

5. Shovengerdt R.A. Distantionnoe zondirovanie. Metody i modeli obrabotki izobrazheniy [Remote sensing. Methods and image processing model]. – М.: Tehnosfera. 2013. – 592 p.
  6. The Agency of Statistics of the Republic of Kazakhstan. [web resource]. Access: <http://www.stat.gov.kz>.
  7. Geographical information systems and remote sensing. [web resource]. Access: <http://gis-lab.info>.
  8. The United States Geological Survey. [web resource]. Access: <https://www.usgs.gov>.
- 

УДК 551.345+528.88+911.2+528.94

А.А. Медведков<sup>1</sup>

## КАРТОГРАФИРОВАНИЕ КРИОГЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ТЕПЛОВЫХ СНИМКОВ

**Резюме.** В работе рассматривается дистанционный метод выявления и картографирования криогенных ландшафтов. Данные природные комплексы визуально выразительны не только на местности, они выделяются также и по термическим характеристикам на картах поверхностных температур, полученных путем обработки данных со спутников Landsat TM и Terra ASTER. Возможность использования для этой цели тепловых снимков опирается на работы М.И. Будыко о структуре теплового баланса земной поверхности и подтверждается данными полевых исследований.

**Ключевые слова:** криогенные (мерзлотные) ландшафты, ландшафтная индикация, мерзлотный экотон, ландшафтно-геокриологическое картографирование, тепловая инфракрасная съемка.

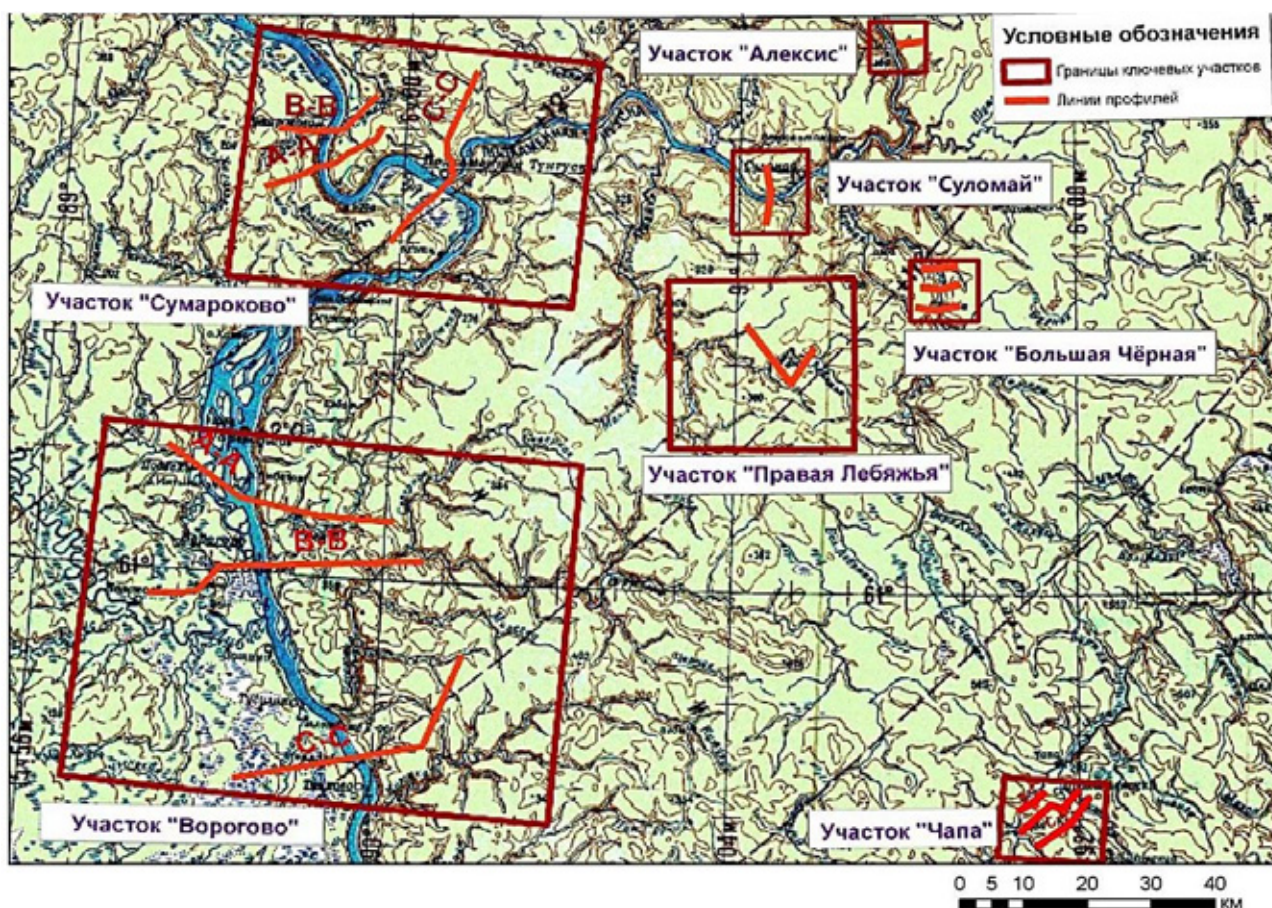
**Введение.** Изучение последствий изменения климата – одна из важнейших задач современной науки. Ландшафты наиболее чутко реагирующие на внешние температурные изменения располагаются на южной периферии криолитозоны, в подзонах островной и прерывистой «вечной» мерзлоты. Периферия криолитозоны или мерзлотный экотон – это территория с повышенной мозаичностью ландшафтов и спорадическим распространением высокотемпературных мерзлых грунтов. Здесь система «вечная» мерзлота – ландшафт претерпевает особенно быстрые изменения. Ландшафты, формирующиеся на близко залегающих к дневной поверхности многолетнемерзлых породах, именуется нами мерзлотными (криогенными). Данные природные комплексы наиболее уязвимы к любым внешним воздействиям, будь то антропогенное или климатическое влияние. Данная особенность мерзлотных геосистем требует её обязательно учета как при хозяйственном освоении территорий, так и открывает новые возможности для мониторинговых научных исследований в целях изучения отклика ландшафтов на быстрые изменения климата. В связи с этим, представляется важным выявление криогенных ландшафтов и их картографирование. Данное исследование проводилось нами в срединной части Енисейского меридиана (рис. 1).

