МЕТОДИКА ЗА ТЕРМАЛНО ДИСТАНЦИОННО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВРЪЗКАТА МЕЖДУ ПОДЗЕМНИТЕ И ПОВЪРХНОСТНИТЕ ВОДИ С БЕЗПИЛОТНА ЛЕТАТЕЛНА СИСТЕМА

Борислав Борисов

Геологически институт „Страшимир Димитров“ – Българска академия на науките
e-mail: bobiborisov@abv.bg

Ключови думи: *термално дистанционно изследване; подземни води; повърхностни води; безпилотна летателна система; теренна проверка*

Резюме. *Представена е методика за откриване и проверка на участъци с вероятен обмен между подземни и повърхностни води чрез съвместно използване на термални и видими изображения от безпилотна летателна система. Методиката обхваща предварителен хидрогеоложки анализ, избор на време за заснемане, планиране на полетите, обработка на изображенията, пространствено тълкуване и теренна проверка. Температурните аномалии се оценяват спрямо близък фонов участък и се проследяват в последователни изображения. При водни повърхности се отчитат ограниченията на геометричното съвместяване. Измервания на температурата и електропроводимостта на водата, както и данни за геоложкия строеж, се използват за разграничаване на подземно дрениране от засенчване, растителност и други смущения. Методът служи за локализиране на зони за подробни хидрогеоложки изследвания, но самостоятелният термален сигнал не доказва произхода или дебита на водата.*

METHODOLOGY FOR UAV THERMAL REMOTE SENSING OF GROUNDWATER–SURFACE WATER INTERACTIONS

Borislav Borisov

Geological Institute “Strashimir Dimitrov” – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: bobiborisov@abv.bg

Keywords: *thermal remote sensing; groundwater; surface water; unmanned aircraft system; field validation*

Abstract. *A methodology is proposed for detecting and verifying possible groundwater-surface water exchange zones using combined thermal and visible imagery acquired by an unmanned aircraft system. The workflow comprises hydrogeological reconnaissance, selection of observation times, flight planning, image processing, spatial interpretation, and field verification. Thermal anomalies are evaluated against nearby background areas and across consecutive frames. The limitations of image matching over moving or uniform water surfaces are explicitly considered. In situ measurements of water temperature and electrical conductivity, together with geological information, help distinguish groundwater discharge from shading, vegetation, and other confounding factors. The resulting maps guide targeted hydrogeological investigations. A thermal contrast alone does not establish groundwater origin or quantify discharge.*

Въведение

Температурата е полезен индикатор за локализиране на обмена между подземни и повърхностни води, когато между двата водни компонента съществува достатъчен топлинен контраст. Пренасянето на топлина от подземните води дава информация за движението им и може да допълни хидравличните и хидрохимичните наблюдения (Anderson, 2005). Термалните изображения позволяват бърз преглед на брегове, речни участъци и влажни зони, но установената аномалия има повече от едно възможно обяснение (Deitchman & Loheide, 2009; Mundy et al., 2017). Снимането с безпилотна летателна система (БЛС) улеснява

пространственото проследяване на малки температурни структури и избора на точки за последваща теренна проверка (Dugdale, 2022; Watts et al., 2023).

В България дистанционните изследвания с БЛС се прилагат в различни направления на екологичния и териториалния мониторинг. Chanev et al. (2024) използват изображения от БЛС за оценка на органично отглеждан лимец и показват значението на периода на заснемане и пространственото агрегиране на данните при съпоставянето им с наземни показатели. Приложението на БЛС за наблюдение на диви животни е разгледано в обзора на Chanev et al. (2023), наред със спътниковите изображения, фотокапаните и GPS проследяването. Приложението на БЛС с термален и видим канал за разпознаване на геоложки структури е представено от Shopov et al. (2021). Работата на Gerginov (2021) показва значението на геоложката хетерогенност за оценката на подземния водообмен. Тези изследвания дават основания термалната информация да се тълкува заедно с геоложките и теренните данни. Целта на настоящата статия е да формулира възпроизводима последователност на работа, разработена въз основа на дисертационно изследване, без да представя непроверени термални аномалии като доказани извори.

Предварителен хидрогеоложки анализ

Преди заснемането се събират геоложки и хидрогеоложки карти, сведения за извори, водоносни хоризонти, пукнатинни и карстови структури, речната мрежа и сезонното изменение на водните нива. За речен участък се отбелязват посоката на течението, потенциалните зони на притоци и местата с възможен обмен през дъното и брега. За езеро се разглеждат бреговата морфология, връзките с околните водоносни тела и колебанията на водното ниво. Пространственото съпоставяне на геология, релеф и водосбор е разработено за оценка на подхранването на подземни води в България от Vasileva (2019). Тук то се използва като предварителен индикатор, а не като доказателство за локален извор.

