

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

УДК 528.852.8

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-1(93-104)

ИЗУЧЕНИЕ ТРАНСФОРМАЦИЙ ТУНДРОВОГО НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА
НА УЧАСТКАХ ПИРОГЕННОГО ПОРАЖЕНИЯ
ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ LANDSAT

С.Г. Корниенко

Институт проблем нефти и газа РАН, 119333, Москва, ул. Губкина, 3, Россия; spaceakm2@ogri.ru

На основе данных съемки со спутников Landsat за период 1987–2014 гг. рассмотрены тенденции изменения спектральных индексов и температуры поверхности тундрового напочвенного покрова на участках пирогенного поражения в районе Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения. Установлено, что на пораженных участках время восстановления теплового режима вторичного напочвенного покрова, определяемое по многолетним изменениям температуры его поверхности, существенно больше времени восстановления альbedo, коэффициента излучения и различных спектральных индексов, характеризующих состояние напочвенного покрова. Показано, что в районах с обширными пирогенными нарушениями оценка других типов трансформаций ландшафта может осуществляться только на основе комплексной интерпретации изменений различных параметров, рассчитываемых по космическим снимкам.

Альbedo, космические снимки, коэффициент излучения, пирогенное поражение, напочвенный покров, температура поверхности, тундра

TRANSFORMATION OF TUNDRA LAND COVER AT THE SITES OF PYROGENIC DISTURBANCE:
STUDIES BASED ON LANDSAT SATELLITE DATA

S.G. Kornienko

Oil and Gas Research Institute RAS, 3, Gubkina str., Moscow, 119333, Russia; spaceakm2@ogri.ru

Typical trends in spectral indices and surface temperature of tundra land cover at the sites of pyrogenic disturbance within the Urengoy oil and gas condensate field have been examined using Landsat imagery for the period from 1987 to 2014. The recovery time for thermal regime of the secondary land cover estimated on the long-term records of land surface temperature has been found to be much longer than that one for the recovery of surface albedo, emissivity, and different spectral indices characterizing the land cover state. It has been demonstrated that other types of landscape changes in the areas extensively disturbed by fire can be estimated only on the basis of integrated interpretation of the dynamics of land cover parameters calculated from spaceborne data.

Albedo, satellite images, emissivity, pyrogenic disturbance, land cover, land surface temperature, tundra

ВВЕДЕНИЕ

Активизация опасных геоэкологических процессов в основном связана с изменением условий теплообмена мерзлых грунтов с атмосферой, в том числе при нарушении естественного состояния тундрового напочвенного покрова (НП), к которому относятся мхи, лишайники, дерново-кустарничковый и травяной покров [Методы..., 2004]. Уничтожение НП в результате механического сноса или пирогенного поражения приводит к изменению температурного режима и глубины сезонного оттаивания грунтов [Скрябин, Варламов, 2013]. В районах южной тундры и лесотундры НП занимает 90–95 % площади (без учета водоемов). Здесь во время пожаров, связанных, как правило, с промышленной и хозяйственной деятельностью, уничтожается лишайник (ягель), пересыхающий в

теплые, солнечные дни. На Тазовском полуострове за 30 лет с начала освоения нефтегазовых месторождений в результате хозяйственной деятельности был уничтожен коренной НП минимум на 14 % его территории [Korniyenko, 2011]. Широкое распространение озер, рек, водотоков и относительно высокая влажность почв способствуют развитию на горях вторичной растительности: злаковых трав, кустарничков, мхов. В последние годы, в частности на территории Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ), отмечены факты повторного пирогенного поражения уже вторичного НП.

Оценка трансформаций ландшафта, в том числе в районах распространения многолетнемерзлых пород (ММП), может эффективно осу-

ществляться по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), в первую очередь по космическим снимкам оптического диапазона, обеспечивающим широкое покрытие, высокую детальность и достаточную периодичность наблюдений [Westermann et al., 2011; Loboda et al., 2013; Brooker et al., 2014; Beck et al., 2015; Muster et al., 2015]. Немаловажное значение имеют опыт и результаты исследований, позволяющие по космическим снимкам характеризовать тип трансформаций ландшафта и причины изменения условий теплообмена. В частности, определенные сложности возникают при выявлении участков изменения влажности грунтов на территориях с частичным нарушением НП. Достоверность типизации процесса может быть повышена путем построения многопараметрической модели трансформации ландшафта, в которой каждый параметр характеризует определенные свойства поверхности.

Попыткой реализации подобного подхода могут служить представленные в настоящей работе результаты обработки и анализа архивных снимков спутников Landsat, позволяющие по многолетним трендам изменения спектральных индексов и температуры поверхности характеризовать процесс восстановления тундрового НП на участках пирогенного поражения.