**Методы и материалы.** В полевых условиях по заложенным трансектам производилась индикация криогенных ландшафтов и их дальнейшее изучение. Трансекты охватили наиболее типичные и интересные нас мерзлотные и немерзлотные урочища, относящиеся

---

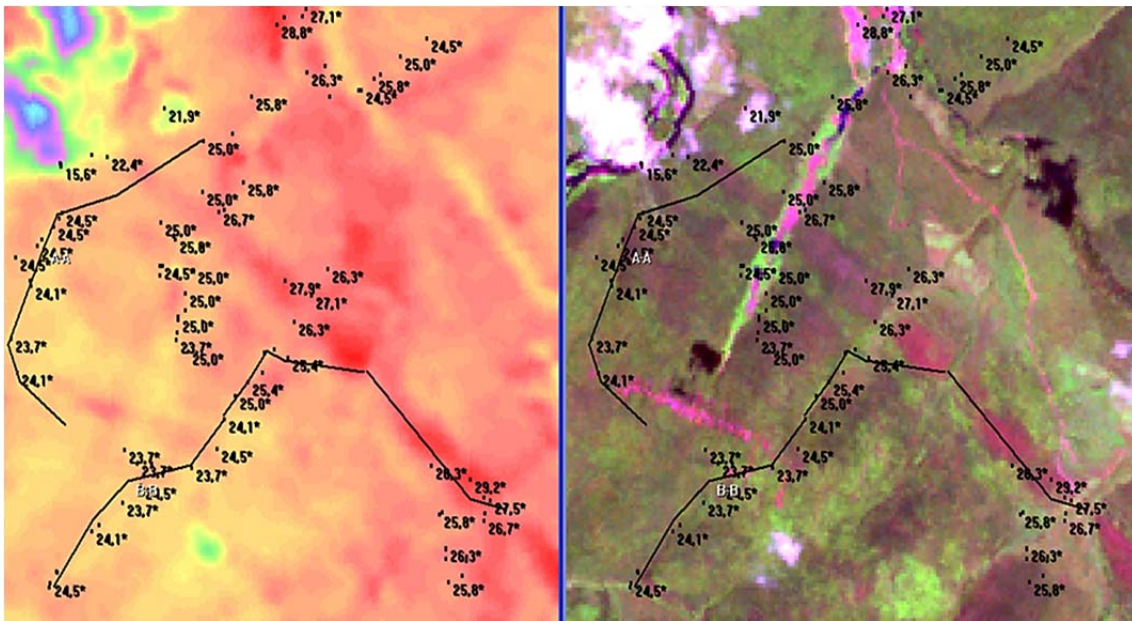
<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии мира и геоэкологии, Москва, 119991, Россия, старший научный сотрудник, канд. геогр. н.; e-mail: a-medvedkov@bk.ru.

