

<https://doi.org/10.55764/2957-9856/2024-2-27-39.10>

УДК 528.8 (556.3)

МРНТИ 37.27.29

П. И. Яковлев

Инженер-гидролог (Тверское отделение Русского географического общества, Тверь, Россия,
akva-petr.1947@mail.ru)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ УЧАСТКОВ ПОВЫШЕННОГО ПОДЗЕМНОГО ПРИТОКА В РЕКИ, ОЗЕРА И ВОДОХРАНИЛИЩА (НА ПРИМЕРЕ ТВЕРСКОЙ ОБЛАСТИ)

Аннотация. Приводятся примеры использования тепловых космических снимков в гидрологических исследованиях по выявлению участков повышенного подземного стока на водных объектах Тверской области. Используются зарубежные космические снимки Landsat 5 и Landsat 8 в тепловом дальнем ИК-диапазоне. Дана характеристика гидрогеологических и гидрологических условий района. Особое внимание уделялось минимальному стоку рек Верхней Волги в меженный период, который характеризует подземный сток этого речного бассейна. Результаты научных изысканий могут быть полезными для гидрогеологов и гидрологов. Тепловая космосъемка не во всех случаях может быть эффективной при решении таких гидрологических задач.

Ключевые слова: тепловой космоснимок, подземный приток, температурные аномалии, визуальное дешифрирование, плотность фототона, реки, озера, водохранилища.

Введение. В России дистанционные методы при изучении водных ресурсов подземных вод активно стали использоваться в 1980-1990 годы, но преимущественно в аридной зоне СССР и реже в районах избыточного увлажнения (Садов А. И., Викторов А. С., ВСЕГИНГЕО, Обьедков Ю. Л., ИВПАН и т.д.). В эти же годы за рубежом также выполнялись подобные научные изыскания. Но таких работ в то время было незначительное количество. Следует отметить, что в институте ВНИГИК, Мингео СССР, в отделе минеральных ресурсов Тверской области (г. Тверь) в 1987-1990 гг. по инициативе и под научным руководством главного гидрогеолога МГРЭ ПГО «Центрогеология», к.г.-м.н. Просекова А. М. проводилась научно-техническая работа «Выявить очаги интенсивной разгрузки подземных вод дистанционными методами, на примере Калининской (Тверской) области». В те годы существовал ограниченный выбор материалов космической видеoinформации, но большие надежды возлагались на использование тепловых космических снимков. Однако из-за недостаточного финансирования эти научные изыскания не были завершены. Эта работа является продолжением предыдущих исследований. Основная ее задача – выявление зон температурных аномалий в акватории поверхностных водных объектов и в прибрежной их зоне с использованием тепловых ИК-космоснимков. Такие аномальные участки при благоприятных гидрогеологических условиях могут быть перспективны для организации здесь хозяйственного водоснабжения. Кроме этого, возможно использование результатов этих работ в других научных и экологических исследованиях в Тверской области.

Теоретические основы водных исследований. Возможности использования многозональной и тепловой космической съемки в географических исследованиях в других науках о Земле описаны в работах Грищенко М. С., Балдиной Е. А., Зимина М. Г., Кравцовой В. И. (кафедра картографии географического факультета МГУ) [3], а также в других отечественных и зарубежных публикациях [12-15]. В соответствии с прежними исследованиями инфракрасная съемка (ИК) в дальнем диапазоне позволяет определять интенсивность теплового излучения земных объектов, в том числе водоемов и речных водотоков. Как известно, эта физическая характеристика является довольно изменчивой и ее величина зависит от времени суток и календарного времени года, от прихода солнечной энергии и состояния самого исследуемого природного объекта, которое определяется его физическими и химическими свойствами в момент космосъемки. В этой работе основное

внимание уделялось определению температурных характеристик поверхностных слоев водных масс рек, озер и водохранилищ, а также температурному фону в их прибрежных зонах и на отдельных эрозионных врезках, где наблюдаются выходы родников, выклинивание и разгрузка подземных вод с характерными низкими температурами воды.

Из предыдущих исследований известно, что термический режим рек и водоемов отличается непостоянством и динамичностью в отдельные сезоны, в суточном и многолетнем разрезе. Наибольшая температурная изученность характерна для крупных озер и водохранилищ Тверской области: Верхневолжское вдхр., Ивановское вдхр. и Рыбинское вдхр., оз. Селигер и т.д. (рисунок 1). Вместе с тем их термический режим отличается некоторыми особенностями. В частности, Верхневолжское водохранилище в зимний период характеризуется прогревом придонных слоев в его озерах и слабым нагреванием воды в их протоках. В летний период, когда здесь устанавливается прямая температурная стратификация, разница температур между поверхностными и придонными слоями озерных вод составляет $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ с четко выраженным слоем скачка на глубине 3-5 м [4].

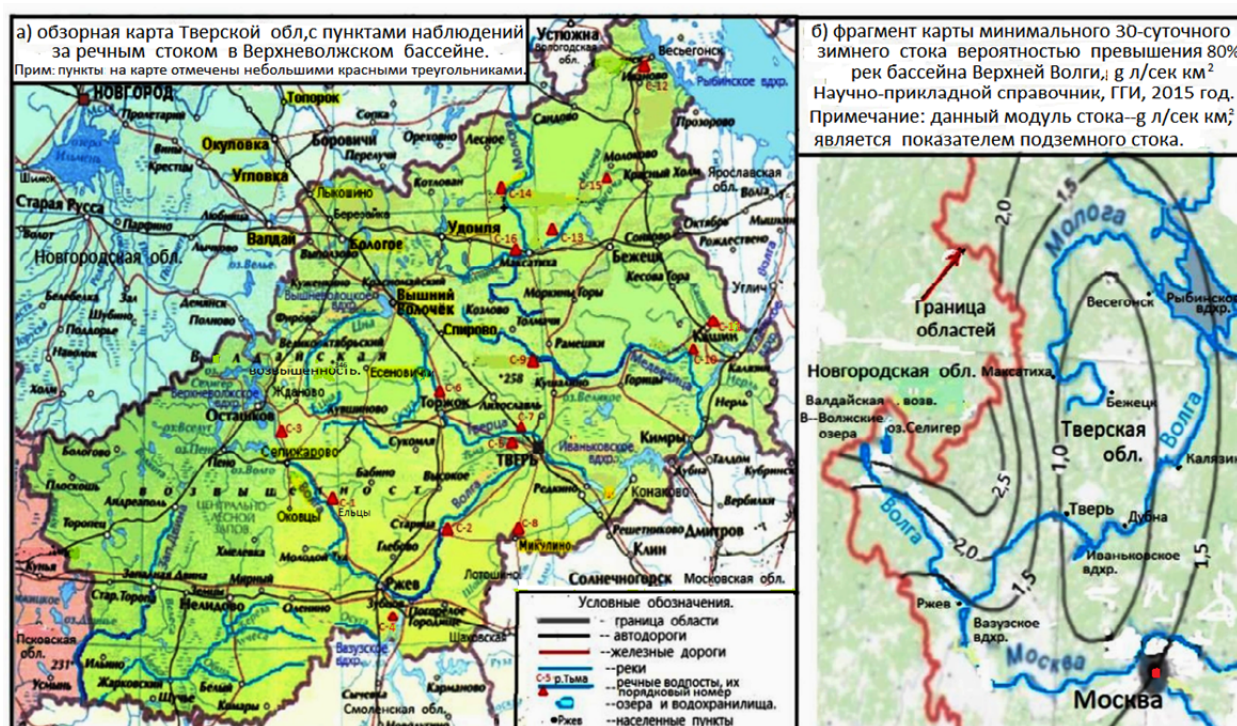


Рисунок 1 – Карта Тверской области с нанесенными пунктами наблюдений за речным стоком в бассейне Верхней Волги (а) и фрагмент карты среднееголетнего минимального 30-суточного зимнего речного стока Верхневолжского бассейна, ГГИ, 2015 г. [7] в Тверском регионе (б)

Другое крупное водохранилище Тверского региона – *Иваньковское* вследствие высокой проточности и малых глубин отличается слабо выраженным расслоением температуры по глубине. В декабре-январе при обратной стратификации температура воды его придонного слоя не превышает $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4]. Во время интенсивной предвесенней сработки наблюдается гомотермическое состояние водной массы. Летняя прямая стратиграфия на этом водохранилище начинает возникать по достижению температуры воды $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, и при этом отмечается почти повсеместно, но часто бывает непродолжительной. Причиной ее неустойчивости является усиление ветрового и волнового перемешивания озерных водных масс, которое приводит к установлению гомотермии. Причем она сначала наблюдается на Волжском и мелководном Шошинском ($H_{\text{г.л.}} = 2-3\text{ м}$) плёсах, а позднее в приплотинной части Ивановского вдхр. [4]. Наиболее четко процессы установления прямой и обратной температурной стратификации выражены в глубоководной части *Рыбинского вдхр.*

Наблюдения за термическим режимом рек также регулярно проводятся в нашем регионе [5]. Известно, что температура воды на всех реках Тверского региона в летний период в основном зависит от температуры воздуха, а также от интенсивности подземного притока, воды которого имеют низкую температуру, особенно из глубоких водоносных горизонтов. В то же время малым водотокам в летне-осеннюю межень свойственна более высокая зависимость температуры речных вод от температуры воздуха из-за лучшей их прогреваемости.

