

© А.А. КАЗАКОВ
tomas.sibsac@gmail.com

УДК 528.873.041.3

**ДИСТАНЦИОННОЕ ГЕОТЕРМИЧЕСКОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ
БОЛОТ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ
(на примере Тарманского болотного массива)**

АННОТАЦИЯ. В статье описываются результаты экспериментального применения дистанционного геотермического зондирования Земли при изучении процесса вторичного заболачивания осушенных болот Западной Сибири на примере Тарманской геосистемы. Рассмотрены природные условия Тарманского болотного массива. Приводится описание технологии дистанционного геотермического картографирования. Рассмотрен характер распределения поверхностной температуры болотного массива по тепловому инфракрасному изображению. В результате были созданы геотермические карты территории Тарманской геосистемы, полученные путем обработки космических изображений, сформированных с помощью аппаратуры ТМ и ЕТМ+ (спутники Landsat-4, Landsat-5 и Landsat-7). Показана пространственно-временная динамика распределения теплового поля поверхности болотного массива в интервале 1984—2011 годов. Полученные результаты рекомендуется использовать в оценке процесса вторичного заболачивания осушенных болот Западной Сибири и их температурного режима.

SUMMARY. The article describes the results of experimental application of remote geothermal sensing to study the process of secondary swamping of the drained bogs in Tarmansky geosystem. The natural conditions of Tarmansky marsh massif are considered. The article covers the technological description of the remote geothermal mapping. The characteristics of the surface temperature marsh massif distribution in a thermal infrared image are discussed. As a result there have been drawn geothermal maps of Tarmansky geosystem, received by processing satellite images formed using TM and ETM+ instruments (Landsat-4, Landsat-5, and Landsat-7 satellites). The author shows the spatial-temporal dynamics of the thermal field of the marsh massif surface from 1984 to 2011. The obtained results are recommended to use in an estimation process of secondary swamping of the drained bogs of Western Siberia and their temperature.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Дистанционное зондирование Земли, дистанционное геотермическое зондирование, вторичное заболачивание, тепловая инфракрасная съемка.

KEY WORDS. Remote sensing, remote geothermal sensing, secondary bogging, thermal infrared survey.

Исследование проводилось на Тарманском болотном массиве, залегающем на второй надпойменной озерно-аллювиальной террасе р. Туры. Террасное залегание массива обуславливает его вытянутую форму, ориентированную параллельно основным элементам гидрографической сети. Тарманский болотный массив относится к низинному типу болот, в котором преобладает грунтово-

напорный тип водного питания (от 15 до 87%) [1]. Длина массива 136 км, ширина колеблется от 7 до 40 км. Общая площадь водосбора 2160 км², непосредственно болотом занято 1240 км² (57%). Средняя глубина торфа по всему болоту составляет 2 м. Возраст торфа на глубине 25 см — 1505±50 лет, на глубине 65 см — 3685±40 лет, а скорость торфонакопления — около 0,16 мм/год [2].

Часть исследуемого болотного массива была осушена в 60-80-х гг. XX века. Мелиорируемая площадь составляет 272 га, из которых 60 га осушается гончарным дренажем с глубиной заложения 0,9, 1,2, 1,5 м и расстояниями между дренами соответственно 8, 24, 40 м. Остальная часть осушается открытыми каналами с расстояниями 100, 150, 200 и 250 м [3]. В 90-х гг. в связи с отсутствием службы эксплуатации, ремонт и обслуживание гидротехнических сооружений не выполнялись, осушительные системы пришли в негодность, и наравне с природными процессами это вызвало процесс вторичного заболачивания, о чем свидетельствуют данные режимных наблюдений по гидрогеологическим скважинам [4]. Выбор способов и методов исследования данного процесса, а также оценка его развития и прогнозирование являются актуальной задачей.

Известно, что мелиорация гидроморфных почв приводит к существенным изменениям их температурного режима [5], [6], [7], а неоднородность распределения теплового поля может являться индикатором процессов и явлений протекающих на исследуемой территории.

В наших исследованиях использовался метод геотермического картографирования, реализуемый с помощью аэрокосмической съемки в инфракрасной (ИК) области спектра. Как правило, съемка производится в средней (SWIR) и дальней (TIR) частях ИК области спектра (1,5-3,0 и более 3,0 мкм, соответственно). В указанных спектральных диапазонах распространяется собственное тепловое излучение объектов земной поверхности. Интенсивность излучения тем выше, чем выше температура земной поверхности и зависит от плотности потока суммарной солнечной радиации, поступающей на земную поверхность, альбедо земной поверхности, коэффициента излучения, тепловой инерции, плотности теплового потока из земных недр, влажности почвы, геометрии поверхности и структуры грунта, метеорологических условий, концентрации в атмосфере оптически активных газов (например, CO₂, SO₂) и времени. Оценку этого излучения выполняют с помощью тепловой инфракрасной съемки [8], [9], [10].