к различным структурным уровням рельефа (рис. 1). Было выявлено, что главный фактор наличия многолетней мерзлоты на юге бореальной криолитозоны – состав поверхностных отложений (Горшков и др., 2003). Поэтому граница плейстоценовых ледниковых и озерно-ледниковых отложений, преимущественно пелитового состава, выступает здесь в качестве важного ландшафтно-геокриологического рубежа. К северу от данного рубежа, в ледниковой плейстоценовой зоне, широкое развитие получили дисперсные грунты и приуроченная к ним «вечная» мерзлота. Южнее, в перигляциальной зоне плейстоцена, дисперсные грунты получили значительно меньшее развитие, а вслед за ними сократилась и площадь мерзлотных ландшафтов.

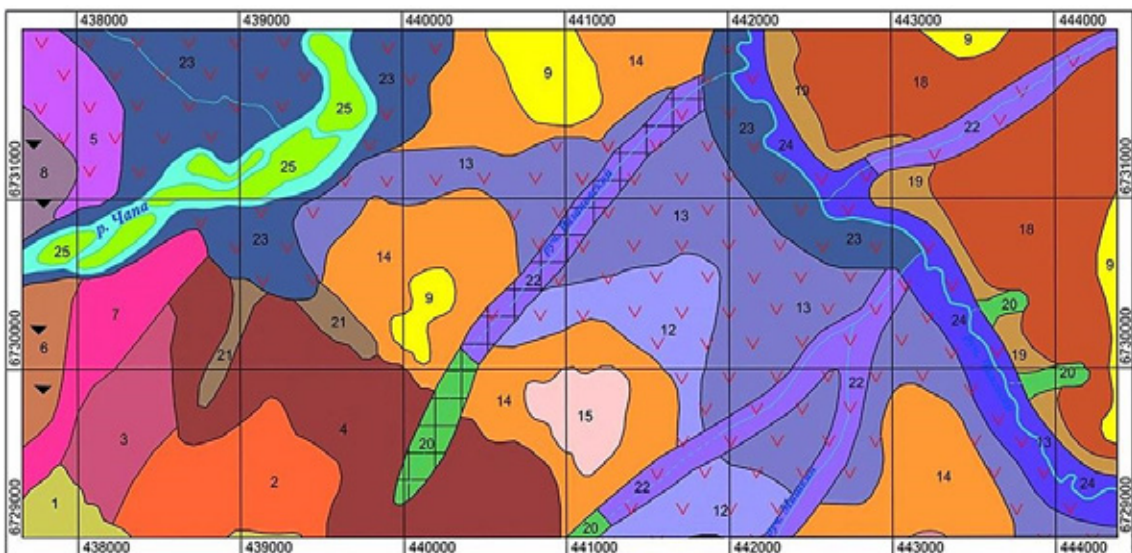


**Рис. 1.** Карта ключевых районов и участков исследований с указанием линий трансектов, по которым проводилась индикация криогенных ландшафтов в Среднеенисейской Сибири

Наряду с выделением мерзлотных ландшафтов по их характерным особенностям в полевых условиях, нами был использован и дистанционный метод их выявления, на основе анализа температурных карт, полученных путем обработки данных со спутников Landsat TM и Terra ASTER (рис. 2). Относительно высокое пространственное разрешение данных, полученных с космоснимков, определяет более детальный анализ термических характеристик ландшафтов. После тематической предобработки данных дистанционного зондирования были составлены карты распределения температуры поверхности. Картографирование температур поверхности осуществлено применительно к безоблачным условиям, все измерения июльские и относятся к первой декаде месяца. Полученные значения поверхностной температуры отражают меру потока явного тепла, выбрасываемого ландшафтом. Такие данные оказались весьма индикативными применительно и к мерзлотным, и к немерзлотным ландшафтам, что подтверждено нами при полевых исследованиях на севере Енисейского края (рис. 3) [Медведков, 2014].