Температурный режим грунтовых и глубоких подземных вод отличается друг от друга. В первом случае для близко залегающих подземных вод от земной поверхности он сильно зависит от температуры воздуха, и колебания температуры грунтовых вод имеют здесь более сглаженный характер [9]. Во втором случае температура воздуха в летне-осенний период почти не влияет на температуру глубоких подземных вод. Температурная разница глубоких подземных вод в местах их выхода и речных и озерных вод составляет летом в нашем регионе 5-10 °С и более, увеличиваясь в жаркие сезоны. Как правило, в местах интенсивной и повышенной разгрузки глубоких подземных вод происходит их внедрение и проникновение в поверхностные воды (рисунок 2). При этом здесь может заметно понижаться температура речных и озерных вод [9, 10].

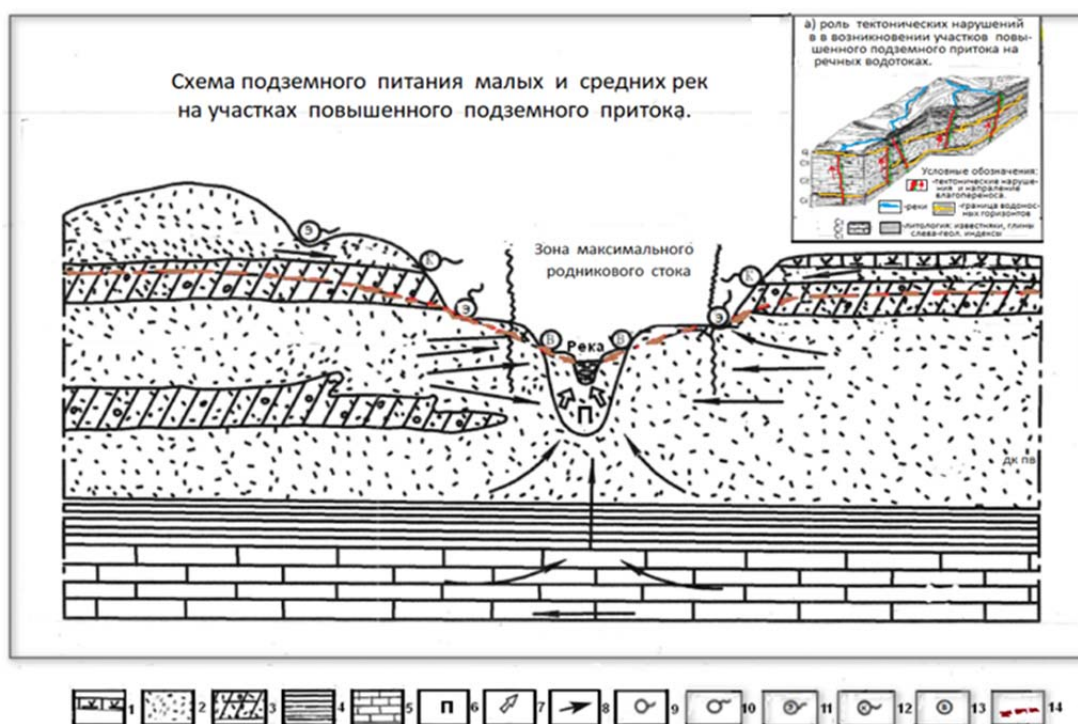


Рисунок 2 – Схема подземного питания малых и средних рек на участках повышенного подземного притока (автор к.г.-м.н. Просеков А. М., МГРЭ ПГО «Центрогеология», 1987 г.) и схематический рисунок-вставка – роль тектонических нарушений в возникновении участков повышенного подземного притока на речных водотоках.

1 – торф; 2 – пески; 3 – суглинки; 4 – глины; 5 – известняки; 6 – палеодолина; 7 – субаквальная разгрузка подземных вод; 8 – направление движения подземных вод; 9 – нисходящие родники; 10 – восходящие родники; 11 – эрозионные родники; 12 – контактные родники; 13 – склоновое высачивание; 14 – депрессионная кривая подземных вод

Такие аномальные участки на летних тепловых космоснимках в акваториях отдельных рек и водоемов выделяются более темным контрастным фототонном на черно-белых фотографиях или повышенной интенсивностью цвета до темных его оттенков на цветных однородных космоснимках. В то же время русла малых рек исследуемого района на летних черно-белых ИК-фотографиях из космоса отображаются преимущественно серым цветом или светлыми тонами на цветных однородных снимках, иногда не сплошной линией или вовсе отсутствуют.

Подрусловой сток крупных, средних и малых рек также может не выявляться при проведении ИК-космосъемки в теплый сезон, так как она фиксирует только температуру водной или земной поверхности. В зимний период крупные водоемы и реки на ИК-космоснимках уже характери-

зуются светлой тональностью, и малые реки могут быть совершенно незаметными. Как известно, на качество тепловых снимков часто влияют неблагоприятные погодные условия: высокая облачность, атмосферные осадки, туманы и т.д. При кратковременных похолоданиях или в период продолжительных дождей, которые иногда могут наблюдаться в нашей зоне в летний период, возникающие площадные температурные различия речных и озерных вод постепенно сглаживаются. При этом на черно-белых ИК-космоснимках, полученных в такую погоду, преобладают серые фототона, что не позволяет использовать эти фотографии в нашей работе.

Из предыдущих исследований известно, что температурные аномалии на летних ИК-космоснимках, относящиеся к водным объектам, графически могут выглядеть в виде концентрированного или размытого «пятна» разного по площади, тонкой или утолщенной линии и т.д. [9]. Как ранее установлено, многие выделенные температурные аномалии на малых, средних и больших реках часто приурочены к рельефным «депрессиям» – низинам, ложинам, впадинам, эрозионным врезам и т.д. Здесь же возможны глубинные геолого-структурные нарушения, которые создают благоприятные условия для вертикального влагопереноса, в том числе для возникновения «гидрогеологических окон» и повышенных аномалий подземного стока [9, 10]. Линеаментный анализ многозональных космоснимков в некоторых случаях позволяет выделить участки этих геологических структур.

Но на практике, на примере реки Тифины, неотектоническая активность в отдельном речном бассейне и частые выходы подземных вод на дневную поверхность не всегда приводят к формированию повышенного подземного стока. Согласно предыдущим исследованиям, кроме этого положительного геолого-структурного фактора, необходимо наличие благоприятных гидрогеологических условий на территории речного водосбора: высокая продуктивность и обводненность подземных водоносных горизонтов, дренируемых речной сетью, а также высокие фильтрационные характеристики водовмещающих пород и активный водообмен между рекой и подземными водоносными горизонтами (см. рисунок 2).

При анализе фотоматериалов космической ИК-съемки необходимо знание гидрометеорологических характеристик на момент ее проведения и в предшествующий период: наличие облачности, температура воздуха, атмосферные осадки, водность периода, уровни грунтовых вод, расходные величины попусков и сбросов воды из озер и водохранилищ. Кроме этого, на предварительном этапе необходимо ознакомиться с обзорными географическими, почвенными, геологическими, гидрологическими, геологическими, гидрогеологическими картами и разрезами и т.д. (рисунки 3-5), чтобы иметь представление о природных условиях изучаемого района. Как известно, минимальный сток в летнюю и зимнюю межень характеризует подземный сток исследуемого региона, поэтому особое внимание должно уделяться анализу гидрометрической информации на изучаемых реках для периода низкого стока (см. таблицу).