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

Радиационный баланс земной поверхности, на которой происходит преобразование потока солнечной энергии, рассчитывается по формуле [Методы..., 2004]

$$R = Q(1 - A) - (E_n - E_a),$$

где Q – суммарная солнечная радиация, включающая прямую и рассеянную составляющие; A – альбедо поверхности; E_n – длинноволновое излучение земной поверхности; E_a – встречное длинноволновое излучение атмосферы к поверхности. Излучение с поверхности определяется по закону Стефана–Больцмана:

$$E_n = \varepsilon \delta T_s^4,$$

где ε – коэффициент излучения поверхности; δ – постоянная Стефана–Больцмана ($\delta = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴)); T_s – температура поверхности, К.

Если принять, что на момент космической съемки поток солнечной радиации, пропускание атмосферы и метеоусловия идентичны в границах района исследований, т. е. когда значения Q и E_a не отличаются в любой его точке, то разница значений R для любых участков в границах района будет определяться различиями параметров A и ε , характеризующих свойства поверхности, и T_s , за-

висящей от теплового режима деятельного слоя, включая НП. При сгорании НП параметры A и ε скачкообразно понижаются, а T_s резко повышается за счет увеличения количества поглощенной радиации, снижения отдачи тепла с поверхности и снижения влажности НП. По мере развития на горях вторичного НП A и ε будут расти, а параметр T_s будет понижаться, что может служить отличительным признаком пирогенной сукцессии как одного из типов трансформации тундрового ландшафта. Изменения параметров A , ε и T_s могут быть рассчитаны на основе мультиспектральных данных ДЗЗ, в частности получаемых со спутников Landsat.

Корректная оценка многолетних изменений параметров A , ε , T_s на нарушенных участках может быть проведена при идентичных условиях инсоляции, пропускания атмосферы и метеоусловиях, что для разных дат съемки практически не реально. В этой связи наиболее приемлемы относительные оценки, когда сравниваются изменения разности абсолютных значений параметров нарушенных участков и смежных с ними участков ненарушенного состояния НП, поскольку предполагается, что и те, и другие находятся в идентичных условиях инсоляции, пропускания атмосферы и метеоусловиях. Кроме того, для снижения погрешностей, обусловленных различиями этих условий, предварительно может быть проведена коррекция космических снимков всего временного ряда, позволяющая привести их к виду, соответствующему одним и тем же условиям инсоляции, пропускания атмосферы и метеоусловиям.

В настоящей работе, кроме параметров A , ε и T_s , использовались нормализованные спектральные индексы $NDVI$, NBR и $NDWI$. Индекс $NDVI$ (Normalized Difference Vegetation Index) характеризует долю зеленой массы и хлорофилла в НП [Tucker, 1979]. Индекс NBR (Normalized Burn Ratio) позволяет оценить степень здорового состояния растительности [Loboda et al., 2013], а индекс $NDWI$ (Normalized Difference Water Index) используется для оценки изменения содержания влаги в НП [Gao, 1996]. Два последних индекса чувствительны к содержанию влаги и используются в основном при оценке пожароопасности растительного покрова.

Как отмечалось выше, в исследуемом районе на месте сгоревших коренных НП (преимущественно лишайников), как правило, развивается другая вторичная растительность (травы, кустарники, мхи). В этой связи под временем восстановления НП понимается период с момента пожара до завершающей стадии сукцессии (климакса) вторичного НП. Соответственно, время восстановления регистрируемых параметров, характеризующих сукцессию, определяется как период,

после которого не фиксируются их изменения, связанные с сукцессией. В основу предлагаемой методики анализа положен принцип, по которому оценка изменений и времени восстановления параметров на участках пирогенного поражения проводится относительно опорных участков, находящихся в ненарушенном, стабильном состоянии.

Расчет альбедо проводился по формуле [Li-ang, 2000]

$$A = 0.356\rho_1 + 0.13\rho_3 + 0.373\rho_4 + 0.085\rho_5 + 0.072\rho_7 - 0.0018,$$

где ρ_1, \dots, ρ_7 – коэффициенты спектральной яркости в спектральных каналах видимой, ближней и средней инфракрасной (ИК) области спектра радиометров TM и ETM+ спутников Landsat 5 и Landsat 7. Для расчета A по данным спутника Landsat 8 использовались идентичные по характеристикам 2, 4, 5, 6 и 7-й спектральные каналы радиометра OLI. В данном случае диапазон изменения A – от 0 до 1. По данным спутников Landsat 5 и Landsat 7 индексы $NDVI$, NBR и $NDWI$ рассчитывались по формулам

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3}, \quad NBR = \frac{\rho_4 - \rho_7}{\rho_4 + \rho_7}, \quad NDWI = \frac{\rho_4 - \rho_5}{\rho_4 + \rho_5}.$$

