Принадлежность определяется относительно направления течения реки. Левый берег – берег, находящийся слева от направления течения реки, правый соответственно справа (рис. 3).

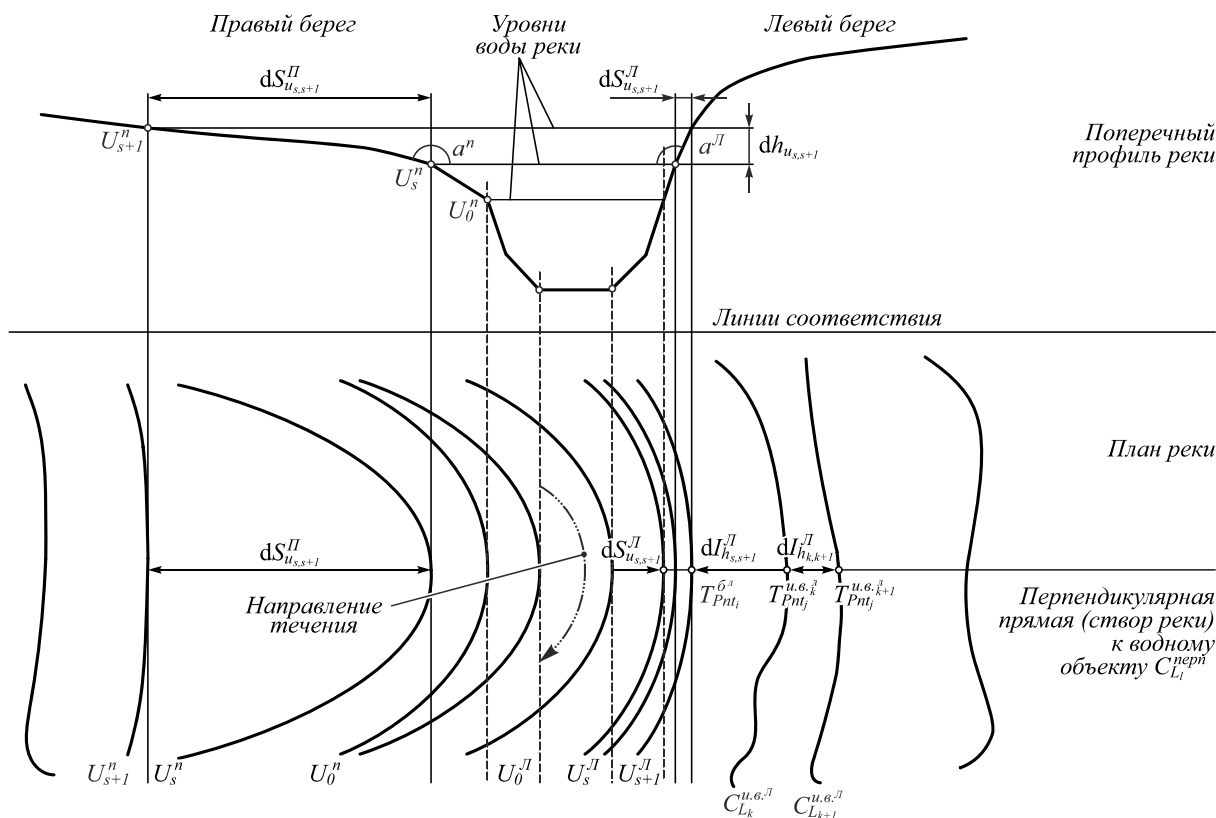


Рис. 3. Схема реки с крутым и пологим берегом

Если через каждую точку берега провести перпендикулярную к оси водного объекта прямую (створ реки), можно определить точки их пересечения с этой прямой

$$C_L^{неpn} = \{((x^{L_j}, y^{L_j})_q, Atr^{L_j})_j\}, \quad (2)$$

$$j = \overline{1, n_L^{неpn}}, \quad q = \overline{1, b_j}.$$

Среди всего этого множества точек пересечения перпендикулярных прямых, проведенных из соответствующих точек берега к створу реки, можно найти координаты точек  $C_{Pnt}^{u.g.}$ , принадлежащих изолиниям высот  $C_L^{u.g.}$ , нанесенным на цифровую карту, и находящихся на одной перпендикулярной прямой с соответствующими точками берегов  $C_{Pnt}^{\delta}$

$$\begin{aligned} C_{Pnt}^{u.g.} &= \{ ((x^{Pnt_j}, y^{Pnt_j}), Atr^{Pnt_j})_j \}, \\ j &= \overline{1, n_{Pnt}^{u.g.}}, \\ C_{Pnt}^{nepn} &= \{ ((x^{Pnt_j}, y^{Pnt_j}), Atr^{Pnt_j})_j \}, \\ j &= \overline{1, n_{Pnt}^{nepn}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Точки пересечения присутствуют как на левом, так и на правом берегу. Поэтому можно выделить следующее подмножество для левого берега:

$C_{Pnt}^{\delta^a} = \{ T_{Pnt_i}^{\delta^a} \}$ ,  $i = \overline{1, n_{Pnt}^{\delta^a}}$  – множество точек пересечения перпендикуляров от точек левого берега со створами реки.