Общая характеристика подземного стока Верхневолжского бассейна в Тверской области и связь его параметров с геологическими условиями этого района. Подземный сток Верхневолжского гидрогеологического района формируется в основном на Валдайской возвышенности, которая располагается на западе Тверской и соседней Новгородской областях (см. рисунок 1). Здесь пресные воды приурочены к закарстованным известнякам и доломитам девонского и каменноугольного возрастов, залегающим близко от поверхности над относительно маломощными четвертичными отложениями (И. С. Зекцер, ИВПАН, 2015 г.) [7]. Благоприятные условия питания, хорошая проницаемость карбонатных отложений, густая и глубоко врезанная эрозионная сеть на указанной возвышенности определяют формирование значительного подземного стока с высокими его параметрами ($q^n = 2,5-3,0$ л/с·км²). Несколько меньшие показатели этого вида стока наблюдаются в бассейнах рек Тверцы, Вазузы и т.д.

В пределах Верхневолжской низины (по Волге начинается ниже г. Старицы), Молого-Шекснинской и Нерльской низменностей, Верхне- и Среднемоложской низин, расположенных в юго-восточной, северной и северо-восточной частях Тверской области, отложения четвертичного возраста и песчано-глинистые толщи юры, мела и перми характеризуются неравномерной и слабой обводненностью (см. рисунки 3-5). Наличие морены и незначительная глубина эрозионного вреза рек (25-30 м) снижают здесь интенсивность питания водоносных горизонтов и величину подземного стока ($q^n = 1-1,5$ л/с·км²), а в депрессиях (район Рыбинского водохранилища) она менее 1 л/с·км².

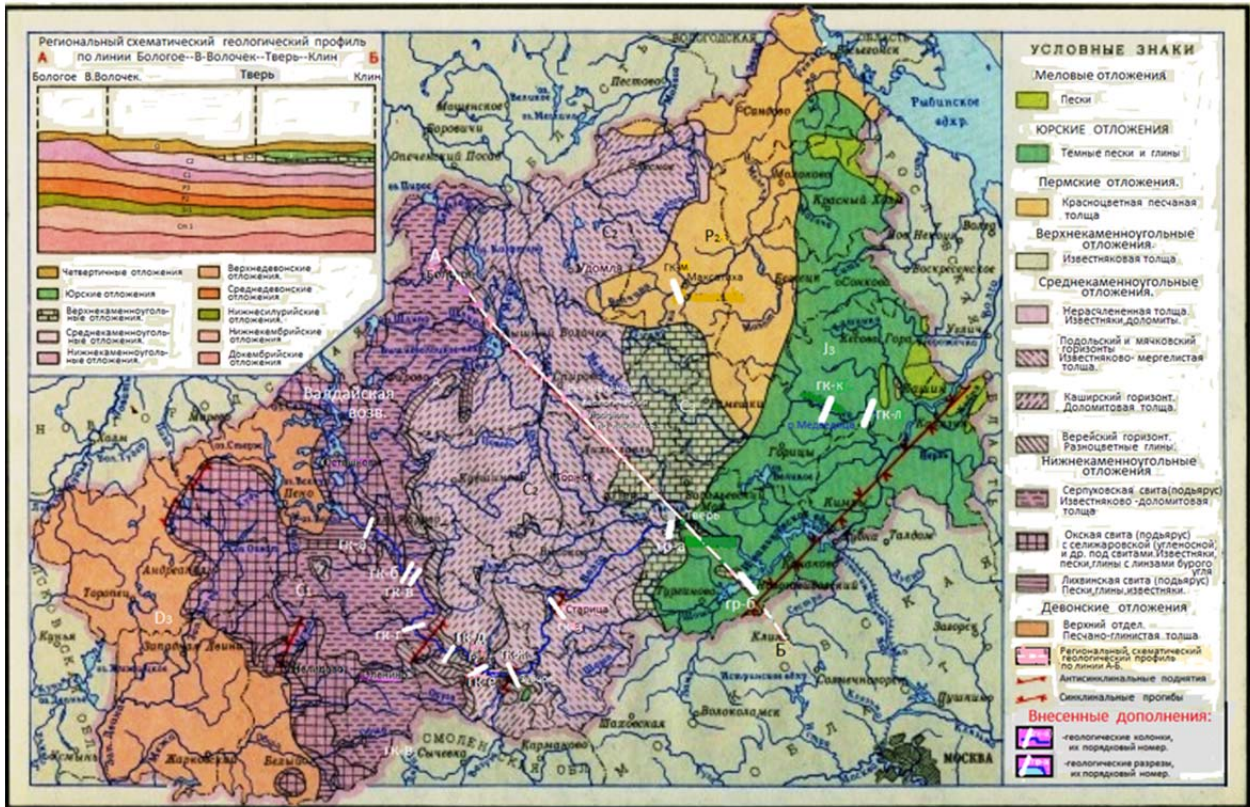


Рисунок 3 – Обзорная геологическая карта Тверской области из «Атласа Калининской (Тверской) области», ГУГК, 1964 г. [1] с нанесенными створами геологических разрезов и литологических колонок на отдельных крупных реках. Эти створы выделены белыми линиями

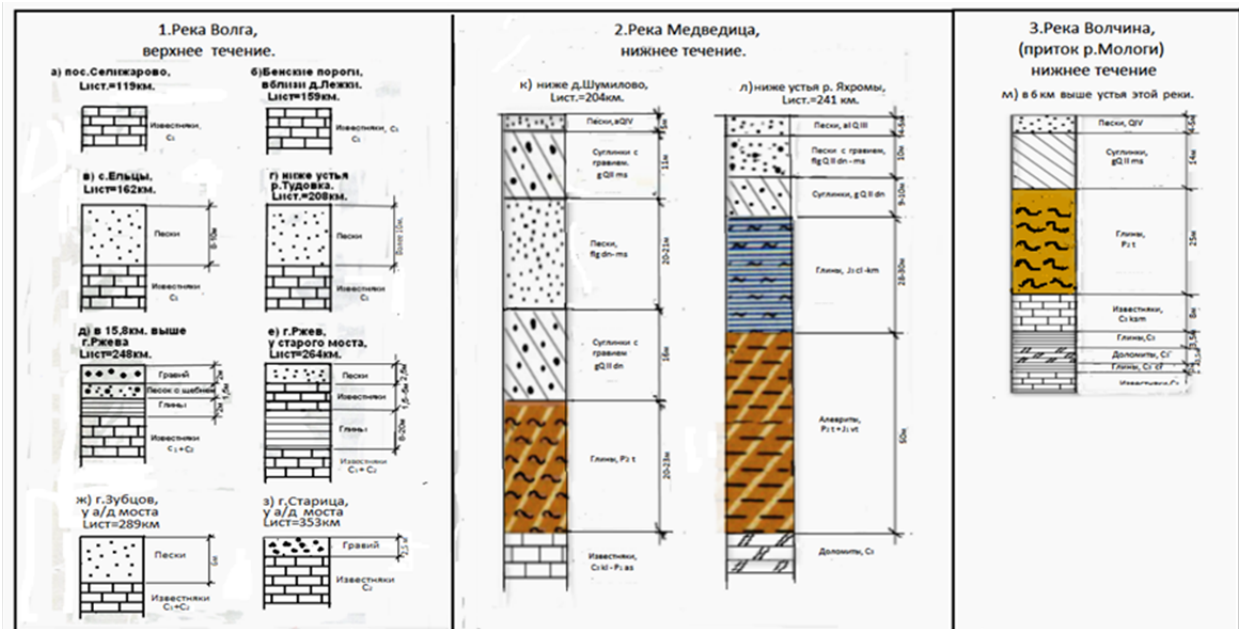


Рисунок 4 – Геологические колонки по отдельным створам крупных водотоков Тверской области: 1. Река Волга, верхнее течение; 2. Река Медведица, нижнее течение; 3. Река Волчина, нижнее течение. Составлены по данным ФА «Роснедра», 1970-1985 гг.; ПИ «Гипроспецгаз», Л., 1982 г.; ПИ «Гипродортранс», М., 1982 г.; ОАО «Синдус», Тверь, 2010 г.