Эти же индексы по данным спутника Landsat 8 рассчитывались с использованием 4, 5 и 6-го спектральных каналов вместо 3, 4 и 5-го Landsat 5 и Landsat 7. Диапазон изменения индексов $NDVI$, NBR и $NDWI$ от -1 до 1 . Расчет коэффициента излучения ε проводился по формуле [Van de Griend, Owe, 1993]

$$\varepsilon = 1.0094 + 0.047 \ln(NDVI).$$

Диапазон изменения коэффициента излучения ε от 0 до 1. Расчет температуры поверхности T_s проводился по формуле [Weng et al., 2004]

$$T_s = \frac{T_r}{1 + (\lambda T_r / k) \ln \varepsilon},$$

где T_r – радиационная температура поверхности, вычисленная по данным 6-го (теплового) канала радиометров TM и ETM+ спутников Landsat 5, Landsat 7 и 10-го (теплового) канала радиометра TIRS спутника Landsat 8; λ – длина волны используемого спектрального (теплового) канала; k – постоянная величина, равная $1.438 \cdot 10^{-2}$ м·К. В итоговых построениях все значения T_s и изменения T_s даны в °С.

В работе использовались снимки со спутников Landsat 20.07.1987 г., 15.07.1988, 03.08.1989, 12.07.1990, 07.08.1999, 25.07.2009, 20.07.2013 и 15.08.2014 г. на район центральной части Уренгойского НГКМ. Пространственное разрешение снимков в видимой, ближней и средней ИК-области спектра – 30 м, в тепловых каналах (дальняя ИК-область) – 60, 100 и 120 м в зависимости от

номера спутника. Подбор снимков проводился с учетом полного отсутствия облачности в границах исследуемого района и максимальной близости дат съемки к середине лета.

Кроме того, при отборе снимков анализировались метеоданные за несколько дней до съемки и в момент съемки для установления возможных аномальных метеоусловий (ливневые дожди, сильный ветер), при которых информативность данных по тепловым каналам существенно снижается.

Предварительная обработка снимков включала полный набор радиометрических преобразований, калибровку спектральных каналов, геометрическую коррекцию и преобразование в картографическую проекцию UTM (WGS-84). Обработка и анализ данных космической съемки осуществлялись с использованием программного комплекса ENVI 4.8.

Как отмечено выше, при построении многолетних трендов изменения параметров по космическим снимкам неизбежны погрешности, связанные с различиями условий инсоляции, пропуска атмосферы и метеоусловий. Погрешности вносят также различия фенологических фаз растительности и различия в калибровках спектральных каналов. Из метеорологических параметров на распределение температуры земной поверхности наиболее существенное влияние оказывают различия температур воздуха на момент съемок. Для минимизации погрешностей, связанных с влиянием указанных факторов, используются разные методики коррекции временных рядов данных космической съемки [Zhu, Woodcock, 2014; Shen et al., 2016].

Совокупное влияние перечисленных факторов выражается в изменении контрастов (мультипликативная составляющая) и средних (аддитивная составляющая) значений каждого анализируемого параметра. Для компенсации (коррекции) этих различий используется метод, основанный на расчете линейного уравнения регрессии значений параметров по двум разновременным распределениям (изображениям) – основному и корректируемому [Shen et al., 2016]. В данном случае основными были изображения 1987 г., а корректируемыми – все остальные. Расчет коэффициентов уравнения осуществлялся по средним значениям (СЗ) параметров для групп опорных ненарушенных участков, к которым были отнесены легко дешифрируемые песчаные отмели, листовенничные массивы в поймах рек, участки коренного кустарничково-лишайникового покрова и листовенничного редколесья с подстилающим лишайниковым покровом. В каждую группу включались участки, имеющие наиболее близкое сходство спектральных характеристик.

Процедуры комплексной коррекции изображений, характеризующих T_s , принципиально ничем не отличаются от коррекции других параметров, поскольку любые колебания температуры воздуха (периодические, спорадические) также приводят к изменению контрастов и СЗ температуры поверхности, что связано с неоднородностью теплофизических свойств НП [Westermann et al., 2011]. Учитывая то, что коррекция приводит к выравниванию средних (фоновых) значений параметров по ненарушенным участкам, предлагаемый подход приемлем только для характеристики изменений ландшафта локальных районов при устранении общих, глобальных или региональных трендов.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследуемый район площадью около 280 км² расположен в субарктической лесотундровой зоне на широте Северного полярного круга. Для анализа в границах района были выбраны участки ненарушенного состояния с коренным НП и смежные с ними участки пирогенного поражения разных лет (рис. 1). Исследуемые участки примыкают к пойме р. Нгарка-Табьяха. Все участки (кроме участка № 5) относятся к одному морфогенетическому типу ландшафтов, а именно, к плоским озерно-ледниковым равнинам, относительно дренированным, с абсолютными отметками 60–70 м. Здесь растительность и НП представлены березово-листвен-