Термалната аномалия се очаква на границата между води с различни температури. Тя може да отсъства при реално дрениране, когато температурите са сходни, разходът е малък или обменът е под повърхностния слой. В речен басейн оценка на дела на подземното подхранване от хидрографа може да даде независим контекст за теренните наблюдения. Пример от България е изследването на Vasileva et al. (2017) за горното течение на Осъм. Тази оценка обаче се отнася до водосбор и сама по себе си не посочва конкретно място на изтичане.

Показателен за съчетаването на регионален модел и измервания на място е примерът от Опицвет-Драговищенския карстов басейн. Gerginov & Orehova (2010) използват воден баланс, хидрогеоложка карта и измервания на температура и електропроводимост в Драгоманското блато за уточняване на зоните, подхранвани с карстови води. Този подход е приложим като независима проверка на локалните термални признаци. Възможната посока на обмена се съпоставя с хидравличните напори и геоложките условия, преди термалният контраст да се свърже с карстово дрениране.

Оборудване и планиране на обследването

Методиката е разработена за мултикоптерна БЛС с термална и видима камера, например DJI Mavic 3 Thermal. При нея термалният канал е с матрица 640 × 512 пиксела и спектрален диапазон 8–14 μm (DJI, 2026). Точността на отчетената температура зависи от режима на камерата, емисивността, отразеното излъчване и условията на наблюдение. Спецификациите на RTK оборудването описват точността на позициониране на БЛА при определени условия, но сами по себе си не удостоверяват точността на крайния термален ортомозаечен продукт. За повишаване на геометричната точност на получените ортоизображения се използват наземни опорни точки (GCP), като значение имат техният брой и пространственото им разпределение (Sanz-Ablanedo et al., 2018).

Изборът на време започва с анализ на очакваната температура на подземната вода, дневния ход на температурата на повърхностните води, метеорологичните условия и огряването на терена. Ранните сутрешни и късните следобедни часове могат да повишат контраста, но оптималният час се определя за всеки обект с предварителни измервания. Повторни заснемания при различни сезонни условия помагат да се провери устойчивостта на аномалията. Силен вятър, валежи, вълнение и променяща се облачност се документират, защото влияят върху сигнала и сравнимостта на кадрите.

Сезонният избор се обвързва и с режима на изворите. Анализът на Damyanova (2021) на карстовите извори от националната мрежа показва колко различни могат да бъдат условията на наблюдение и наличните режимни данни в отделните карстови басейни. При високи води се търси по-широк обхват на активни изтичания, а при ниски води се проверява

дали локалните сигнали се запазват. Това е работна постановка, която зависи от конкретния обект. Сравняването на два сезона без данни за нивото и дебита може да доведе до погрешен извод за отсъствие на дрениране.

Полетите се планират по успоредни линии с припокриване, съобразено с особеностите на брега, терена и необходимата детайлност. Препоръчителни ориентировъчни стойности са над 80% надлъжно и над 70–80% напречно припокриване. Те подлежат на корекция според действителната текстура и качеството на изображенията. Вертикалните кадри осигуряват обща пространствена свързаност, а наклонените допълват огледа на брегови откоси и места с предполагаемо изтичане. За всеки полет се съхраняват оригиналните термални данни, часът, използваните настройки, височината спрямо терена, метеорологичните наблюдения и информацията за позиционирането.

При планирането се взема предвид различната пространствена разделителна способност на видимата и термалната камера. Термалната стъпка на терена зависи от височината и зрителния ъгъл на термалния канал. Тя не се приравнява към размер на най-малкия разпознаваем извор. Ако предполагаемият приток заема малка част от пиксела, средната отчетена температура се смесва с температурата на околната повърхност. Избират се достатъчно ниска височина и подходяща геометрия на обзора според размера на търсените структури и ограниченията за безопасен полет.

Обработка и тълкуване

Изображенията във видимия диапазон се обработват за получаване на георефериранa подложка. Термалните кадри се проверяват за изместени изображения, наситени участъци и промени в настройките. При наличие на подходящи радиометрични данни се изчисляват температурни разлики между предполагаемата зона на дрениране и близка контролна зона, заснета при сходен ъгъл и в близък час. Разлика между два пиксела сама по себе си не е достатъчна. Анализира се формата на петното, връзката му с бреговата линия, устойчивостта му между кадрите и поведението му във времето (Mundy et al., 2017; Ozotta & Gerla, 2021).