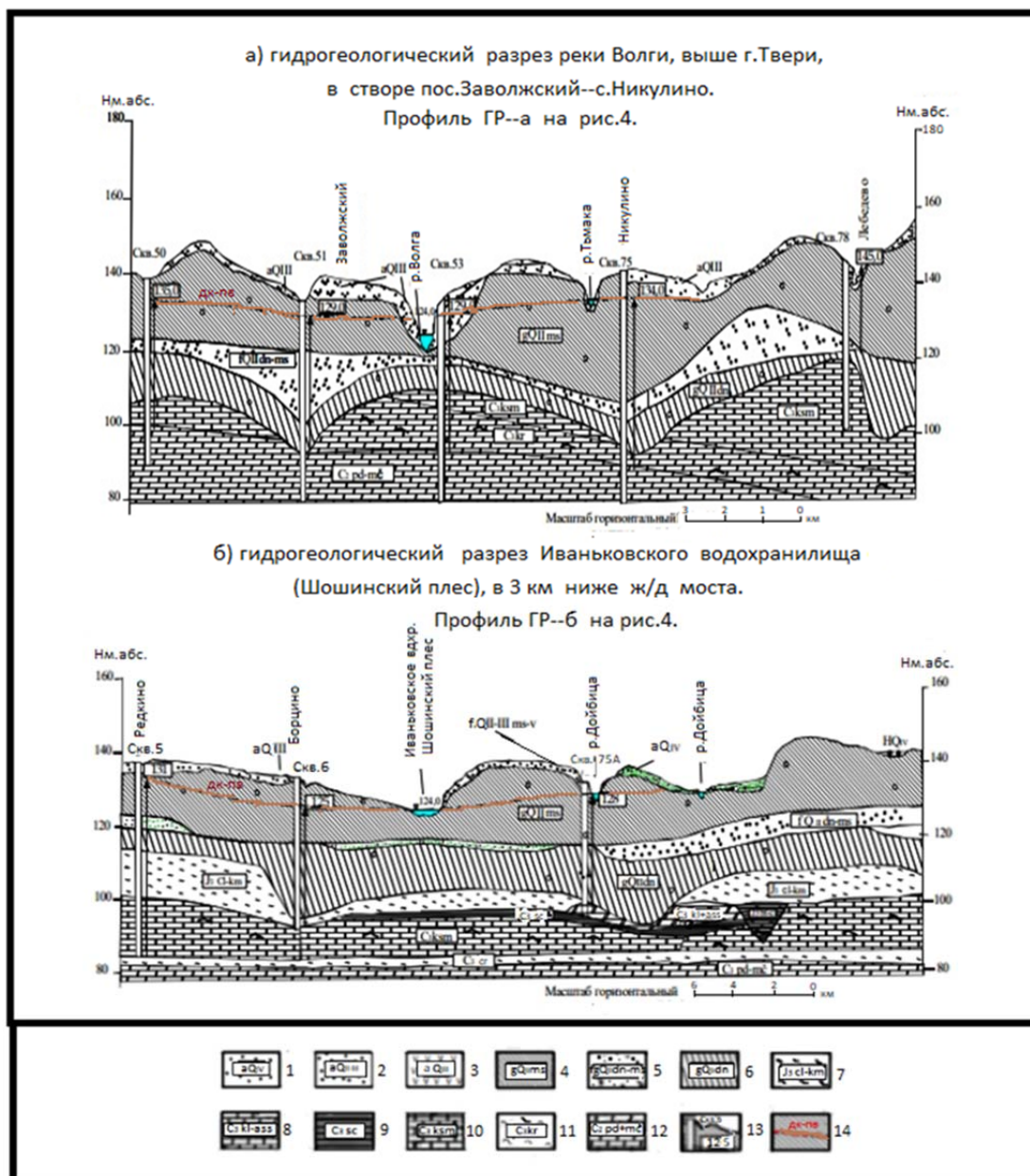


Рисунок 5 – Схематические гидрогеологические разрезы по р. Волга, выше г. Твери (а) и по Ивановскому водохранилищу в районе Шошинского плёса (б), по данным Ивановской НИС, ИВПАН, 2013 г. [2].
 Водоносные горизонты и водоупоры: 1 – современные аллювиальные отложения, пески; 2 – верхнечетвертичные водоносные горизонты, пески; 3 – болотные отложения, торф; 4 – московский ледниковый слабоводоносный горизонт, моренные суглинки; 5 – днепровско-московский водно-ледниковый водоносный подгоризонт, пески, гравий; 6 – днепровская ледниковая толща, валунные суглинки; 7 – келловей-киммериджский водоупор, глины; 8 – клязьминско-ассельский водоносный горизонт, доломиты, реже известняки; 9 – щелковский водоупор, мергели, глины; 10 – касимовский водоносный горизонт, доломиты, известняки, мергели; 11 – кревкинский водоупор, глины; 12 – подольско-мячковский водоносный горизонт, известняки, доломиты; 13 – гидрогеологическая скважина, ее номер, абсолютная отметка пьезометрического уровня; 14 – пьезометрический уровень напорных вод (ПУ-НВ), м абс.

Ранее, до 80-х годов прошлого века, т.е. до наступления предполагаемого глобального потепления, эффективным показателем подземного притока в реки являлся среднеголетний минимальный зимний 30-дневный сток (см. таблицу). При этом его расчетные величины были близкими к характеристикам подземного стока, определяемых методом расчленения гидрографа [5, 8]. Если проследить распределение среднеголетних параметров зимнего стока рек ($F > 2000 \text{ км}^2$), то они уменьшаются в восточном направлении, от максимальных его значений в

Среднегодовое расчетное минимальное зимнее 30-дневное стоковое
по основным рекам Верхневолжского бассейна в Тверской области

Номер створа (см. рисунок 1, а), река, водпост	Площадь водосбора, Гкм ² / рас- стояние до устья, Лкм	Расчетный период, ГГИ, 2015 год [7]	Минимальный зимний 30-дн. сток: расходы воды Q ^p м ³ /с, модуль стока q ^p л/с·км ²			
			Вычисления ГГИ, 2015 г., расчеты по 2010 г. и ранее по годам [7]		Вычисления ГГИ, 1986 г., расчеты по 1980 г. и ранее по годам [5]	
			Q ^p , м ³ /с	q ^p л/с·км ²	Q ^p , м ³ /с	q ^p л/с·км ²
С-1, р. Волга, в/п с. Ельцы	9130 3369	1936-1980	–	–	(21,9)*	(2,4)**
С-2, р. Волга, в/п г. Старица	21100 3178	1882-2010	(49,9)	(2,36)	(42,1)	(2,0)
С-3, р. Селижаровка, в/п с. Яровинка	2390 22	1932-1994	(12,7)	(5,31)	(11,4)	(4,8)
С-4, р. Вазуза, в/п д. Золотилово	5510 24	1948-1976	5,39	0,98	4,90	0,89
С-5, р. Тьма, в/п с. Новинки	1800 13	1937-1999	3,81	2,12	3,21	1,8
С-6, р. Тверца, в/п д. Прутенка-б, р. Тверца, в/п д. Прутенка	4240 96	1926-1972	–	–	(9,7*)	(2,3*)
С-7, р. Тверца, в/п с. Медное	5400 40	1939-1972	–	–	(13,0*)	(2,4*)
С-8, р. Шоша, в/п с. Микулино	1320 51	1970-2006	2,22	1,68	1,67	1,3
С-9, р. Медведица, в/п с. Никольское	1160 161	1956-1994	1,11	0,96	0,97	0,84
С-10, р. Медведица, в/п с. Б. Сетки	3900 71	1907-2010	5,27	1,35	3,88	0,99
С-11, р. Кашинка, в/п г. Кашин	514 18	1965-1980	–	–	0,65	1,3
С-12, р. Кесьма, в/п д. Самша-2	388 23	1964-1994	0,27	0,69	–	–
С-13, р. Молога, в/п д. Боровское	5750 307	1955-1985	4,9	0,85	4,28	0,74
С-14, р. Молога, в/п с. Спас-Забережье	10200 238	1937-1992	12,6	1,24	10,9	1,1
С-15, р. Могоча, в/п с. Борисосоглеб	1230 33	1948-2000	1,39	1,13	1,11	0,9
С-16, р. Волчина, в/п д. Волчинское лестничество	2990 13	1954-1999	5,6	1,87	4,85	1,6

*Параметры зимнего стока приведены для зарегулированных рек.
**Для р. Тверцы вместо зимнего стока даны характеристики подземного стока ГГИ, 1974 г. [8], так как в зимний период здесь наблюдаются большие сбросы из Верхневолжского водохранилища.