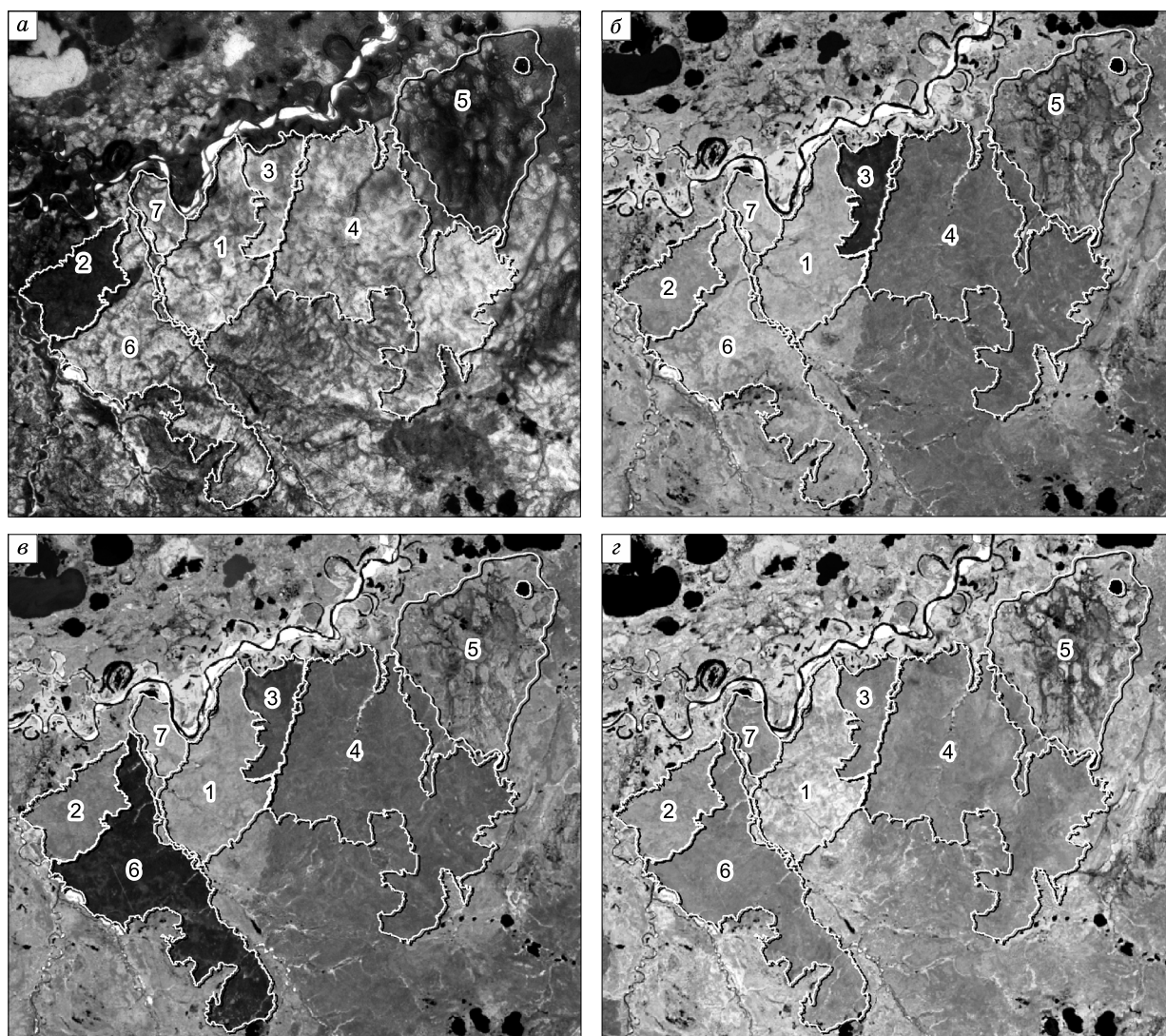


Рис. 1. Изображение исследуемых участков (1–7) в районе Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения по космическим снимкам КФА-1000 (а), Landsat 5 (б, в), Landsat 8 (з).

а – сентябрь 1979 г.; б – 20.07.1987; в – 03.08.1989; з – 15.08.2014.

ничным редколесьем, кустарничковым и мохово-лишайниковым покровом. Почвы тундрово-глеевые, местами дерново-подзолистые, глееземы дифференцированные, преобладают пески, супеси, суглинки. Участок № 5 относится к плоским озерно-ледниковым равнинам, пологоволнистым, заозерным, с абсолютными отметками 45–55 м. Здесь распространены болота верховые, плоскобугристые, ерниково-багульниково-сфагновые. Из растительности распространены кустарники, мхи,

встречаются березово-лиственничные редколесья. Почвы тундровые глеевые, иловато-гумусовые, преобладают суглинки, алевроиты, торф.