Экспериментальная часть. Для проведения данного исследования использовались данные дистанционного зондирования Земли с космических аппаратов серии Landsat. Предварительно была сделана выборка космических снимков с минимальной облачностью на разные сезоны и за разные годы. Для получения исходных геотермических сцен применялся программный комплекс ENVI.

Для конвертации данных с радиометра ТМ используется канал номер 6 (пространственное разрешение 120 м), а с радиометра ЕТМ+ — каналы 61 и 62 (пространственное разрешение 60 м).

Конвертация данных, полученных со спутников Landsat 4, 5 и 7, в значения температур земной поверхности осуществлялось в два этапа:

На первом этапе обработки сцен Landsat безразмерные значения DN (Digital Number, значения яркости исходного снимка) пересчитывались в значения излучения, приходящего на сенсор по формуле [11]:

$$L_{\lambda} = \frac{L_{\max\lambda} - L_{\min\lambda}}{Q_{\text{cal}\max} - Q_{\text{cal}\min}} (Q_{\text{cal}} - Q_{\text{cal}\min}) + L_{\min\lambda}, \quad (1)$$

где: L_{λ} — количество приходящего излучения ($\text{Вт}/\text{м}^2$);

L_{\min} — количество приходящего излучения, которое после масштабирования становится Q_{\min} ;

L_{\max} — количество приходящего излучения, которое после масштабирования становится Q_{\max} ;

$Q_{\text{cal}\min}$ — минимальное калиброванное значение DN (0 или 1);

$Q_{\text{cal}\max}$ — максимальное калиброванное значение DN (255);

Q_{cal} — калиброванное значение яркости пикселей на снимке (DN).

На втором этапе выполнялся пересчет количества приходящего излучения на сенсор в значения температуры.

Пересчет в Кельвины осуществляется по формуле:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}}\right) + 1}. \quad (2)$$

Пересчет в градусы Цельсия вычисляется по формуле:

$$T = \frac{K_2}{2.302585093 * \log_{10}\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}}\right) + 1} - 273.15, \quad (3)$$

где: T — температура в градусах Цельсия/Кельвинах;

K_1 — калибровочная константа 1;

K_2 — калибровочная константа 2;

L_{λ} — излучение на сенсоре, полученное на этапе 1.

Калибровочные константы 1 и 2 приведены в табл. 1 [11], [12].

Таблица 1

Калибровочные константы для тепловых каналов спутников Landsat

Радиометр/ Константа (Единицы измерения)	Константа 1 (watts/(m ² * ster * μm))	Константа 2 (Температура К)
TM 4	671.62	1284.30
TM 5	607.76	1260.56
ETM +	666.09	1282.71

Полученные геотермические сцены были раскрашены с помощью инструмента «ENVI Color Table» (Цветные шкалы ENVI). Выбор выразительной раскраски для каждой сцены позволил выявить более тонкие различия в тепловых свойствах поверхности.

Результаты и их обсуждение. Мелиорация гидроморфных почв приводит к существенным изменениям их температурного режима, который имеет не-

преднамеренный характер и связан с изменением подстилающей поверхности за счет осушения. Эти изменения хорошо прослеживаются на рассчитанных геотермических сценах (рис. 1).

Более светлые участки на рассчитанной геотермической сцене означают наименьшие значения температуры, а темные участки, соответственно, наибольшие значения.

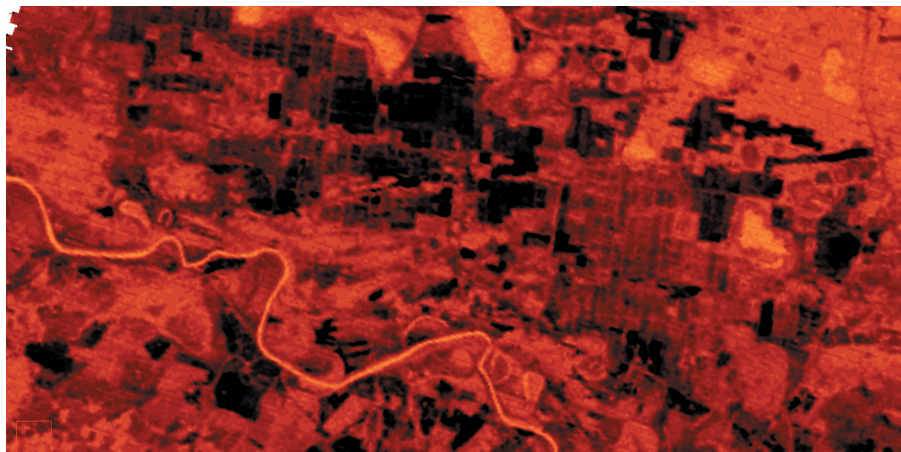


Рис. 1. Фрагмент геотермической сцены на 02.07.1984 (Landsat-5)

Сравнение распределения теплового поля по поверхности целинной и освоенной части болота показывает, что на освоенных участках продолжительность теплого периода короче, чем на целинных. Весной и в начале лета наиболее высокую температуру верхнего слоя имеют целинные участки болота. Во второй половине лета, осушенные торфяные почвы теплее, чем целинные. Основной причиной этого, возможно, является уменьшение при осушении в несколько раз запасов воды в почве по сравнению с целинными участками болота и вызванное этим изменение теплоемкости и теплопроводности.