**Рис. 2.** Карта распределения температур поверхности и синтезированное изображение снимка Landsat ТМ на ключевом участке «Чапа» (север Енисейского края). Ломанные линии – температурные профили, проведенные вдоль ландшафтно-индикационных трансектов



Исходный масштаб: 1:30000



**Рис. 3.** Фрагмент ландшафтно-индикационной карты ключевого участка «Чапа» (север Енисейского края)\*

\* *Внемасштабными знаками и штриховкой на карте (рис. 2) показаны: антропогенно-измененные днища ложков и поймы малых рек под молодым подростом из березы, осины, сосны, ели и др. с формирующимся напочвенным покровом на техногенных скелетных почвах ( ); урочища с явными признаками воздействия мерзлотных процессов: а) на растительный покров (разреженность древостоя, его наклонное положение, широкое распространение стелящейся пихты, багульника и карликовой березки, обилие осоки и хвощей, преобладание сфагновых мхов, из кустарничков – типична голубика); б) на дневную поверхность (кочковатость, наличие солифлюкционных наплывов, валиков и окон-разрывов, термокарстовых просядок и др.); в) на свойства почвы (оглеение, высокая влагонасыщенность, криотурбированные горизонты, значительная толщина торфа и др.) ( ); места распространения глыбово-щебнистых отложений с минимальным (5-10%) содержанием мелкозема ( ).*

**Результаты и их обсуждение.** Возможность использования поверхностных температур для индикации криогенных ландшафтов опирается на вывод М.И. Будыко [Будыко, 1974], что тепловой баланс земной поверхности  $R = LE + P$ , где  $LE$  – теплота испарения, т.е. поток скрытого тепла и  $P$  – турбулентный поток явного тепла от подстилающей поверхности. Эти показатели теплового баланса земной поверхности широко используются для оценок связи изменения потока явного тепла и приземной температуры в зависимости от типа и состояния растительного покрова и его структуры [Золотокрылин, 2003]. Конкретизируя этот вывод применительно к рассматриваемой проблеме отметим, что растительный покров криогенных ландшафтов визуально выразителен и соответственно имеет особую структуру (древостой характеризуется разреженностью и угнетенностью, типично наклонное положение деревьев; напочвенный покров характеризуется наличием мхов и кустарничков с преобладанием сфагновых мхов, часто встречаются редины и ерники, кочкарники и кочкарные болота, отмечается обилие осоки дернистой, типична голубика). Поэтому используемый метод оказался весьма информативным для выявления и картографирования криогенных ландшафтов и показал высокую степень корреляции полевых данных и полученных термических характеристик ландшафтов на основе анализа тепловых снимков.

Чем больше поток явного тепла, тем меньше его количество в скрытой форме, в виде транспирации и физического испарения с растительного полога. Это оказалось типичным для криогенных ландшафтов, отличающихся пониженными значениями фитомассы, слабой дренированностью и повышенными значениями поверхностных температур [Медведков, 2016]. Ландшафт с минимальным выбросом явного тепла имеет самый высокий потенциал влагообмена и более низкие значения поверхностной температуры (рис. 2). Такие природные комплексы с максимальной интенсивностью участвуют в водоэнергообмене и лидируют по воспроизводству фитомассы. Эту роль в сибирской тайге выполняют немерзлотные ландшафты, а лидерами среди них выступают елово-кедровые леса.

Синтезированный анализ температур поверхности (рис. 2) и данных полевых исследований позволяет на примере ключевого участка «Чапа» (рис. 3) подчеркнуть принципиальные различия между мерзлотными и немерзлотными ландшафтами, проявляющиеся в структуре их растительного покрова и фитопродукционных характеристиках:

1) Наибольшими запасами фитомассы (55–58 т/га) обладают немерзлотные ландшафты, расположенные на вершинных поверхностях и дренируемых склонах (контуры на карте №№ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8). Для данных немерзлотных урочищ типично: наличие прямостоящей древесной растительности, близкое залегание к поверхности скальных пород и малая мощность поверхностных отложений, относительно хорошая дренированность.