верховьях Волги, на Валдайской возвышенности до минимальных в северо-восточной части Тверской области (см. рисунок 1, б). Как указывалось, это связано с изменением гидрогеологических условий дренирования водоносных горизонтов речной сетью (см. рисунок 3).

В отличие от малых и средних водотоков Тверского региона р. Волга, имея значительную глубину эрозионного вреза (около 100 м и более в зависимости от рельефа), дренирует верхние и глубокие водоносные горизонты девонских и каменноугольных отложений. В верхнем течении Волги – выше в/п с. Ельцы в подземном питании реки большую роль играют грунтовые воды, а ниже этого участка возрастает в нем доля глубоких подземных вод карбона. Об этом же свидетельствует химизм речных и подземных вод [10, 11].

Подрусловые отложения волжского водотока от истока до г. Старицы представлены известняками и доломитами верхнего девона или нижнего и среднего карбона, иногда сверху прикрытые небольшой толщей аллювиальных песков, гравия, реже глинами (см. рисунок 4). Ниже г. Старицы, когда Волга выходит на равнины Верхневолжской низины, в геологическом разрезе этой реки наблюдаются большие толщи глинистых пород разных геологических возрастов, которые препятствуют активному вертикальному водообмену (см. рисунок 5). Необходимо отметить, что на этих участках Волги происходит активная разгрузка подземных вод в результате неотектонических процессов и влияния других благоприятных геологических факторов согласно гидродинамическим и гидрохимическим данным Ивановской НИС ИВПАН [2].

Материалы и методы. Используются тепловые космоснимки, полученные ИСЗ Landsat 5 – 6 канал, длина волн $\lambda = 10,4-12,5$ мкм; и ИСЗ Landsat 8 – 10 канал, длина волн $\lambda = 10,6-11,19$ мкм, выполненные в черно-белом и красном изображении [6]. При этом представленные фотографии «скачивались» с известных сайтов без потери качества из первоисточников в электронном виде TIFF, IMG и т.д. [6]. Космоснимки красного цвета, относящиеся к ИСЗ Landsat 8 – 10 канал, были заимствованы с сайта: [https //apps.sentinel-hub.com](https://apps.sentinel-hub.com). Ранее для лучшей визуализации ИК-изображений они получены путем трансформации черно-белых космofотоснимков с сохранением интенсивности доминирующего красного цвета. Как известно, красный цвет по интенсивности варьирует от ярко-желтого или бледно-красного (в тени) оттенка до темно-красного бордового цвета, что соответствует на черно-белых космоснимках светлому и черному фототону.

Согласно предыдущим исследованиям при дешифрировании тепловых космоснимков применяются визуальные фотографические и компьютерные методы по отдельным программам: ERDAS, Imagine, ER Mapper, PCI, EASY/Pace, ENVI и т.д. [12-15]. В этой же работе по причине отсутствия электронных устройств для цифровой обработки космоснимков использовались только фотографические методы.

Результаты исследований. В процессе научных изысканий в 1987-1990, 2021-2023 гг. был получен значительный практический опыт использования тепловых ИК-космоснимков, который касается следующих научных тем:

1. Общие закономерности распределения плотности фотона и интенсивности цвета на реках, озерах и водохранилищах при дешифрировании тепловых космоснимков. При анализе многочисленных черно-белых и цветных тепловых космоснимков в летние периоды за разные годы водные акватории больших рек, озер и водохранилищ выделялись преимущественно темными оттенками и тональностью на общем фоне окружающего ландшафта (рисунки 6-9). Как известно, основная разгрузка подземных вод на нашей территории происходит в эти водные объекты: крупные реки – Волга, Молога, Тверца и т.д., волжские водохранилища и большие озера. Этот природный процесс менее интенсивно происходит и в засушливые годы. В это время на ИК-фотографиях из космоса крупные водоемы и реки выделяются более светлыми тонами, с сохранением их контуров. Об активной разгрузке подземных вод в эти водные объекты свидетельствуют гидрометрические и гидрохимические данные, а также карты гидроизопьез и напоров отдельных водоносных горизонтов, на которых движение глубоких подземных вод направлено к крупным водотокам и водоемам [9, 10].

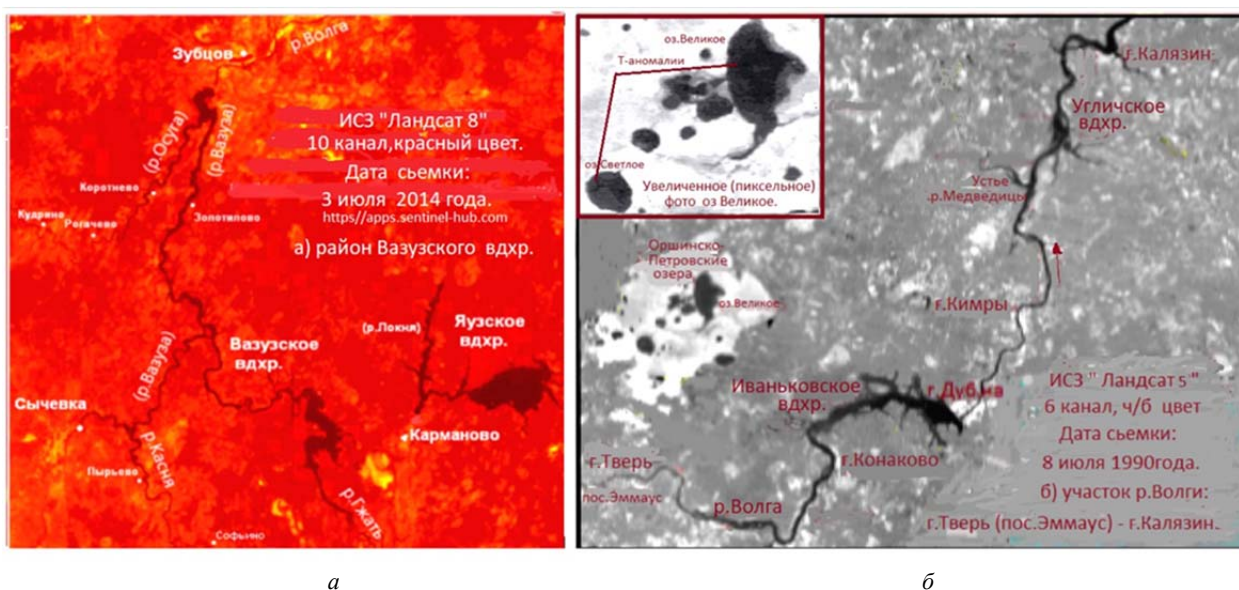


Рисунок 6 – Примеры использования качественной тепловой космической съемки, проведенной в разных частях Верхневолжского бассейна: а – район Вазузского вдхр. Снимок Landsat 8 в тепловом ИК-диапазоне (TIR1 = 10,60-11,19 мкм), 03.07.2014 г.; б – участок р. Волги – г. Тверь (пос. Эммаус) – г. Калязин. Снимок Landsat 5 в тепловом ИК-диапазоне ($\lambda = 10,4-12,5$ мкм), 08.07.1990 г. Фотовставка: увеличенное (пиксельное) фото оз. Великое

Необходимо заметить, что в начале идентификации зон повышенного подземного притока на ИК-космоснимках перед нами предстает *осредненная общая картина* повышенной разгрузки подземных вод на крупных реках, озерах и водохранилищах, если судить визуально по преобладающему здесь темному фототону или бордовым оттенкам красного цвета и не использовать технические средства. Причиной первого такого зрительного восприятия ИК-фотографий из космоса является сосредоточение на этих природных объектах большого количества водных масс с более низкой температурой, чем на окружающем ландшафте. Причем эти крупные водные потоки быстро или еле заметно перемещаются, медленно прогреваются и постоянно подпитываются грунтовыми водами в летний период. Кроме этого, на больших и средних реках происходит активное перемешивание русловых вод на мелководьях и перекатах. Выравниванию температуры воды по площади и глубине речных водных масс также способствуют значительные попуски и сбросы из верхних озер и водохранилищ на зарегулированных реках: Верхняя Волга, Тверца и т.д. Причем озерный сток и сбросные расходы воды в летний период могут превышать местный речной сток на Верхней Волге – выше г. Ржева в 2-3 раза и более.