Проведенными исследованиями установлено, что термический режим торфяных почв существенно отличается от минеральных почв. Они прогреваются медленнее, чем окружающие минеральные острова, и в летний период их поверхность остается более холодной. Осушаемые торфяники медленнее оттаивают, задерживая весной возможность пахоты и сева сельскохозяйственных культур.

Анализ мультивременных геотермических сцен показывает, что на исследуемой территории с 90-х гг. XX в. начал развиваться процесс вторичного заболачивания территории, о чем свидетельствует уравнивание температурного режима целинного болота и освоенной его части (рис. 2).

Выводы. Дистанционное геотермическое зондирование может быть успешно использовано при изучении болот Западной Сибири, его применение может существенно повысить информативность дистанционного изучения территории. Интерпретация результатов данного вида картографирования может быть особенно информативной в случае исследования труднодоступных болотных массивов.

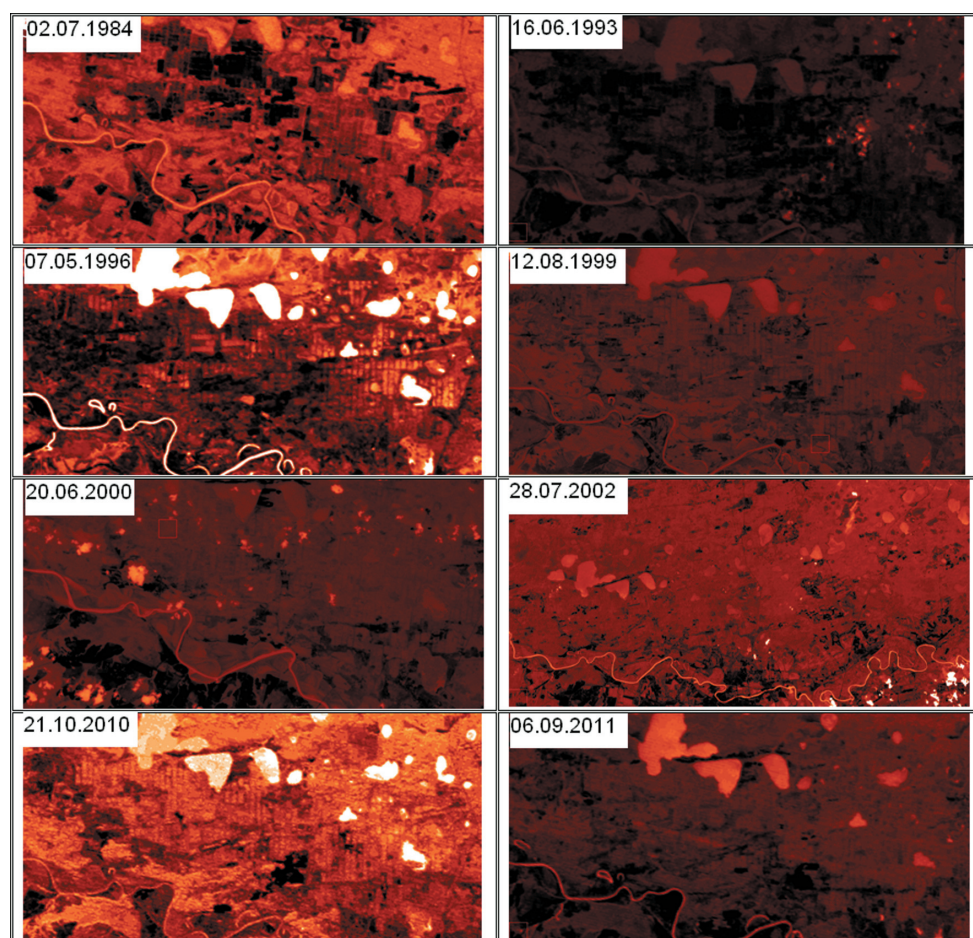


Рис. 2. Мультивременные геотермические сцены

Дистанционное определение температуры поверхности болота, рассчитываемое по данным одномоментной съемки по спутниковым данным, позволяет детально исследовать пространственную дифференциацию теплового поля и является достаточно информативной при решении широкого спектра задач.