Водната повърхност често е еднообразна и подвижна, което затруднява автоматичното съвместяване на термалните кадри. Затова положение на аномалия се проверява по видими устойчиви ориентири върху сушата и, при съмнение, по отделните оригинални изображения. Термичните граници не се приемат автоматично за геометрични граници на водоносен хоризонт. В географска информационна система (ГИС) се съпоставят термалният сигнал, видимият образ, геоложката карта, релефът, водните обекти и точките от теренните измервания.

Съчетаването на ГИС, изображения от БЛС и фотограметрия по метода Structure from Motion (SfM) намира приложение и при пространственото документиране на археологически обекти (Ciocani et al., 2025). В настоящата методика ГИС осигурява обща пространствена основа за съпоставяне на изображенията и теренните наблюдения.

За сравняване на два полета се използват едни и същи или ясно описани контролни участъци и се отчита промяната в часа на заснемане, сезона и водното ниво. Представят се както абсолютните отчетени температури при посочени настройки, така и разликата спрямо локалния фон. Температурната палитра на визуализацията не се използва като измервателен критерий. Пространственият обхват на аномалията се очертава с отчитане на преходните пиксели по границите и различната разделителна способност на каналите. Когато образите от отделни полети не са пряко сравними, сравнението се ограничава до устойчивостта на мястото и формата на сигнала, без да се извежда тенденция в дебита.

Контрол на температурните измервания и неопределеност

Контролът на радиометричните данни се разглежда като отделен етап преди очертаването на аномалиите. Kelly et al. (2019) установяват, че при изпитаната нерадиометрична камера, условията по време на полета влияят върху температурния дрейф и пространствената еднородност на сигнала. Тези резултати не се пренасят като числена оценка за DJI Mavic 3 Thermal, но обосновават необходимостта от проверка на конкретната камера в реалните условия на обследване. Предлага се преди основния полет да се направи кратка серия над устойчиви контролни повърхности, след стабилизиране на камерата съгласно указанията на производителя. Проверява се дали отчетените температури се изменят във времето при приблизително постоянни условия. Кадри непосредствено преди и след автоматична корекция на нееднородността се съпоставят за възможни прекъсвания в температурния ред. Ако се установи системно отклонение, неговото отстраняване се документира и не се заменя с настройване на цветовата палитра.

При обследване на реки особено значение има разграничаването между пространствена температурна структура и отклонение, възникнало по време на полета. Dugdale et al. (2019) показват, че термалните изображения могат да локализират отделни топлинни притоци, докато дрейфът на сензора ограничава надеждността на абсолютните температури. Поради това в предложената методика всяка предполагаема аномалия се проверява в няколко припокриващи се оригинални кадъра. Проследява се дали петното остава свързано с една и съща географска позиция или следва положението си в изображението. Повтарящо се отклонение към края на кадъра може да насочва към инструментален ефект. При възможност се изпълнява повторно преминаване над избрани участъци, което позволява да се оцени възпроизводимостта на сигнала. За сравнение се подбират кадри с близка геометрия на наблюдение, тъй като промяната на ъгъла може да измени отражението от водната повърхност.

(1) $$\Delta T = T\text{а} - T\text{ф}$$

За представяне на локалния контраст се предлага използване на разликата по формула (1), където Та е представителната температура на избрания участък, а Тф – на съседна фонова зона в същия кадър. За представителна стойност може да се използва медианата на валидните пиксели, като се посочват броят им и диапазонът на температурите. Контролната зона се избира при сходни условия на осветеност, растителност и наблюдение. В анализа се избягват единични крайни пиксели и смесени пиксели по бреговата линия. Не се задава универсален праг на ΔT за всички обекти – разглеждат се изменчивостта на фона, повторяемостта между кадрите и разликата спрямо наземните измервания. Практическият критерий е сигналът да се отличава от характерните колебания в контролните зони и да има независимо хидрогеоложко обяснение.

Неопределеността се описва отделно за температурата и за пространственото положение. При наземна проверка се записват дълбочината на температурния датчик, часът и разстоянието до наблюдаваното петно – температурата под водната повърхност може да се различава от термално отчетената повърхностна температура. Геометричната проверка използва независими контролни точки върху устойчиви теренни елементи, когато такива са налични. При недостатъчно надеждно съвместяване се записва приблизителното положение на аномалията и се планира допълнителна проверка. Пространствената резолюция, точността на позициониране и температурната точност се представят като различни характеристики. Тази последователност позволява ограниченията да бъдат проследени до конкретния етап на получаване на данните и подпомага избора на участъци за повторно обследване.