Следует отметить, что активная открытая разгрузка подземных вод может проявляться в узкой прибрежной полосе многих больших рек. Но очень часто, из-за невысокого разрешения тепловой космосъемки ИСЗ Landsat 5 и 8 ($R_{5,8} = 120-100$ м), эти перспективные зоны в речных долинах, где возможны месторождения подземных вод, могут не фиксироваться на ИК-космоснимках. В данных исследованиях так было на Верхней Волге – выше г. Ржева, где в 1988 и 1993 гг. полевыми термометрическими методами в прибрежной зоне были выявлены температурные аномалии речных и грунтовых вод и активная родниковая разгрузка [9]. Однако все указанные отрицательные природные и технические факторы, которые препятствуют использованию ИК-космоснимков в нашей работе, присутствуют не всегда и не во всех случаях, о чем будет изложено далее.

2. Выявление участков температурных аномалий на крупных озерах и водохранилищах визуальным дешифрированием. При анализе большого количества ИК-космофотоснимков в водной акватории крупных волжских водохранилищ и озер иногда на фоне их темных тонов и оттенков визуально выделялись более контрастные зоны температурных аномалий, которые наиболее интересны в наших исследованиях. По нашим данным такие аномальные участки располагаются на следующих крупных водных объектах Тверской области: Угличское вдхр. – в районе г. Калязина, у устьев рек Медведица и Кашинка; на мелководных водоемах ($H_{пл} = 1-3$ м) – озера Великое и Светлое (см. рисунок 7) и в других местах. Там, где присутствуют «стоячие» воды или «медленно текущие» озерные воды (особенно на мелководьях), и становится возможным выделение зон контрастных температурных аномалий на ИК-космоснимках.

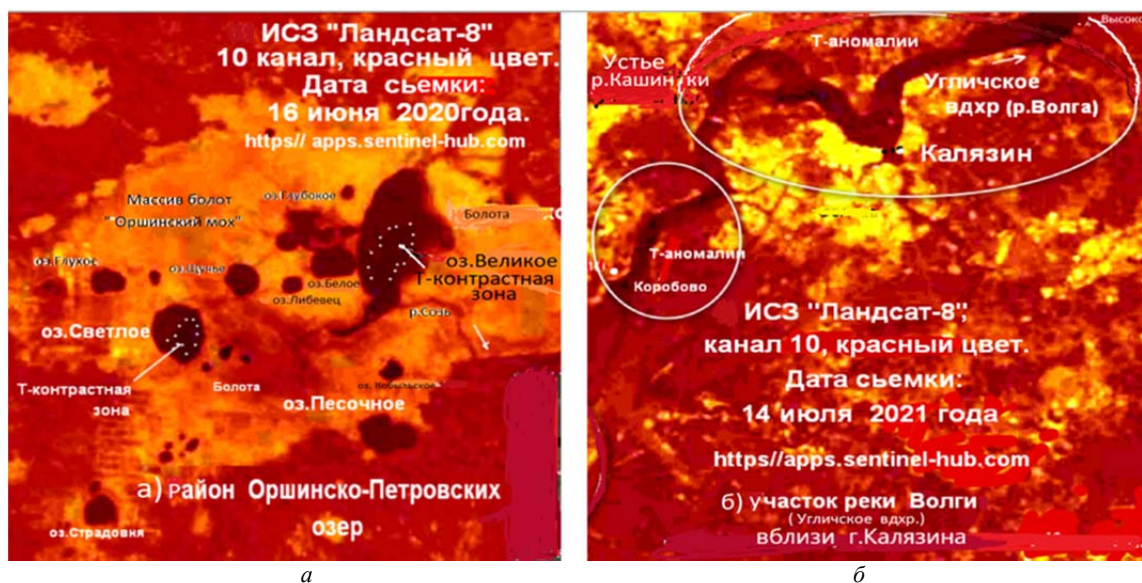


Рисунок 7 – Зоны контрастных температурных аномалий на летних тепловых космоснимках, выявленные визуальными методами в акватории следующих крупных водных объектов Тверской области: а – район Оршинско-Петровских озер. Снимок Landsat 8 в тепловом ИК-диапазоне ($TIR_1 = 10,60-11,19$ мкм), 16.06.2020 г.; б – участок реки Волга (Угличское водохранилище), вблизи г. Калязина. Снимок Landsat 8 в тепловом ИК-диапазоне ($TIR_1 = 10,60-11,19$ мкм), 14.07.2021 г.

3. Выявление участков температурных аномалий на малых и средних реках визуальным дешифрированием. На малых и средних реках нашего региона – реки Тифина и Медведица [$(q^p \sim 1,0)$ л/с·км²] также наблюдаются локальные Т-аномалии, разные по площади (см. рисунок 2). Эти речные участки контрастно выделяются на фоне светлых и серых фототонов на черно-белых космоснимках или при преобладающей доминирующей расцветке на цветных ИК-фотографиях (см. рисунок 8). При этом участки температурных аномалий на реках Тифина и Медведица можно квалифицировать как локальные зоны повышенного подземного притока на фоне его невысоких значений (см. таблицу). Необходимо отметить, что дренируемые водоносные горизонты этими двумя водотоками не столь водообильны (см. рисунок 3). При этом на реке Медведица, в районе с. Замытье, у д. Медведиха, у устья р. Дрезна и в других местах такие аномальные участки приурочены к депрессиям и крупным понижениям (см. рисунок 8, а, фотовставка). На тепловых фотографиях в районе реки Тифина отмечаются протяженные Т-аномалии (см. рисунок 8, б). В 1990 г. в ее бассейне на многозональных КС специалистами МОМКАГЭ ПГО «Аэрогеология» были выделены многочисленные линеаменты – зоны возможных тектонических нарушений [9]. По-видимому, эти геологические структуры повлияли на частые выходы подземных вод на этом водотоке.

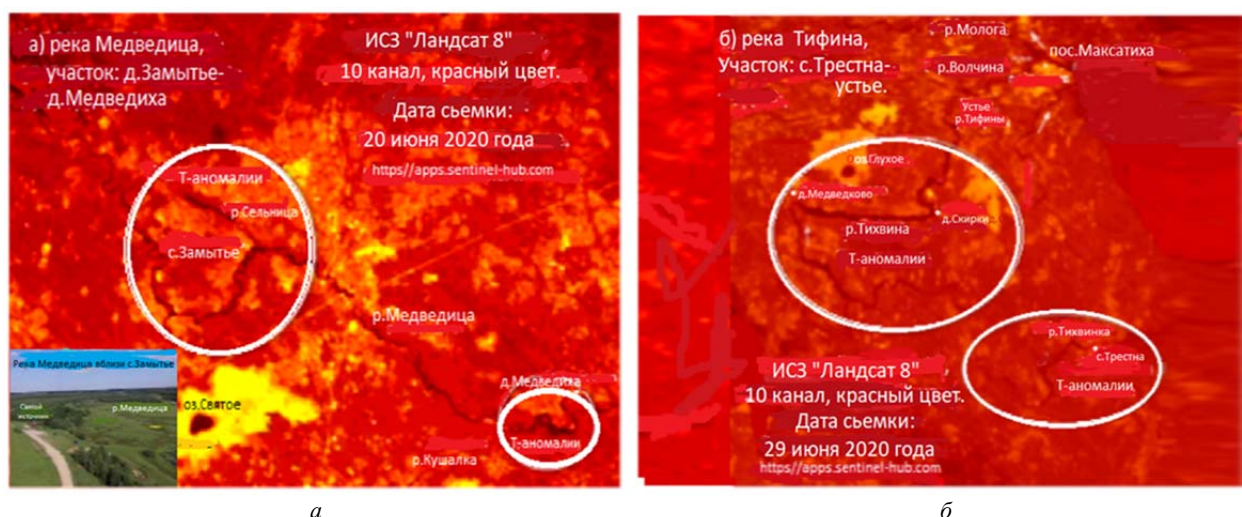


Рисунок 8 – Зоны контрастных температурных аномалий на летних тепловых космоснимках, выявленные визуальными методами на следующих средних и малых реках Тверской области: а – река Медведица, участок д. Замытье – д. Медведиха. Снимок Landsat 8 в тепловом ИК-диапазоне (TIR1 = 10,60-11,19 мкм), 20.06. 2020 г., фотовставка: р. Медведица вблизи с. Замытье, вид с самолета; б – река Тифина, участок с. Трестна – устье. Снимок Ландсат 8 в тепловом ИК-диапазоне (TIR1 = 10,60-11,19 мкм), 29.06. 2020 г.