2) Наименьшие запасы фитомассы (38–43 т/га) характерны для мерзлотных комплексов: гласисо-пойм малых рек и слабодренируемых межвершинных поверхностей, с угнетенным и разреженным древостоем (контуры на карте №№ 12, 13, 14, 15, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25). Для данных мерзлотных урочищ типичны следующие характерные индикаторы: угнетенность растительного покрова, его видовая обедненность, низкий бонитет древостоя, заметные нарушения дневной поверхности с характерным микро- и мезорельефом, криотурбированный почвенный профиль, повышенная обводненность почв и поверхностных отложений, проявление криогенных процессов и явлений.

**Выводы.** Таким образом, обобщенный анализ температур поверхности и данных полевых исследований позволил нам также и по показателям поверхностной температуры отличить мерзлотные ландшафты от немерзлотных. Первые характеризуются наименьшими запасами фитомассы и более высокими значениями поверхностной температуры, а вторые выделяются по менее высоким термическим характеристикам, но отличаются наибольшими запасами фитомассы. Данный метод можно использовать в мониторинговых исследованиях, наблюдая за соотношением мерзлотных и немерзлотных ландшафтов, и изменением их термических характеристик. Также возможно его применение и для оценки устойчивости ландшафтов к антропогенной нагрузке, приобретающее всё большую актуальность для труднодоступных районов – территорий нового освоения.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (16-35-00327-мол\_a) и Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских учёных – кандидатов наук (МК – 7614.2015.5).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будыко М.И. Климат и жизнь. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 472 с.
2. Горшков С.П. Климат, мерзлота и ландшафты Среднеенейского региона / Ванденберг Дж., Алексеев Б.А. и др. – М., 2003. – 90 с.
3. Золотокрылин А.Н. Климатическое опустынивание. – М.: Наука, 2003. – 246 с.
4. Медведков А.А. Опыт ландшафтно-геоэкологического картографирования на севере Енисейского кряжа // Известия РАН. Серия географическая. 2014 № 1. С. 91–94.
5. Медведков А.А. Среднетаежные геосистемы Приенейской Сибири в условиях меняющегося климата. – М.: Макс-Пресс, 2016. – 144 с.

---

**A.A. Medvedkov<sup>1</sup>**

### MAPPING OF PERMAFROST LANDSCAPES BASED ON THE ANALYSIS OF THERMAL IMAGES

**Abstract.** This paper presents the method of remote detection and mapping of permafrost landscapes. These natural complexes visually are significant not only on the terrain, but easily distinguished by thermal characteristics on surface temperature maps, obtained by processing data from Landsat TM and Terra ASTER. The possibility of using thermal images data for such aim relies on the work of M.I. Budyko about the structure of earth's surface heat balance. This method is also confirmed by field studies.

**Key words:** permafrost landscapes, landscape indication, permafrost ecotone, landscape-geocryological mapping, thermal-infrared survey.

**Acknowledgement.** The study was supported by Russian Foundation for Basic Research (project 16-35-00327-mol\_a) and supported by the Council for Grants under President of Russia (project МК – 7614.2015.5).

## REFERENCES

1. Budyko M.I. Klimat i zhizn'. [The climate and life]. – L.: Gidrometeoizdat, 1974. – 472 p.
2. Gorshkov S.P. Klimat, merzlota i landshafty Sredneenisejskogo regiona [The climate, permafrost and terrain Sredneeniseyskogo region] / Vandenberg Dzh., Alekseev B.A. i dr. – M., 2003. – 90 p.
3. Zolotokrylin A.N. Klimaticheskoe opustynivanie [Climatic desertification]. – M.: Nauka, 2003. – 246 p.
4. Medvedkov A.A. Opyt landshaftno-geoekologicheskogo kartografirovaniya na severe Enisejskogo kryazha [Experience the landscape and geo-environmental mapping in the north of the Yenisei Ridge] // Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya. 2014 № 1. Pp. 91–94.
5. Medvedkov A.A. Srednetaezhnye geosistemy Prienisejskoj Sibiri v usloviyah menyayushchegosya klimata. [Srednetaezhnom Geosystems Prieniseyskoy Siberia in a changing climate]. – M.: Maks-Press, 2016. – 144 p.

---

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Russia, 119991, Moscow, GSP-1, 1 Leninskiye Gory, senior researcher, PhD in Geography; e-mail: a-medvedkov@bk.ru.