Теренна проверка и ограничения

Подбраните аномалии се посещават на терен. В предполагаемата зона и в контролните участъци се измерват температурата и електропроводимостта на водата. При възможност се записват pH, водно ниво и признаци за движение на водата. Измерванията се извършват квазисинхронно и се съпоставят със сезонния хидроложки режим. Съчетаването на термален образ и наземно измерване е необходимо за надеждна интерпретация на просмукване на води и извори (Deitchman & Loheide, 2009; Watts et al., 2023).

За всяка проверена точка се съставя кратък запис с координати, дата и час, снимка от терена, положение спрямо брега, измервания в аномалията и контролния участък и оценка за алтернативни обяснения. При достъпни брегове може да се проследи температурата по напречен профил от сушата към водата. Електропроводимостта подпомага разграничаването на различни водни маси само когато техните стойности действително се различават, като сходна електропроводимост не отхвърля дренирането. Ако е необходим дебит, се планира отделно измерване на разхода или водния баланс, вместо да се пресмята от площта на топлинното петно.

За обекти с известни извори се събират и публикувани режимни сведения, но се проверява дали водовземане или инженерни съоръжения не са променили естествения отток. Benderev (2022) разглежда комплексното документиране на значими карстови извори, включително карти, снимки и количествени сведения. При термалното обследване същият принцип помага наблюдаваният сигнал да се свърже с ясно описан обект, а не само с точка върху изображението.

Охлаждане или затопляне може да възникне от сянка, различни свойства на дъното и брега, плитчина, водна растителност, изпарение, локален приток на повърхностна вода или антропогенен източник. Студените аномалии през лятото и топлите през зимата са полезни ориентири, но знакът на температурната разлика не е универсален критерий. Съществено ограничение е, че камерата отчита излъчването от наблюдаваната повърхност и не измерва пряко температурата на подземната вода под нея. Потвърждаването на посоката и интензивността на обмена изисква допълнителни хидрогеоложки наблюдения или количествени методи (Mundy et al., 2017; Dugdale, 2022).

Оценка и представяне на резултатите

След теренната проверка участъците се описват по една и съща схема. Като вероятно подземно дрениране се разглежда устойчив пространствен сигнал, разположен на хидрогеоложки обосновано място, за който теренните измервания показват съответстваща разлика в температурата или електропроводимостта и не е установено по-вероятно повърхностно обяснение. Когато част от тези признаци липсват, участъкът остава зона за допълнителна проверка. Когато сигналът съвпада с постоянна сянка, изкуствен източник или не се възпроизвежда при сходни условия, той не се приема за доказано дрениране. Това е качествена класификация и тя не замества количествена оценка на вероятността.

Крайният продукт включва карта на обследваните участъци с означени дати на заснемане, контролни зони и проверени точки; подбрани термални и видими кадри със съпоставим обхват; таблица на измерванията; и кратък коментар за всяка аномалия. В легендата се разграничават регистриран температурен контраст, теренно потвърдено изтичане и участък, оставен за последващо обследване. Температурната скала, видът на използваното изображение и начинът на георефериране се посочват изрично. При публикуване на температура се описват настройките на радиометричната обработка и се запазва връзката към оригиналния кадър.

Възпроизводимостта може да се подобри чрез полеви протокол с постоянни графи: начало и край на полета, въздушна температура и влажност, облачност, вятър, водно ниво, настройки на термалната камера, време на наземните измервания и координати на контролните точки. При повторни кампании еднаквата структура на записите улеснява проверката дали промяната на аномалията се дължи на хидроложкия режим или на условията на снимане. Ако сезонните наблюдения дадат противоречиви сигнали, тълкуването се отлага до допълнителна теренна проверка.

Заключение

Предложената последователност обединява предварителен хидрогеоложки анализ, съгласувано термално и видимо заснемане, пространствено сравнение и непосредствена теренна проверка. Основният резултат от прилагането ѝ е карта на участъци с различна степен на обоснованост за последващо изследване. Надеждността на тълкуването зависи от температурния контраст, качеството на кадрите, съхранените метаданни и проверката на алтернативните причини за аномалиите. Методиката може да се адаптира към езера, реки и влажни зони според местните геоложки и хидроложки условия.