4. Использование фотографических методов при дешифрировании участков температурных аномалий на тепловых космоснимках. Как известно, визуальное дешифрирование тепловых космоснимков не всегда позволяет выделить отдельные участки Т-аномалий из-за невосприимчивости нашего зрения отдельных перепадов тональности на ИК-фотографиях. По причине отсутствия ОЭК «СВИТ» из технических средств для этих целей нами использованы фотографические методы: усиление контрастности ИК-фотоснимка или перевод его в негатив или в разные цвета и т.д. В частности, чтобы выделить на ИК-фотоснимках участки с наибольшей плотностью фототона или с наибольшей интенсивностью цвета, вначале усиливали контрастность космоснимков до наибольших значений, исключая очень темные крайние тона и цвета, а затем увеличивали фотографию до пиксельного изображения. С использованием этих технических приемов начинаем различать наиболее темные фрагменты в водной акватории рек, озер или водохранилищ, которые выделяем разными контурами или линиями (см. рисунок 9).

Обсуждение. Широкому применению тепловых фотоснимков в наших исследованиях препятствовали следующие факторы: неблагоприятные погодные условия на дату проведения космосъемки, недостаточное ее разрешение, быстрое перемещение и перемешивание больших водных масс на крупных водотоках. Кроме этого, на зарегулированных реках региона – Верхняя Волга, Тверца и т.д. периодические большие сбросы вод из водохранилищ или попуски из верхних

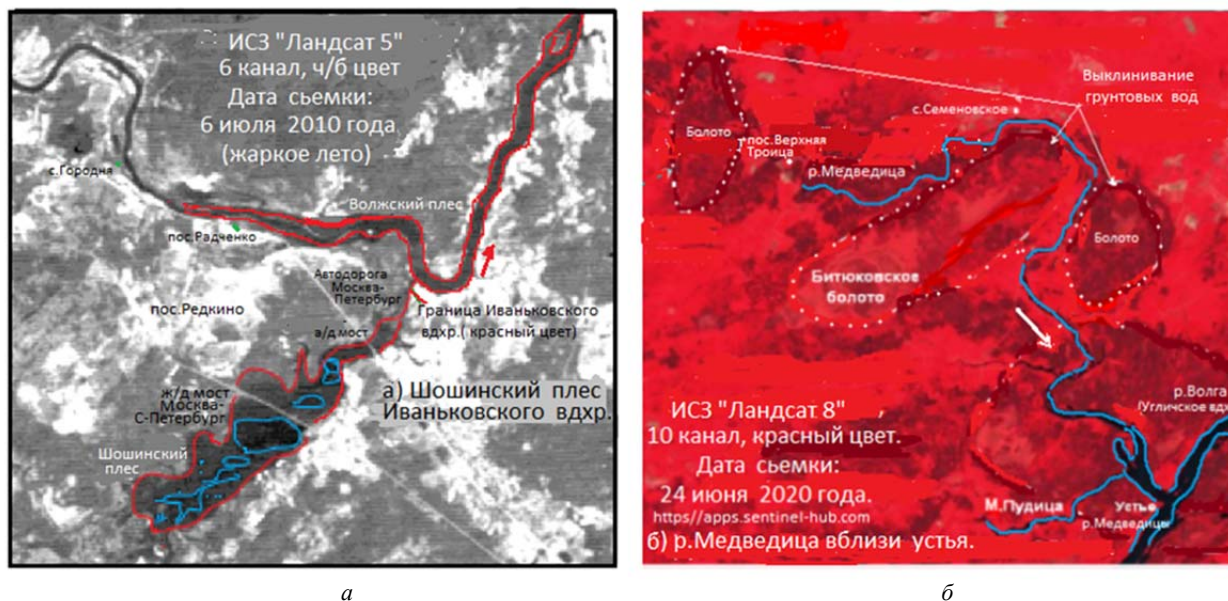


Рисунок 9 – Зоны контрастных температурных аномалий (синий цвет) на летних тепловых космоснимках, выявленные с помощью фотографических методов в бассейне Верхней Волги:

а – Шошинский плёс Иваньковского вдхр. Снимок Landsat 5 в тепловом ИК-диапазоне ($\lambda = 10,4-12,5$ мкм), 06.07.2010 г.;
 б – р. Медведица вблизи устья. Снимок Landsat 8 в тепловом ИК-диапазоне (TIR1 = 10,60-11,19 мкм), 24.06. 2020 г.

озер в летний период выравнивают на этих водотоках температуру речных вод. При этом на таких природных объектах осредняется плотность фототона или интенсивность цвета на ИК-космоснимках, которые по-прежнему остаются высокими на фоне окружающего ландшафта.

Особенно искажают естественный температурный режим этих водных объектов летние дождевые паводки и сработка водохранилищ в этот период. Установлено, что на некоторых летних ИК-космоснимках не были заметны отдельные участки крупных водотоков: река Волга – участок г. Ржев – г. Зубцов и ниже по течению, участок – пос. Селижарово – с. Ельцы; река Молога – участок – устье р. Осень – д. Боровское, расположенный в 20-40 км выше пос. Максатиха (см. рисунок 1, а), где ранее по литологическим, гидродинамическим и гидрохимическим данным был выявлен значительный подрусловой сток [11].

Можно утверждать, что на этих участках крупных рек разгрузка напорных подземных вод происходит преимущественно в подрусловые воды с понижением их температуры, которая не фиксируется при ИК-космосъемке, так как она определяет температуру только поверхностного слоя речных вод. На озерах и водохранилищах, когда здесь наблюдаются очень медленные водные течения или «стоячие воды» (особенно на мелководьях), использование материалов ИК-космосъемки при выявлении участков Т-аномалий может быть более эффективным, так же, как и на малых водотоках (см. рисунки 7-9). При этом крупные озера и водохранилища всегда выделяются на ИК-космоснимках темной тональностью почти по всей акватории. Но в отдельных местах значительный подземный приток глубоких вод с более низкой температурой создает более контрастные зоны на ИК-фотокосмоснимках.

Как упоминалось, на крупных реках Тверского региона наблюдается осредненная температура речных вод из-за больших расходов воды и скоростей течения в летний период. Но на прибрежных участках этих больших водотоков – в местах повышенной разгрузки подземных вод может сохраняться естественный низкий температурный фон, который не фиксируется ИСЗ Landsat 5, 8, если ширина этих зон менее 100 м. В таких случаях для выявления участков высокого подземного притока на этих объектах необходимо выполнить тепловую аэросъемку и традиционные гидрологические и гидрогеологические работы. Но вместе с тем в разные по продолжительности периоды отдельных лет может отсутствовать часть *указанных отрицательных факторов при тепловой космосъемке*. При этом становится возможным использовать часть этой космодиоинформации в наших гидрологических исследованиях.