И аналогично для правого берега  $C_{Pnt}^{\delta^n}$  – множество точек пересечения перпендикуляров от точек правого берега со створами реки.

Берега могут иметь как крутые участки, так и пологие. Выбор исходных точек берега осуществляется с помощью проверки правил принадлежности к определенному участку берега (крутому или пологому) (4). Так как точность привязки не может быть выше пространственного разрешения космического снимка, а также учитывая тот факт, что необходимо отслеживать минимальное поднятие уровня воды на 1 метр, в правилах сравнивается пространственное разрешение космического снимка и расстояние между точками пересечения перпендикуляров к створу реки и ближайшими изолиниями высот (нанесенными на цифровую топографическую карту) при изменении уровня воды на 1 метр.

- $R_1$ : Если  $\alpha \leq 90^\circ$ , и  $dl_{h_{k,k+1}} = 0$ , и  $dh_u = 1$  м, то  $Z_1$ ;
- $R_2$ : Если  $\alpha < 90^\circ$ , и  $P_{im} \geq dl_{h_{k,k+1}}$ , и  $dh_u = 1$  м, то  $Z_1$ ; (4)
- $R_3$ : Если  $\alpha > 90^\circ$ , и  $P_{im} \leq dl_{h_{k,k+1}}$ , и  $dh_u = 1$  м, то  $Z_2$ ;

где  $R_i$  – имя  $i$ -го правила,  $\alpha$  – угол между берегом и водной поверхностью, получаемый по результатам анализа цифровой модели рельефа,  $P_{im}$  – пространственное разрешение космического снимка,  $dl_{h_{k,k+1}}$  – расстояние между 2 точками берега ( $T_{Pnt_j}^{u.g.k}$  и  $T_{Pnt_j}^{u.g.k+1}$ ), из которых проведены перпендикуляры к створу реки  $C_{L_i}^{nepn}$ , и изолиниями высот  $C_{L_k}^{u.g.a}$  и  $C_{L_{k+1}}^{u.g.a}$ , ближайшими к берегу,  $dh_{u_{s,s+1}}$  – разница между уровнями воды  $U_s$  и  $U_{s+1}$ ,  $Z_1$  – точка  $T_{Pnt_i}^{\delta^a}$  принадлежит крутому берегу,  $Z_2$  – точка  $T_{Pnt_i}^{\delta^a}$  принадлежит пологому берегу.

Если при поднятии уровня воды на 1 м расстояние между изолиниями меньше пространственного разрешения космического снимка, то будем считать, что точка принадлежит крутому берегу. Таким образом, опорные точки выбираются только на крутых берегах, для того чтобы сократить погрешность при совмещении зон затоплений с векторной картой. Если уровень поднятия воды на ближайшем ГПН выше ближайшей изолинии высот, тогда значение расстояния  $dl_h$  определяется между двумя ближайшими к уровню поднятия воды изолиниями.

В результате применения правил ко множествам рассматриваемых точек обоих берегов  $C_{Pnt}^{\delta^a}$  и  $C_{Pnt}^{\delta^n}$  получаем их подмножества:

- $C_{Pnt}^{\delta^a_k}$  – множество точек, принадлежащих крутым участкам левого берега.
- $C_{Pnt}^{\delta^n_k}$  – множество точек, принадлежащих пологим участкам левого берега.
- $C_{Pnt}^{\delta^a_n}$  – множество точек, принадлежащих крутым участкам правого берега.
- $C_{Pnt}^{\delta^n_n}$  – множество точек, принадлежащих пологим участкам левого берега, для которых справедливы следующие выражения:

$$C_{Pnt}^{\delta^a_k} \cap C_{Pnt}^{\delta^n_k} = \emptyset, \quad C_{Pnt}^{\delta^a_n} \cap C_{Pnt}^{\delta^n_n} = \emptyset. \quad (5)$$

Таким образом, определены крутые и пологие участки берегов.

Выделение множества опорных точек

Опорные точки для привязки фрагментов, определяемые на крутых берегах рек векторной топографической карты и космическом снимке, должны четко идентифицироваться как на карте, так и на космическом снимке для точного определения координат  $x, y$ . Опорные точки используются для осуществления полиномиальной трансформации, которая конвертирует фрагменты космического снимка из их исходного местонахождения в пространственно корректное местонахождение, используя следующее соотношение

$$\begin{aligned} x' &= f(x, y), \\ y' &= g(x, y), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $(x, y)$  – координаты точки на космическом снимке,  $(x', y')$  – координаты соответствующей точки на цифровой топографической карте,  $f$  и  $g$  – функции, определяющие вид зависимости между координатами пикселей изображения и координатами соответствующих точек на цифровой топографической карте.