Материалы дистанционного геотермического зондирования Земли могут эффективно применяться при анализе темпов развития процесса вторичного заболачивания на мелиорируемых землях, поскольку осушенные и неосушенные почвы имеют разный тепловой режим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новохатин В.В., Шепелева Н.А. Внутрипочвенный сток с осушаемых болотных систем Западной Сибири // Вестник Тюменского государственного университета. 2011. № 4. Серия «Науки о Земле». С. 6-16.
2. Москвиченко Д.В., Биохимические особенности верховых болот Западной Сибири // География и природные ресурсы. 2006. № 1. С. 63-70.

3. Новохатин В.В. Мелиорация болотных ландшафтов Западной Сибири. Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 2008. С. 87-97.
4. Калинин В.М., Чиков В.И. Количественная оценка воздействия мелиорации земель на режим и качество подземных вод // Вестник Тюменского государственного университета. 2002. № 3. С. 134-140.
5. Лупинович И.С., Афанасьев Н.И. Тепловые свойства заболоченных почв БССР // Доклады АН СССР. 1965. Т. IX. № 10. С. 683-685.
6. Прихотько В.Г. Особенности температурного режима осушаемых торфяников // Труды Института экспериментальной метеорологии. 1976. Вып. 6(57). С. 165-168.
7. Скрынникова И.Н. Некоторые проблемы мелиорации и сельскохозяйственного использования торфяных почв в СССР // Труды X Международного конгресса почвоведов. Т. 10. М., 1974. С. 242-249.
8. Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И. Тепловая аэрокосмическая съемка. М.: Недра, 1993. 128 с.
9. Дистанционное геотермическое картографирование. URL: <http://gis-lab.info/qa/thermal.html>.
10. Sekioka, M. and. Yuhara, K. Heat Flux Estimation in Geothermal Areas Based on the Heat Balance of Ground Surface // Journal of Geophysical Research, May 1974. V. 79. No 14. P. 2053-2058.
11. Landsat 7 Science Data Users Handbook. P. 117.
12. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. P. 2677.

REFERENCES

1. Novohatin, V.V., Shepeleva, N.A. Subsurface Flow Off Western Siberian Bogs. *Vestnik Tjumenskogo gosudarstvennogo universiteta — Tyumen State University Herald*. 2011. No. 4. P. 6-16 (in Russian).
2. Moskvichenko, D.V., Biochemical Properties Of Western Siberian Bogs. *Geografija i prirodnye resursy — Geography And Natural Resources*. 2006. No. 1. Pp. 63-70 (in Russian).
3. Novohatin, V.V. *Melioracija bolotnyh landshaftov Zapadnoj Sibiri* [Western Siberian Bog Landscape Amelioration]. Tyumen: TSU Publ., 2008. Pp. 87-97 (in Russian).
4. Kalinin, V.M., Chikov, V.I. Quality Estimate Of Land-Reclamation Effect On Subsurface Water Conditions. *Vestnik Tjumenskogo gosudarstvennogo universiteta — Tyumen State University Herald*. 2002. No. 3. P. 134-140 (in Russian).
5. Lupinovich, I.S., Afanas'ev, N.I. Thermal Characteristics Of Marshy Lands In Belarus. *Doklady AN SSSR — USSR Academy of Sciences Reports*. 1965. Vol. IX. No. 10. Pp. 683-685 (in Russian).
6. Prihot'ko, V.G. Temperature Conditions Of Dewatered Peatbogs. *Trudy Instituta jeksperimental'noj meteorologii — Proceedings Of The Experimental Meteorology Institute*. 1976. Issue 6 (57). Pp. 165-168 (in Russian).
7. Skrynnikova, I.N. Current Issues Of Peat Lands Reclamation And Agricultural Use In The USSR. *Trudy X Mezhdunarodnogo kongressa pochvovedov* (Proceedings Of The X International Soil Congress). Moscow, 1974. Vol. 10. Pp. 242-249 (in Russian).
8. Gornyj, V.I., Shilin, B.V., Jasinskij, G.I. *Teplovaja ajerokosmicheskaja s#emka* [Thermal GPS Survey]. Moscow: Nedra, 1993. 128 p. (in Russian).
9. *Distancionnoe geotermicheskoe kartografirovanie* (Remote geothermal mapping). Available at: <http://gis-lab.info/qa/thermal.html> (in Russian).
10. Sekioka, M. and. Yuhara, K. Heat Flux Estimation in Geothermal Areas Based on the Heat Balance of Ground Surface. *Journal of Geophysical Research — Journal of Geophysical Research*. May, 1974. V. 79. No. 14. P. 2053-2058.

11. Landsat 7 Science Data Users Handbook. P. 117.
12. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. P. 2677.