На рис. 1, *a* приведен панхроматический космический снимок камеры КФА-1000 (сентябрь 1979 г.), характеризующий состояние НП района до пожаров. Участок № 1, площадью 10.1 км², относится к зоне ненарушенного состояния, здесь в коренном НП преобладают лишайник и кустарники (рис. 2, *a*). Участок № 2, площадью 6.4 км², так

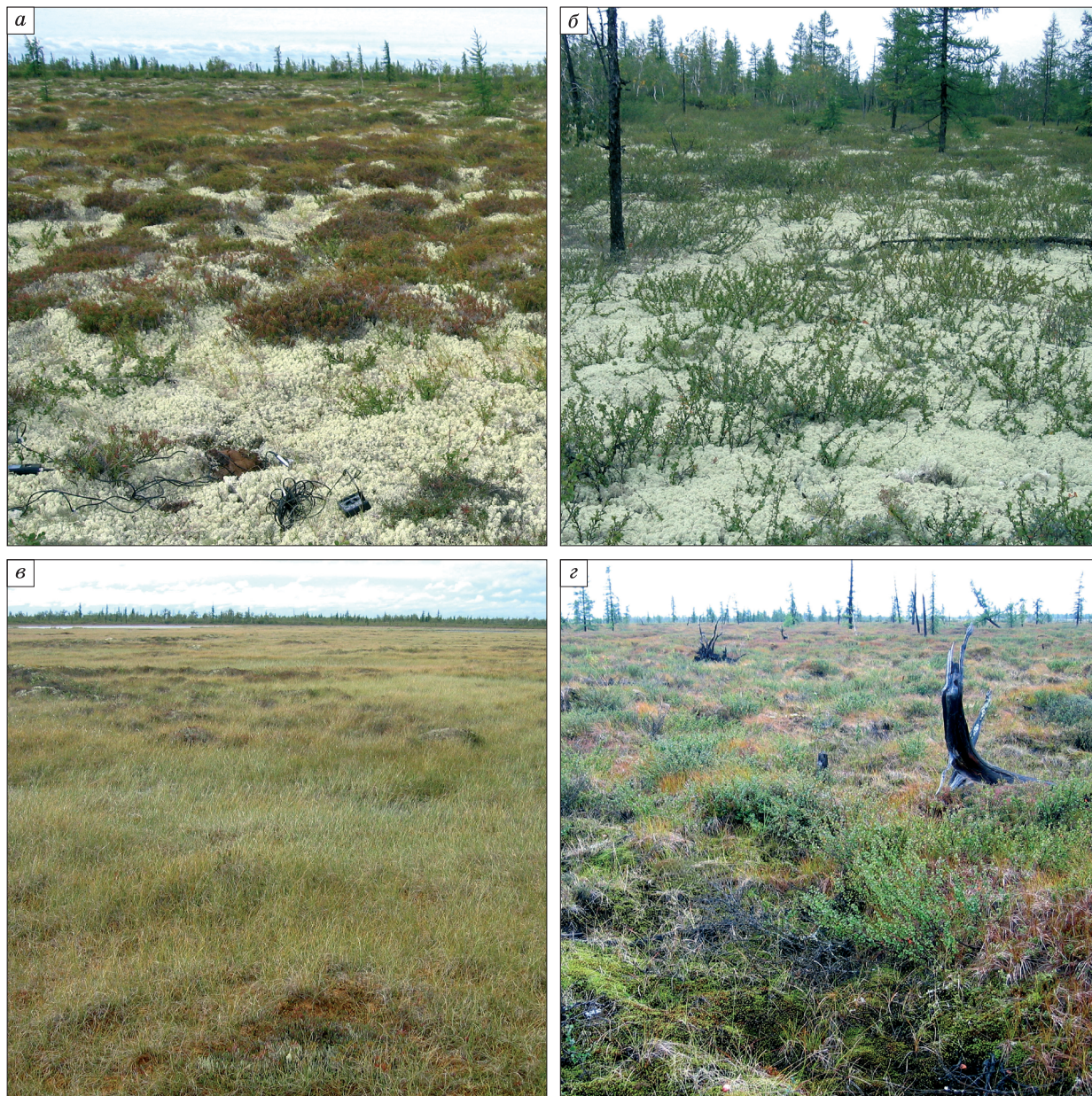


Рис. 2. Коренная растительность и напочвенный покров на участках № 1 (*a*) и № 2 (*б*), сформировавшийся вторичный напочвенный покров на участке, аналогичном участку № 1, через 22 года после пожара (*в*), развивающийся напочвенный покров на участке, аналогичном участку № 2, через 10 лет после пожара (*г*).