Существует ряд моделей вычисления координат, основанных на использовании опорных точек: модель – аффинное преобразование и полиномиальные модели. Наиболее простой из них является модель – аффинное преобразование, позволяющая определить смещение, вращение, разницу масштабов в  $x$ - и  $y$ -направлениях и некоторые виды искажений:

$$\begin{aligned} x' &= a_1 + a_2x + a_3y, \\ y' &= a_4 + a_5x + a_6y. \end{aligned} \quad (7)$$

Так как в уравнениях шесть параметров (от  $a_1$  до  $a_6$ ), а каждая контрольная опорная точка на карте дает только два значения ( $x$ -координату и  $y$ -координату), то для определения функций  $f$  и  $g$  достаточно трёх опорных точек. Но для задачи построения зон затоплений при привязке фрагментов космического снимка Radarsat-2 SGF необходимо только осуществить смещение фрагмента снимка по  $x$  и /или  $y$ , так как космический снимок, привязанный по орбитальным данным, уже находится в локальной прямоугольной системе координат с правильными геометрическими размерами и не требует более сложных преобразований. Поэтому для привязки фрагментов космического снимка используется одна опорная точка, что приводит к увеличению точности привязки.

Исходя из этого, выбирается по одной опорной точке на каждом крутом берегу с максимальной крутизной. Так, для левого берега из массивов точек  $C_{Pnt}^{\delta_k^a}$  точки с максимальной крутизной выделяются в подмножество  $C_{Pnt}^{\delta_k^a, \max}$ , а множество точек с минимальной крутизной – в подмножество  $C_{Pnt}^{\delta_n^a, \min}$

$$C_{Pnt}^{\delta_k^a, \max} = \min_{dl_{hi}} \left\{ C_{Pnt_i}^{\delta_k^a} \right\}, \quad i = \overline{1, n_{nepn}}, \quad (8)$$

$$C_{Pnt}^{\delta_n^a, \min} = \max_{dl_{hi}} \left\{ C_{Pnt_i}^{\delta_n^a} \right\}, \quad i = \overline{1, n_{nepn}}. \quad (9)$$

Аналогично выделяются точки с максимальной и минимальной крутизной для правого берега.

По приведенным ниже правилам определяются опорные точки:

$$R_1: \text{Если } T_{Pnt_i}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\delta_k^a}, \text{ и}$$

$$T_{Pnt_i}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\delta_k^a, \max}, \text{ и } T_{Pnt_j}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\delta_n^a}, \text{ то } T_{Pnt_j}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\text{пп}},$$

$$R_2: \text{Если } T_{Pnt_i}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\delta_k^a}, \text{ и}$$

$$T_{Pnt_i}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\delta_k^a, \max} \text{ и } T_{Pnt_j}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\delta_n^a}, \text{ то } T_{Pnt_j}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\text{пп}},$$

$$R_3: \text{Если } T_{Pnt_i}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\delta_n^a}, \text{ и}$$

$$T_{Pnt_i}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\delta_k^a, \max}, \text{ и } T_{Pnt_i}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\delta_k^a}, \text{ и} \quad (10)$$

$$T_{Pnt_j}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\delta_k^a, \max}, \text{ и } dl_{h_k, k+1}^l < dl_{h_k, k+1}^n, \text{ то } T_{Pnt_j}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\text{пп}},$$

$$R_4: \text{Если } T_{Pnt_i}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\delta_k^a}, \text{ и}$$

$$T_{Pnt_i}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\delta_k^a, \max}, \text{ и } T_{Pnt_j}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\delta_k^a}, \text{ и } T_{Pnt_j}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\delta_k^a, \max}, \text{ и}$$

$$dl_{h_k, k+1}^l > dl_{h_k, k+1}^n, \text{ то } T_{Pnt_j}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\text{пп}},$$

где  $R_i$  – имя  $i$ -го правила,

$i = \overline{1, n_{nepn}}$ ,  $C_{Pnt}^{\text{пп}}$  – множество опорных точек привязки на векторной карте,

$T_{Pnt_i}^{\delta^a}$  – точка, принадлежащая левому берегу,

$T_{Pnt_j}^{\delta^a}$  – точка, принадлежащая правому берегу.

Таким образом, множество опорных точек привязки на векторной карте состоит из совокупности точек максимальной крутизны левого и правого берега:

$$C_{Pnt}^{\text{пп}} = C_{Pnt}^{\delta_k^a, \max} \cup C_{Pnt}^{\delta_n^a, \max}. \quad (11)$$

Это справедливо в случае небольшого поднятия уровня воды, при котором крутой берег затапливается незначительно. В противном случае – опорные точки отыскиваются на изолиниях высот.

Определение областей, выделяемых с космического снимка

Вдоль всего берега располагаются точки максимальной и минимальной крутизны, между которыми находятся точки, не относящиеся к ним, среди которых можно выделить точки перегиба. Точки перегиба – это такие точки, в которых линия берега изменяет свой тип (крутой берег переходит в пологий и наоборот)  $C_{Pnt}^{\delta_{aver}^a}$  и  $C_{Pnt}^{\delta_{aver}^n}$ , которые определяются на основе следующих правил:

$$R_1: \text{Если } T_{Pnt_i}^{\delta_{extr}^a} = T_{Pnt_i}^{\delta_k^a, \max}, \text{ и } T_{Pnt_i}^{\delta_{extr}^n} = T_{Pnt_i}^{\delta_n^a, \min}, \text{ и}$$