Литература:

1. Anderson, M. P. 2005. Heat as a ground water tracer. Ground Water, 43(6), 951–968. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00052.x
2. Benderev, A. 2022. Project “Most Important Karst Aquifer Springs” (MIKAS) and Bulgaria’s participation in it. Engineering Geology and Hydrogeology, 36, 45–57. https://doi.org/10.52321/igh.36.1.45
3. Chanev, M., B. Bonchev, D. Valcheva, L. Filchev. 2024. Using of UAV data for monitoring of organic einkorn. Proceedings of the 9th International Conference on Cartography & GIS, Bulgarian Cartographic Association, 154–163.
4. Chanev, M., N. Dolapchiev, I. Kamenova, L. Filchev. 2023. Application of remote sensing methods for monitoring wild life populations: a review. Proceedings of SPIE, 12786, 1278622. https://doi.org/10.1117/12.2681760
5. Ciocani, P., M. Chanev, P. Popov, I. Ivanov, L. Filchev. 2025. Spatial Technologies in Archeology: From GIS Mapping to SFM-Based Modelling. Proceedings of the Twenty-first International Scientific Conference Space, Ecology, Safety SES’2025, SRTI–BAS, 200–206.
6. Damyanova, E. 2021. Analysis of the condition of karst springs included in the National Groundwater Monitoring Network. Engineering Geology and Hydrogeology, 35, 31–39. https://doi.org/10.52321/igh.35.1.31
7. Deitchman, R. S., S. P. Loheide II. 2009. Ground-based thermal imaging of groundwater flow processes at the seepage face. Geophysical Research Letters, 36, L14401. https://doi.org/10.1029/2009GL038103
8. DJI. 2026. Mavic 3 Enterprise Series Specifications. https://enterprise.dji.com/mavic-3-enterprise/specs (достъп: 25.09.2026).
9. Dugdale, S. J. 2022. Looking to the skies: Realising the combined potential of drones and thermal infrared imagery to advance hydrological process understanding in headwaters. Water Resources Research, 58, e2021WR031168. https://doi.org/10.1029/2021WR031168
10. Dugdale, S. J., C. A. Kelleher, I. A. Malcolm, S. Caldwell, D. M. Hannah. 2019. Assessing the potential of drone-based thermal infrared imagery for quantifying river temperature heterogeneity. Hydrological Processes, 33(7), 1152–1163. https://doi.org/10.1002/hyp.13395

11. Gerginov, P. 2021. Geological and tectonic preconditions for hydraulic heterogeneity of the rocks in the area of the Gotse Delchev valley. Engineering Geology and Hydrogeology, 35, 51–61. https://doi.org/10.52321/igh.35.1.51
12. Gerginov, P., T. Orehova. 2010. Hydrogeological study of the Opitsvet-Dragovishtitsa karst basin. Engineering Geology and Hydrogeology, 25, 67–77
13. Kelly, J., N. Kljun, P.-O. Olsson, L. Mihai, B. Liljeblad, P. Weslien, L. Klemedtsson, L. Eklundh. 2019. Challenges and best practices for deriving temperature data from an uncalibrated UAV thermal infrared camera. Remote Sensing, 11(5), 567. https://doi.org/10.3390/rs11050567
14. Mundy, E., T. Gleeson, M. Roberts, M. Baraer, J. M. McKenzie. 2017. Thermal imagery of groundwater seeps: Possibilities and limitations. Groundwater, 55(2), 160–170. https://doi.org/10.1111/gwat.12451
15. Ozotta, O., P. J. Gerla. 2021. Mapping groundwater seepage in a fen using thermal imaging. Geosciences, 11(1), 29. https://doi.org/10.3390/geosciences11010029
16. Sanz-Ablanedo, E., J. H. Chandler, J. R. Rodríguez-Pérez, C. Ordóñez. 2018. Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used. Remote Sensing, 10(10), 1606. https://doi.org/10.3390/rs10101606
17. Shopov, Y., K. Petkova, O. Ognianov. 2021. A new technique for remote location of unknown caves and deep-seated faults by unmanned aerial systems (UAS). Review of the Bulgarian Geological Society, 82(3), 225–227. https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2021.82.3.225
18. Vasileva, T. 2019. An assessment of potential groundwater recharge zones in Bulgaria. Geologica Balcanica, 48(1), 43–61. https://doi.org/10.52321/GeolBalc.48.1.43
19. Vasileva, T., T. Orehova, K. Kroumova. 2017. Groundwater contribution to the river flow for the upper course of the Osam River based on two baseflow separation methods. Geologica Balcanica, 46(2), 73–82. https://doi.org/10.52321/GeolBalc.46.2.73
20. Watts, C. L., C. E. Hatch, R. Wicks. 2023. Mapping groundwater discharge seeps by thermal UAS imaging on a wetland restoration site. Frontiers in Environmental Science, 10, 946565. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.946565