же отнесен к ненарушенным территориям и характеризуется листовичным редколесьем с подстилающим лишайниковым покровом (см. рис. 2, б). В подлеске отмечаются карликовая березка, багульник, голубика, брусника. К ненарушенным также отнесен участок № 5 болотистой местности, площадью 22.2 км², с отчетливо выраженной густой сетью протоков (см. рис. 1). Участки № 1, 2 составляют референтную группу, относительно которой анализировались изменения спектральных индексов и температура поверхности на участках пирогенного поражения № 3, 4, 6 и 7. Из анализа серии снимков 1987 г. следует, что участок № 3, площадью 7.5 км², сгорел к 20 июля 1987 г. (см. рис. 1, б). Участок № 4, площадью 25.3 км², отнесен к зоне обширного пирогенного поражения, прошедшего приблизительно в 1983 г., а участок № 6, площадью 16.3 км², сгорел в 1989 г. (см. рис. 1, в). На участке № 7, площадью 4.4 км², пожар прошел на отрезке времени с 1994 по 1997 г.

Судя по снимку 1979 г. (см. рис. 1, а), на всех сгоревших участках НП был тот же, что и на участке № 1. На рис. 2, в приведена фотография участка со сформировавшимся вторичным мохово-травяно-кустарничковым покровом, на котором до пожара, произошедшего 22 годами ранее, коренной НП был аналогичен тому, что отображен на рис. 2, а. Фотография на рис. 2, г иллюстрирует фазу сукцессии через 10 лет после пожара на участке с таким же НП, как и на смежном с ним участке, отображенном на рис. 2, б.

АНАЛИЗ МЕЖГОДОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ НА УЧАСТКАХ ПИРОГЕННОГО ПОРАЖЕНИЯ НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА

На рис. 3 для всех участков (кроме участка № 7) приведены кривые межгодовых изменений СЗ анализируемых параметров, построенные после их комплексной коррекции. После пожаров СЗ всех параметров резко снижаются, за исключением T_s , которое, наоборот, возрастает на 8–10 °С. Анализ межгодовых вариаций СЗ и среднеквадратических отклонений (СКО) параметров показывает, что минимальный разброс значений по годам отмечается на участках референтной группы (№ 1 и 2). На ненарушенном участке № 5 разброс более существенный и не отражает каких-либо трендов, что, скорее всего, связано с изменчивостью гидрологических условий болотной местности. Все кривые, относящиеся к сгоревшим участкам, к концу срока наблюдений отчетливо отражают тенденцию приближения к значениям параметров референтной группы. Несмотря на то что на участке № 4 пожар прошел раньше, процесс восстановления СЗ параметров на нем более медленный, чем на участках № 3 и 6.

Анализ рис. 3 показывает, что для одних и тех же участков разные параметры различаются по скорости восстановления. В частности, альбедо и коэффициент излучения восстанавливаются значительно раньше, чем остальные параметры. Как отмечалось выше, для характеристики трансформаций НП наиболее приемлемы относительные методы оценки, в частности, когда сравниваются изменения разности СЗ параметров для нарушенных участков и смежных с ними участков ненарушенного состояния НП. В данном случае для оценки темпов и времени восстановления состояния нарушенного НП изменения СЗ параметров анализировались относительно участка № 2, характеризующегося минимальными СКО и минимальными межгодовыми вариациями СЗ параметров. С этой целью вычислялась разность СЗ параметров по годам между участком № 2 и участками № 3 и 6, для которых известны даты пожара. На следующем этапе определялись уравнения аппроксимации разности СЗ параметров, характеризующие многолетние тенденции их изменения (рис. 4). Дополнительно проводился анализ межгодовой динамики СКО параметров, который показал, что непосредственно после пожара СКО всех параметров резко увеличивается и затем постепенно уменьшается, причем по всем параметрам приблизительно одинаково (рис. 5). Аналогично тому, как были получены уравнения, характеризующие динамику разности СЗ параметров по годам, вычислялись уравнения, определяющие изменение разности СКО параметров участка № 2 и пораженных участков.

Для количественной оценки различий в скорости восстановления параметров был использован критерий, характеризующий время снижения разности СЗ и разности СКО параметров до 90 % величины их динамического диапазона. Динамический диапазон определялся путем вычитания минимальных значений разности из максимальных значений. Для расчета времени снижения разности СЗ и СКО параметров использовались уравнения аппроксимации, полученные на основе фактических данных. В табл. 1 приведены значения расчетного времени снижения разности СЗ и разности СКО параметров между участками № 2 и 3, а также между участками № 2 и 6.