$$T_{Pnt_{i+1}}^{\delta_{extr}^a} = T_{Pnt_{i+1}}^{\delta_n^a, \min}, \text{ и } T_{Pnt_{i+1}}^{\delta_{extr}^n} = T_{Pnt_{i+1}}^{\delta_k^a, \max}, \text{ и } dl_{hj}^l = dl_{hj}^n, \text{ то}$$

$$T_{Pnt_j}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\delta_{aver}^a}, \text{ и } T_{Pnt_j}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\delta_{aver}^n};$$

$$R_2: \text{Если } T_{Pnt_i}^{\delta_{extr}^n} = T_{Pnt_i}^{\delta_k^a, \max}, \text{ и } T_{Pnt_i}^{\delta_{extr}^a} = T_{Pnt_i}^{\delta_n^a, \min}, \text{ и}$$

$$T_{Pnt_{i+1}}^{\delta_{extr}^n} = T_{Pnt_{i+1}}^{\delta_n^a, \min}, \text{ и } T_{Pnt_{i+1}}^{\delta_{extr}^a} = T_{Pnt_{i+1}}^{\delta_k^a, \max}, \text{ и } dl_{hj}^l = dl_{hj}^n, \text{ то}$$

$$T_{Pnt_j}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\delta_{aver}^a}, \text{ и } T_{Pnt_j}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\delta_{aver}^n};$$

$$R_3: \text{Если } T_{Pnt_i}^{\delta_{extr}^a} = T_{Pnt_i}^{\delta_k^a, \max}, \text{ и } T_{Pnt_i}^{\delta_{extr}^n} = T_{Pnt_i}^{\delta_n^a, \min}, \text{ и}$$

$$T_{Pnt_{i+1}}^{\delta_{extr}^a} = T_{Pnt_{i+1}}^{\delta_n^a, \min}, \text{ и } T_{Pnt_{i+1}}^{\delta_{extr}^n} = T_{Pnt_{i+1}}^{\delta_k^a, \max}, \text{ и} \quad (12)$$

$$T_{Pnt_{i+2}}^{\delta_{extr}^a} = T_{Pnt_{i+2}}^{\delta_k^a, \max}, \text{ и } T_{Pnt_{i+2}}^{\delta_{extr}^n} = T_{Pnt_{i+2}}^{\delta_n^a, \min}, \text{ и } dl_{hj}^l = \max_l dl_h^l, \text{ то}$$

$$T_{Pnt_j}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\delta_{aver}^a}, \text{ и } T_{Pnt_j}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\delta_{aver}^n};$$

$$R_4: \text{Если } T_{Pnt_i}^{\delta_{extr}^n} = T_{Pnt_i}^{\delta_k^a, \max}, \text{ и } T_{Pnt_i}^{\delta_{extr}^a} = T_{Pnt_i}^{\delta_n^a, \min}, \text{ и}$$

$$T_{Pnt_{i+1}}^{\delta_{extr}^n} = T_{Pnt_{i+1}}^{\delta_n^a, \min}, \text{ и } T_{Pnt_{i+1}}^{\delta_{extr}^a} = T_{Pnt_{i+1}}^{\delta_k^a, \max}, \text{ и } T_{Pnt_{i+2}}^{\delta_{extr}^n} = T_{Pnt_{i+2}}^{\delta_k^a, \max}, \text{ и}$$

$$T_{Pnt_{i+2}}^{\delta_{extr}^a} = T_{Pnt_{i+2}}^{\delta_n^a, \min}, \text{ и } dl_{hj}^n = \max_l dl_h^l, \text{ то}$$

$$T_{Pnt_j}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\delta_{aver}^a}, \text{ и } T_{Pnt_j}^{\delta^a} \in C_{Pnt}^{\delta_{aver}^n};$$

где  $R_i$  – имя  $i$ -го правила,  $T_{Pnt}^{\delta_{extr}^a}, T_{Pnt}^{\delta_{extr}^n}$  – береговые точки-экстремумы, являющиеся точками максимальной либо минимальной крутизны,

$$i \leq j < i+1, \quad i = \overline{1, n_{extr}}, \quad j = \overline{1, n_{nepn}}.$$

Следовательно, справедливы выражения:

$$\begin{aligned} C_{Pnt}^{\delta_k^a} \cap C_{Pnt}^{\delta_{aver}^a} \cap C_{Pnt}^{\delta_n^a} &= \emptyset, \\ C_{Pnt}^{\delta_n^a} \cap C_{Pnt}^{\delta_{aver}^n} \cap C_{Pnt}^{\delta_k^a} &= \emptyset, \\ C_{Pnt}^{\delta_k^a} \cup C_{Pnt}^{\delta_{aver}^a} \cup C_{Pnt}^{\delta_n^a} &= C_{Pnt}^{\delta^a}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$C_{Pnt}^{\bar{\sigma}_k^n} \cup C_{Pnt}^{\bar{\sigma}_{aver}^n} \cup C_{Pnt}^{\bar{\sigma}_n^n} = C_{Pnt}^{\bar{\sigma}^n}.$$