Заклучение. В научных исследованиях по выявлению участков повышенного подземного притока в реки, озера и водохранилища на предварительном этапе должен проводиться обязательный анализ тепловых разновременных космоснимков по исследуемому району. Также для лучшей визуализации изображений температурных аномалий на ИК-космоснимках необходимо использовать современные методы их компьютерной обработки. В конечном итоге результаты этих исследований с выделенными участками температурных аномалий речных и озерных вод на ИК-космоснимках могут быть использованы при проведении межвенной гидрометрической съемки, гидрохимического опробования, термометрии, кондуктометрии и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Атлас Калининской (Тверской) области ГУГК, 1964.
- [2] Ахметьева Н. П., Лапина Е. Е. Генетическая структура подземного стока в Иваньковское водохранилище // Водное хозяйство России. – 2013. – № 1. – С. 35-51.
- [3] Балдина Е. А., Грищенко М. Ю. Методика дешифрирования разновременных космических снимков в тепловом инфракрасном диапазоне // Вестник МГУ. Серия 5. География. – 2014. – № 3. – С. 35-42.
- [4] Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Водоохранилища Верхней Волги. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 291 с.
- [5] Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1. РСФСР. Вып. 23. Бассейн Волги (верхнее течение). – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 731 с.
- [6] Космические снимки. Сервисы: <https://gis-lab.infocom>; <https://apps.sentinel-hub.com>
- [7] Основные гидрологические характеристики рек бассейна Верхней Волги: Научно-прикладной справочник. – СПб.: ГГИ, 2015. – 129 с.
- [8] Оценка водных ресурсов на территории МАБ. – СПб.: ГГИ, 1974. – 109 с.
- [9] Просеков А. М., Яковлев П. И. Отчет по теме 057-87 «Выявить очаги интенсивной разгрузки подземных вод дистанционными методами (на примере Калининской области)». – Тверь.: ВНИГИК, 1990. – 145 с.
- [10] Яковлев П. И. Выявление участков интенсивной разгрузки подземных вод с использованием дистанционных и гидрологических методов // Разведка и охрана недр. – 2009. – № 7. – С. 43-49.
- [11] Яковлев П. И. Определение подземной составляющей речного стока по гидрохимическим данным на примере Верхней Волги на участке от истока до г. Старицы // Известия вузов. Поволжский регион. Естественные науки. – 2014. – № 1(5). – С. 92-109.
- [12] Degry M. Detection of Submarine Groundwater Discharge (SGD) signal by Stacking Landsat Thermal Infrared (TIR) Images in Jeju Island. Graduate School of Earth and Environmental Sciences Seoul National University February, 2018. 56 p.
- [13] Jensen J. Remote sensing of the environment and Earth resource respective University of South Carolina. 2009. 592 p.
- [14] Object oriented analysis of multi-temporal thermal infrared images // South-Eastern European journal of Earth observation and Geomatics. – 2014. – Vol. 3, No. 2. – P. 415-418.
- [15] Weng Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies methods, applications, and trend // ISPRS photogrammetry and Remote Sensing. – 2009. – Vol. 64. – P. 335-344.

REFERENCES

- [1] Atlas of the Kalinin (Tver region) GUGK, 1964 (in Russ.).
- [2] Akhmet'yeva N. P., Lapina E. E. Genetic structure of underground flow into the Ivankovskoye Reservoir // Water management of Russia. 2013. No. 1. P. 35-51 (in Russ.).
- [3] Baldina E. A., Grishchenko M. Yu. Methodology for deciphering multi-temporal space images in the thermal infrared range // Bulletin of Moscow State University. Series 5. Geography. 2014. No. 3. P. 35-42 (in Russ.).
- [4] Hydrometeorological regime of lakes and reservoirs of the USSR. Reservoirs of the Upper Volga. L.: Gidrometeoizdat, 1975. 291 p. (in Russ.).
- [5] State water cadastre. Long-term data on the regime and resources of land surface waters. Vol. 1. RSFSR. Vol. 23. Volga basin (upper reaches). L.: Gidrometeoizdat, 1986. 731 p. (in Russ.).
- [6] Space images. Services: <https://gis-lab.infocom>; <https://apps.sentinel-hub.com>
- [7] Basic hydrological characteristics of the rivers of the Upper Volga basin: Scientific and applied reference book. SPb.: GGI, 2015. 129 p. (in Russ.).
- [8] Assessment of water resources in the MAB territory. SPb.: GGI, 1974. 109 p. (in Russ.).
- [9] Prosekov A. M., Yakovlev P. I. Report on topic 057-87 "Identification of areas of intensive discharge of groundwater using remote methods (using the example of the Kalinin region)". Tver: VNIIGIK, 1990. 145 p. (in Russ.).
- [10] Yakovlev P. I. Identification of areas of intensive discharge of groundwater using remote and hydrological methods // Exploration and protection of subsoil. 2009. No. 7. P. 43-49 (in Russ.).
- [11] Yakovlev P. I. Determination of the underground component of river flow using hydrochemical data using the example of the Upper Volga in the area from the source to the city of Staritsa // News of Universities. Volga region. Natural Sciences. 2014. No. 1(5). P. 92-109 (in Russ.).
- [12] Degry M. Detection of Submarine Groundwater Discharge (SGD) signal by Stacking Landsat Thermal Infrared (TIR) Images in Jeju Island. Graduate School of Earth and Environmental Sciences Seoul National University February, 2018. 56 p.

[13] Jensen J. Remote sensing of the environment and Earth resource respective University of South Carolina. 2009. 592 p.

[14] Object oriented analysis of multi-temporal thermal infrared images // South-Eastern European journal of Earth observation and Geomatics. 2014. Vol. 3, No. 2. P. 415-418.

[15] Weng Q. Thermal infrared remote sensing for climate urban and environmental studies methods, applications, and trend // ISPRS photogrammetry and Remote Sensing. 2009. Vol. 64. P. 335-344.

П. И. Яковлев

Инженер-гидролог

(Орыс географиялық қоғамының Тверь филиалы, Тверь, Ресей; *akva-petr.1947@mail.ru*)

ТВЕР ОБЛЫСЫ МЫСАЛЫНДА ӨЗЕНДЕРГЕ, КӨЛДЕРГЕ ЖӘНЕ СУ ҚОЙМАЛАРЫНА ЖЕР АСТЫ АҒЫМЫНЫҢ КӨБЕЙГЕН АЙМАҚТАРЫН АНЫҚТАУДА ЖЫЛУЫҚ КЕҢІСТІК БЕЙНЕЛЕРДІ ПАЙДАЛАНУ ТӘЖІРИБЕСІ

Аннотация. Мақалада Тверь облысының су объектілерінде жер асты ағынының жоғарылауы аймақтарын анықтау үшін гидрологиялық зерттеулерде жылу спутниктік суреттерін пайдалану мысалдары келтірілген. Бұл жұмыста Landsat 5 және Landsat 8 термиялық алыс-IR диапазонындағы шетелдік ғарыштық суреттер пайдаланылды. Сонымен қатар зерттелетін аумақтың гидрогеологиялық және гидрологиялық жағдайларының сипаттамасын береді. Зерттелетін өзен бассейнінің жер асты ағынын сипаттайтын су аз кезеңдегі Жоғарғы Еділ өзендерінің минималды ағынына ерекше назар аударылды. Бұл ғылыми зерттеулердің нәтижелері ұқсас мәселелермен айналысатын гидрогеологтар мен гидрологтар үшін пайдалы болуы мүмкін. Жылулық кеңістікті бейнелеу барлық жағдайда мұндай гидрологиялық мәселелерді шешуде тиімді болмауы мүмкін.

Түйін сөздер: жылулық спутниктік сурет, жер асты ағыны, температура ауытқулары, визуалды интерпретация, фотондардың тығыздығы, өзендер, көлдер, су қоймалары.

P. I. Yakovlev

Engineer-hydrologist

(Tver branch of the Russian Geographical Society, Tver, Russia; *akva-petr.1947@mail.ru*)

USE OF THERMAL SPACE IMAGES IN IDENTIFYING AREAS OF INCREASED UNDERGROUND INFLOW INTO RIVERS, LAKES AND RESERVOIRS (BASED ON THE EXAMPLE OF THE TVER REGION)

Abstract. The article provides examples of the use of thermal space images in hydrological studies to identify areas of increased underground runoff on water regions of the Tver region. In this work, foreign satellite images Landsat 5 and Landsat 8 in the thermal far infrared range were used. The description of the hydrogeological and hydrological conditions of the studied area is also given here. Special attention was paid to the minimum flow of the Upper Volga rivers during the inter-war period, which characterizes the underground flow of the studied river basin. The results of these scientific surveys can be useful for hydrogeologists and hydrologists engaged in similar problems. Thermal space not in all cases may be effective in solving such hydrological problems.

Keywords: thermal space photograph, underground inflow, temperature anomalies, visual decryption, density of phototone, river, lake, reservoir.