Альтернативным критерием для определения различий во времени восстановления спектральных характеристик НП на сгоревших участках может быть сравнение долей их площади с изменением и без изменения значений параметров за отдельные периоды наблюдений. На рис. 6 приведены карты относительных изменений параметров за последние 5 лет наблюдений, представляющие собой разность распределений значений параметров в 2014 и 2009 гг. На картах все изменения параметров даны относительно значений на участке

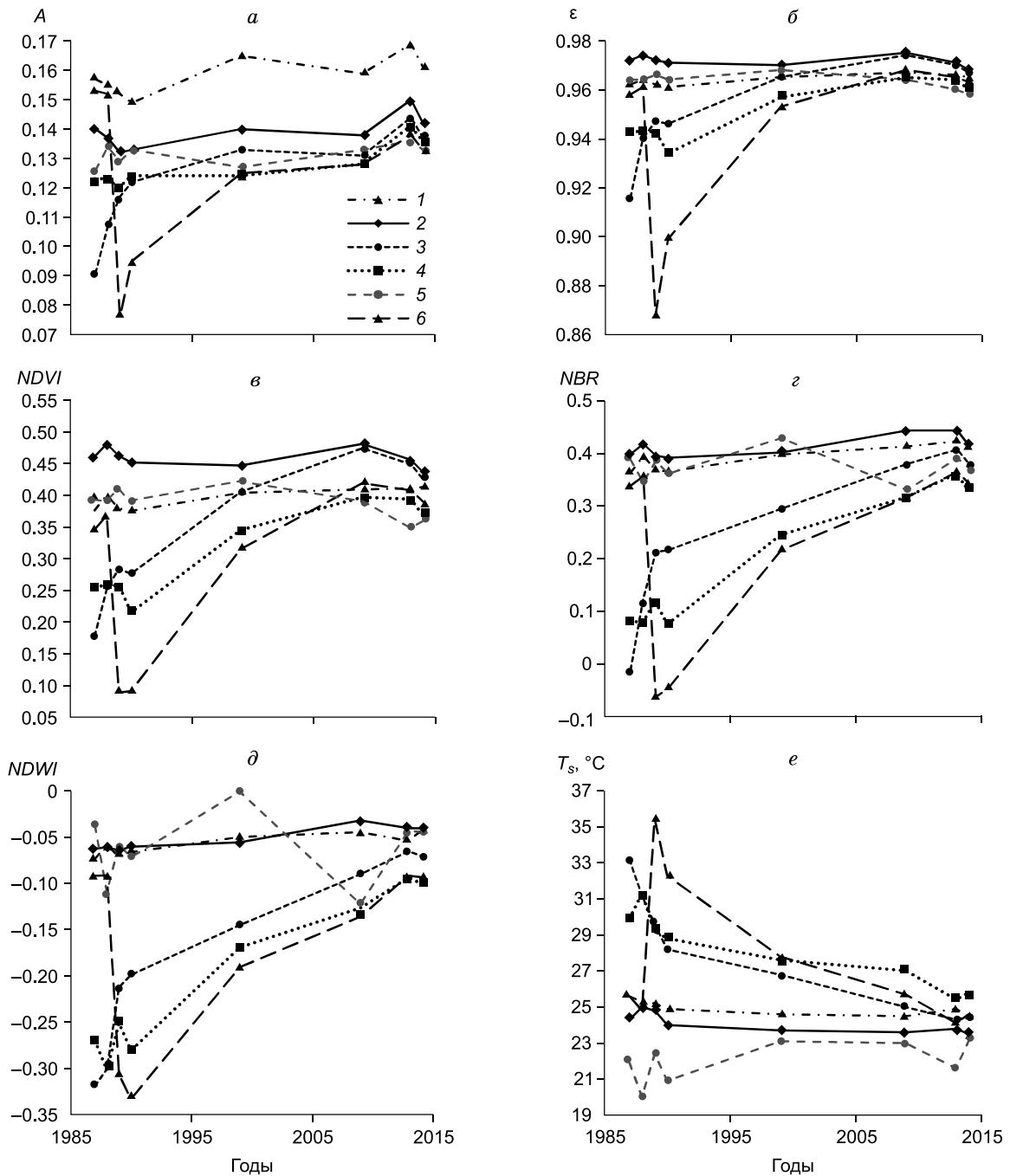


Рис. 3. Изменение средних значений параметров на участках (1–6) за период 1987–2014 гг.:

a – альbedo *A*; *б* – коэффициент излучения ε ; *в* – индекс *NDVI*; *г* – индекс *NBR*; *д* – индекс *NDWI*; *е* – температура поверхности T_s .

№ 2 ненарушенного состояния НП. Среднее значение разности параметров на участке № 2 принималось за нулевое значение отклонений, относительно которого оценивались отклонения параметров по участкам пирогенного поражения и по всему району в целом. Области фоновых значений (без изменений, желтые тона на рис. 6) опреде-

лялись по межгодовой разности параметров на участке № 2 в границах 99%-го доверительного интервала распределений. Приведенные на шкалах значения динамического диапазона соответствуют единицам измерения параметров.