Таким образом, можно определить точки (14), которые должны попасть в области выделенных фрагментов космического снимка:

$$A = \{A_k\} = \left\{ \begin{matrix} T_{Pnt_j}^{\bar{\sigma}_{aver}^a}, T_{Pnt_j}^{\bar{\sigma}_{aver}^n}, T_{Pnt_{j+1}}^{\bar{\sigma}_{aver}^a}, \\ T_{Pnt_{j+1}}^{\bar{\sigma}_{aver}^n}, T_{Pnt_k}^{\bar{\sigma}_{k,max}^{a(n)}}, T_{Pnt_k}^{\bar{\sigma}_{n,min}^{a(x)}} \end{matrix} \right\}, \quad (14)$$

$$k = \overline{1, n_{\bar{\sigma}_k}}, j = \overline{1, n_{aver}}, i = \overline{1, n_{Pnt}^{\bar{\sigma}}}.$$

Причём точки с индексами  $T_{Pnt_k}^{\bar{\sigma}_{k,max}^{a(n)}}$  и  $T_{Pnt_k}^{\bar{\sigma}_{n,min}^{a(x)}}$  находятся между точками с индексами  $T_{Pnt_j}^{\bar{\sigma}_{aver}^a}, T_{Pnt_j}^{\bar{\sigma}_{aver}^n}$  и  $T_{Pnt_{j+1}}^{\bar{\sigma}_{aver}^a}, T_{Pnt_{j+1}}^{\bar{\sigma}_{aver}^n}$ .

Области выделения фрагментов космического снимка описываются двумя парами координат (левый нижний угол и правый верхний угол).

$$AOI_{Pol} = \{AOI_{Pol_i}\} = \left\{ \begin{matrix} (x_{min,i}; y_{min,i}), \\ (x_{max,i}; y_{max,i}) \end{matrix} \right\}, \quad (15)$$

$$i = \overline{1, n_{\bar{\sigma}_k}},$$

$$X_{min,k} = \min_x (A_k(x)), k = \overline{1, n_{\bar{\sigma}_k}},$$

$$Y_{min,k} = \min_y (A_k(y)), k = \overline{1, n_{\bar{\sigma}_k}},$$

$$X_{max,k} = \max_x (A_k(x)), k = \overline{1, n_{\bar{\sigma}_k}},$$

$$Y_{max,k} = \max_y (A_k(y)), k = \overline{1, n_{\bar{\sigma}_k}}.$$

В результате определены области, которые имеют по одному крутому участку берега и на основе которых выделяются фрагменты с космического снимка.

Выделение фрагментов с космического снимка

Космический снимок можно представить как множество пикселей с парами координат, в которых хранятся значения спектральной яркости каждого спектрального канала

$$D^{fr} = \{D_i^{fr}\} = \{(x_k, y_k)_l, k_s, a_t\}, \quad (16)$$

$$i = \overline{1, n_{\bar{\sigma}_k}}, k = \overline{1, n}, l = \overline{1, m}, s = \overline{1, n_k}, t = \overline{1, n_a},$$

где  $n_{\bar{\sigma}_k}$  – количество опорных точек (фрагментов изображения),

$n$  – количество строк пикселей в изображении,

$m$  – количество столбцов пикселей в изображении,

$n_k$  – количество спектральных каналов,

$n_a$  – количество значений спектральной яркости.

Множество фрагментов, которые выделяются с космического снимка, определяется пересечением множества точек космического снимка и областей выделения фрагментов:

$$D^{fr} = \{D_i^{fr}\} = D \cap \{AOI_{Pol_i}\}, i = \overline{1, n_{\bar{\sigma}_k}}. \quad (17)$$

Привязка выделенных фрагментов космического снимка

Для совмещения выделенных фрагментов космического снимка с векторной топографической картой используется полиномиальная трансформация (18), но с использованием только одной опорной точки для каждого фрагмента:

$$\begin{matrix} x' = a_1 + x, \\ y' = a_4 + y. \end{matrix} \quad (18)$$

Для количественной оценки географической привязки космических снимков в геоинформационных технологиях определяют точность совмещения всех опорных точек. Точность может быть измерена математически путем сравнения известного местоположения точки в координатах карты и ее положения на трансформированном растре. Расстояние между этими двумя местоположениями точки называется остаточной ошибкой [15]. Общая среднеквадратическая (RMS) ошибка преобразования вычисляется путем извлечения квадратного корня из суммы квадратов погрешностей всех опорных точек и деления на их количество. Это значение показывает, насколько отличается результат трансформирования от идеального совмещения всех опорных точек. Но этот способ не позволяет оценить точность привязки, поскольку определяет только несовпадение известного местоположения опорных точек в координатах карты и их положения на трансформированном растре.

При построении зон затопления важно оценить точность наложения выделенных зон затопления с космического снимка и участков крутых берегов рек на векторной топографической карте.

Поэтому была проведена экспериментальная оценка соответствия наложения водных поверхностей реки, полученных с космоснимка и с цифровой топографической карты в летний период. Экспериментально было получено соотношение, позволяющее определять ошибку привязки с помощью оценки площади несоответствия между полигональным векторным слоем рек и водной поверхностью, выделенной с космического снимка

$$\begin{matrix} \Delta S_1 = S_1 - S_0, \\ \Delta S_2 = S_2 - S_0, \end{matrix} \quad (19)$$

где  $S_0$  – площадь водной поверхности реки векторного слоя цифровой карты,  $S_1$  – площадь водной поверхности реки, полученная с космического снимка, обработанного с использованием алгоритма ПЗК,  $S_2$  – площадь водной поверхности реки, полученная с космического снимка, привязанного классическим способом,  $\Delta S_1$  – площадь несоответствия между водной поверхностью, полученной с космического снимка, обработанного с использованием алгоритма ПЗК, и векторным слоем рек,  $\Delta S_2$  – площадь несоответствия между водной поверхностью реки, полученной с космического снимка, привязанного классическим способом, и векторным слоем рек. Сравнение двух полученных значений позволяет сделать оценку точности привязки космоснимка.

### 3. Экспериментальное исследование качества предложенного алгоритма

Эффективность применения алгоритма построения зон затоплений на основе обработки пространственных данных в виде цифровых карт и космических снимков для дальнейшей информационной поддержки органов исполнительной власти при планировании противопаводковых мероприятий определяется следующими факторами:

- 1) точностью построения зон затопления;
- 2) площадью зоны затопления;
- 3) точностью привязки космоснимка;
- 4) снижением временных затрат, необходимых для построения зон затоплений.

Разработанный алгоритм построения локальных зон затопления на основе цифровых карт, космических снимков и анализа характерных точек рельефа был использован при построении зон фактического затопления местности на основе космических снимков Radarsat-2 SGF в период весеннего паводка 2008 года в окрестностях города Уфы, так как это был последний высокий паводок в Республике Башкортостан (рис. 1).

Таким образом, площадь несоответствия между водной поверхностью реки, полученной на основе соотношения (19) с космического снимка, обработанного с использованием алгоритма ПЗК, и векторным слоем рек составляет  $1990000 \text{ м}^2$ , а водной поверхности реки, полученной с космического снимка, привязанного классическим способом, с тем же векторным слоем рек  $3310000 \text{ м}^2$ , что говорит о повышении точности привязки снимка.

В табл. 1 приведены результаты сравнения водных поверхностей с использованием классического алгоритма привязки и предложенного в данной работе алгоритма.

Приведенные количественные оценки подтверждают эффективность использования предложенного авторами алгоритма.

Табл. 1. Результаты сравнения водных поверхностей с использованием классического алгоритма привязки и предложенного в данной работе алгоритма

Номер космического снимка	Различия при использовании разработанного алгоритма, (м)	Различия при использовании классического алгоритма, (м)	Различия между 33, полученными двумя алгоритмами, (м)	Увеличение точности при использовании разработанного алгоритма, %
1	1990000	3310000	3410000	39,9
2	2100000	3250000	3230000	35,4
3	1953000	3285000	3387000	40,6
4	1975000	3343700	3395000	40,9
5	1647000	2989100	3421000	44,9
6	1973000	3312500	3438700	40,4
7	1987000	3196100	3389000	37,8
8	1947000	3345700	3423000	41,8
9	1972370	3318900	3415700	40,6
10	1958000	3285100	3390000	40,4
Среднее значение	1950237	3263610	3389940	40,27

### Заключение

В настоящей работе предложен алгоритм построения зон фактического затопления местности при разливах рек на основе радиолокационных космических снимков и анализа характерных точек рельефа, позволяющий существенно повысить точность привязки снимка при малом числе опорных точек по сравнению с классическим алгоритмом привязки.

Результаты экспериментального исследования предложенного алгоритма показали его эффективность: точность совмещения водных поверхностей реки космоснимка и цифровой топографической карты с применением алгоритма повысилась на 40 %.

Совместное использование данных дистанционного зондирования Земли из космоса и геоинформационных технологий при информационной поддержке мониторинга паводковой ситуации в составе программного комплекса органов исполнительной власти позволяет повысить качество построения зон фактического затопления местности и точность их совмещения с векторной топографической картой и тем самым повысить эффективность принимаемых решений по противопаводковым мероприятиям.

### Литература

1. **Авакян, А.Б.** Наводнения как глобальная многоаспектная проблема / А.Б. Авакян, М.Н. Истомина // Вестник РАН. – 2002. – Т. 72, № 12. – С. 1059-1068.
2. **Багманов, В.Х.** Прогнозирование зон затопления на основе интеграции данных космических и гидрометеорологических постов наблюдения / В.Х. Багманов, И.М. Нагаев, С.В. Павлов // Проблемы прогнозирования, предотвращения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций: Материалы II Всероссийской науч.-практ. конф. – 2000. – 248 с.
3. **Павлов, С.В.** Информационная вычислительная система для обеспечения органов исполнительной власти региона пространственными данными / С.В. Павлов, О.А. Ефремова, А.С. Павлов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9, № 2. – С. 88-95.
4. **Ефремова, О.А.** Применение системного подхода к анализу проблемы использования пространственной информации для поддержки принятия решений региональными органами исполнительной власти [Электронный ресурс] / О.А. Ефремова // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 2. – 14 с. – URL: [http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/efremova.pdf\\_2371.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/efremova.pdf_2371.pdf) (дата обращения 20.07.2018)
5. **Шовенгердт, Р.А.** Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р.А. Шовенгердт. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с. – ISBN: 978-5-94836-244-1.
6. **Денисова, А.Ю.** Идентификация линейной модели наблюдения изображений, получаемых при дистанционном зондировании Земли, с использованием геоинформационных данных / А.Ю. Денисова, В.В. Сергеев // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 557-563. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-557-563.
7. Перспективные информационные технологии дистанционного зондирования Земли / М.В. Гашников, Н.И. Глушов, Е.В. Гошин, А.Ю. Денисова, А.В. Кузнецов, В.А. Митекин, В.В. Мясников, В.В. Сергеев, В.А. Сой-

- фер, В.А. Федосеев, В.А. Фурсов, М.А. Чичёва, П.Ю. Якимов; под ред. В.А. Сойфера. – Самара: Новая техника, 2015. – 255 с. – ISBN: 978-5-88940-138-4.
8. **Аксёнов, О.Ю.** Совмещение изображений / О.Ю. Аксёнов // Цифровая обработка сигналов. – 2005. – № 3. – С. 51-55.
  9. **Гершензон, В.Е.** Дистанционное зондирование Земли: общие проблемы и российская специфика / В.Е. Гершензон // Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. – 2005. – № 3(50). – С. 57.
  10. **Conelly, V.A.** Advanced hydrologic prediction system / V.A. Conelly, D.T. Braatz, J.B. Halgust, M.M. DeWeese, L. Larson, J.J. Ingram // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 1999. – Vol. 104, Issue D16. – P. 655-660. – DOI: 10.1029/1999JD900051.
  11. **Haggett, C.** An integrated approach to flood forecasting and warning in England and Wales / C. Haggett // Water and Environment Journal. – 1998. – Vol. 12, Issue 6. – P. 425-432. – DOI: 10.1111/j.1747-6593.1998.tb00211.x.
  12. **Злобин, В.К.** Обработка аэрокосмических изображений / В.К. Злобин, В.В. Еремеев. – М.: Физматлит, 2006. – 304 с. – ISBN: 5-9221-0739-9.
  13. **Павлов, С.В.** Построение зон фактического затопления местности при разливах рек на основе обработки радиолокационных космических снимков и анализа характерных точек рельефа / С.В. Павлов, Ю.Н. Кунаков // Вестник УГАТУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2009. – Т. 13, № 2(35). – С. 3-10.
  14. **Тикунов В.С.** Моделирование в картографии: учебник / В.С. Тикунов. – М.: Изд-во МГУ, 1997. – 405 с. – ISBN: 5-211-03346-9.
  15. **Аковецкий, В.И.** Дешифрирование снимков / В.И. Аковецкий. – М.: «Недра», 1983.

#### Сведения об авторах

**Ефремова Оксана Александровна.** В 1999 году с отличием окончила Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Инженер по автоматизированным системам обработки информации и управления». В настоящее время – заместитель зав. кафедрой геоинформационных систем по научной и инновационной деятельности УГАТУ. Доцент, кандидат технических наук. Область научных интересов: системный анализ, разработка информационных систем в сфере организации общественной безопасности и защиты в ЧС, разработка многомерных моделей данных, геоинформационные системы.

**Кунаков Юрий Николаевич.** В 2006 году окончил Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Информационные системы и технологии». Кандидат технических наук. Область научных интересов: геоинформационные системы, обработка данных ДЗЗ.

**Павлов Сергей Владимирович.** В 1977 году окончил Башкирский государственный университет по специальности «Математик, вычислительная математика». Доктор технических наук, профессор УГАТУ. Заслуженный деятель науки Республики Башкортостан. Проводит исследования в области системного анализа, информационных систем, разработки многомерных моделей данных, интеграции разрозненных баз данных, геоинформационных систем.

**Султанов Альберт Ханович.** В 1973 году с отличием окончил Новосибирский электротехнический институт связи НЭИС (ныне Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, СибГУ-ТИ) по специальности «Многоканальная электросвязь». Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой телекоммуникационных систем УГАТУ. Специалист в области оптических телекоммуникаций, оптоэлектроники, аэрокосмических систем, микроспутниковой связи.

ГРНТИ: 81.13.13

Поступила в редакцию 5 октября 2017 г. Окончательный вариант – 29 июля 2018 г.

#### AN ALGORITHM FOR MAPPING FLOODED AREAS THROUGH ANALYSIS OF SATELLITE IMAGERY AND TERRESTRIAL RELIEF FEATURES

O.A. Efremova<sup>1</sup>, Yu.N. Kunakov<sup>1</sup>, S.V. Pavlov<sup>1</sup>, A.Kh. Sultanov<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

#### Abstract

We address a problem of the joint processing of digital maps of the earth surface and satellite imagery of flooded areas as part of the software intended to help authorities to respond to emergency situations. The problem of mapping flooded areas is solved based on the use of satellite images and GIS technologies. This paper describes an algorithm for mapping areas submerged by flooded rivers based on radar satellite images and analysis of characteristic relief features, allowing one to improve the accuracy of the image geolocation with a small number of reference points. The experimental studies demonstrate that using the algorithm proposed, the alignment accuracy of the river water surface obtained from a satellite image and from a digital topographic map has increased by 40%.

**Keywords:** spatial data, flooded areas, space images, reference points, digital maps, software complex, algorithm for processing spatial data.



*Citation:* Efremova OA, Kunakov YuN, Pavlov SV, Sultanov AKh. An algorithm for mapping flooded areas through analysis of satellite imagery and terrestrial relief features. *Computer Optics* 2018; 42(4): 695-703. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-4-695-703.

### References

- [1] Avakyan AB, Istomina M.N. Floods as a global multidimensional problem. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences* 2002; 72(12): 1059-1068.
- [2] Bagmanov V.Kh., Nagaev I.M., Pavlov S.V. Prediction of flooding zones on the basis of integration of space and hydrometeorological observation posts // *Problems of forecasting, prevention and liquidation of consequences of emergency situations: Proceedings of the II All-Russian scientific-practical conference* 2000.
- [3] Pavlov SV, Efremova OA, Pavlov AS. Information-computer system for providing regional executive agencies with spatial data [In Russian]. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems* 2013; 9(2): 88-95.
- [4] Efremova OA. The application of a systematic approach to the analysis of the problem of using spatial information to support decision-making by regional executive authorities. *The Engineering Herald of the Don* 2014; 2: 14. Source: [http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/efremova.pdf\\_2371.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/efremova.pdf_2371.pdf).
- [5] Schowengerdt RA. *Remote sensing: Models and methods for image processing*. 3<sup>rd</sup> ed. Burlington, San Diego, London: Academic Press; 2007. ISBN: 978-0-12-369407-2.
- [6] Denisova AYu, Sergeev VV. Impulse response identification for remote sensing images using GIS data [In Russian]. *Computer Optics* 2015; 39(4): 557-563. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-557-563.
- [7] Soifer VA, ed. *Information technologies remote sensing of the Earth* [In Russian]. Samara: "Novaya Tehnika" Publisher; 2015. ISBN: 978-5-88940-138-4.
- [8] Aksenov OYu. Combination of images [In Russian]. *Digital Signal Processing* 2005; 3: 51-55.
- [9] Gershenzon VE. Remote sensing of the Earth: Common problems and russian specificity, *Information Bulletin of GIS-Association* 2005; 3(50): 57.
- [10] Connelly BA, Braatz DT, Halquist JB, Deweese MM, Larson L, Ingram JJ. Advanced hydrologic prediction system. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 1999; 104(D16): 655-660. DOI: 10.1029/1999JD900051.
- [11] Haggett C. An integrated approach to flood forecasting and warning in England and Wales. *Water and Environment Journal* 1998; 12(6): 425-432. DOI: 10.1111/j.1747-6593.1998.tb00211.x.
- [12] Zlobin VK, Eremeev VV. *Processing aerospace images* [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2006. ISBN: 5-9221-0739-9.
- [13] Pavlov SV, Kunakov YuN. Construction of zones of actual flooding of the terrain during river floods on the basis of processing of radar satellite images and analysis of characteristic relief points [In Russian]. *Vestnik UGATU. Seria: Management, Computer Science and Informatics* 2009; 13(2:35): 3-10.
- [14] Tikunov VS. *Modeling in cartography* [In Russian]. Moscow: "Izdatelstvo MGU" Publisher; 1997. ISBN: 5-211-03346-9.
- [15] Akovetsky VI. *Photo interpretation* [In Russian]. Moscow: "Nedra" Publisher; 1983.

### Author's information

**Oksana Aleksandrovna Efremova.** In 1999 she graduated from Ufa State Aviation Technical University with a degree in Automated Information Processing and Control Engineer. Currently – Deputy Head of Geoinformation Systems for Scientific and Innovative Activities department of the USATU. Associate Professor, Candidate of Technical Sciences. Area of scientific interests: system analysis, development of information systems in the sphere of organization of public safety and protection in emergencies, development of multidimensional data models, geoinformation systems.

**Yuri Nikolaevich Kunakov.** In 2006 he graduated from the Ufa State Aviation Technical University with a degree in Information Systems and Technologies. Candidate of Technical Sciences. Area of scientific interests: geoinformation systems, data processing.

**Sergey Vladimirovich Pavlov.** In 1977 he graduated from Bashkir State University in specialty "Mathematician, Computational Mathematics". Doctor of Technical Sciences, Professor of Ufa State Aviation Technical University. Honored Scientist of the Republic of Bashkortostan. It conducts research in the field of system analysis, information systems, development of multidimensional data models, integration of disparate databases, geoinformation systems.

**Albert Khanovich Sultanov.** In 1973 he graduated from Novosibirsk Electrotechnical Institute of Telecommunications (presently – Siberia State University of Telecommunications and Informatics), majoring in "Multichannel Electrocommunication". Doctor of Technical Sciences, Professor, head of Telecommunications Systems department in Ufa State Aviation Technical University. Specialist in the field of optical telecommunications, optoelectronics, aerospace systems, micro-satellite communication.

*Received October 5, 2017. The final version – July 29, 2018.*