Зелеными тонами отображены участки увеличения значений параметров (для T_s – уменьшения

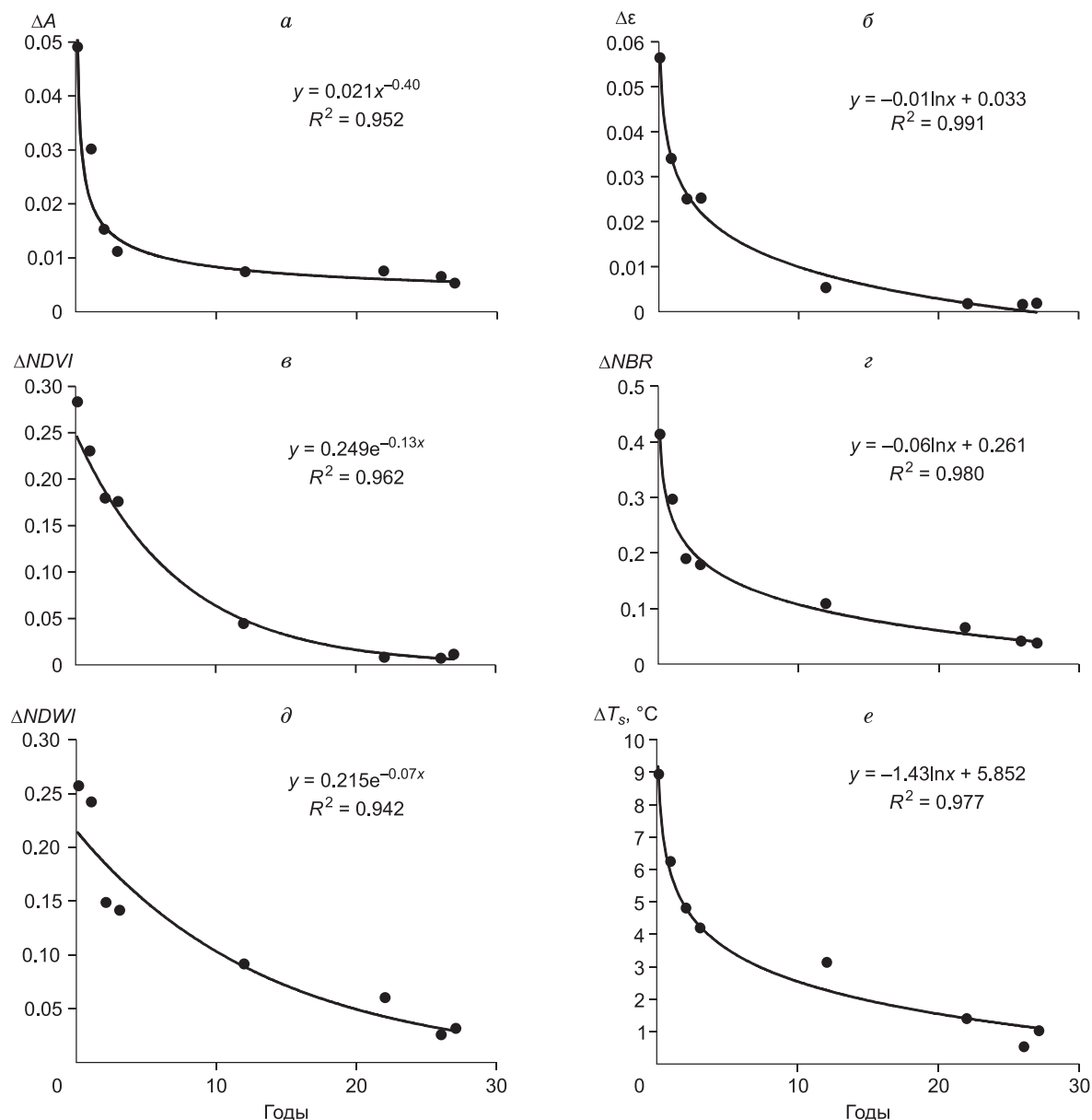


Рис. 4. Изменение разности средних значений параметров участков № 2 и 3:

a – альbedo *A*; *б* – коэффициент излучения ϵ ; *в* – индекс *NDVI*; *г* – индекс *NBR*; *д* – индекс *NDWI*; *е* – температура поверхности T_s .

значений), что характеризует продолжающиеся сукцессии. Красные тона обозначают снижение значений параметров (для T_s – увеличение). На сгоревших ранее участках красные тона уже не связаны с продолжающимися сукцессиями, а вызваны иными причинами, поскольку здесь не отмечены признаки повторного пожара. Таким образом, к площадям без признаков продолжающейся сукцессии (табл. 2) были отнесены участки, обозначенные на рис. 6 желтым и красными тонами. Все значения разности параметров также

определены в границах 99%-го доверительного интервала распределений.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из табл. 1 видно, насколько существенны различия во времени восстановления СЗ параметров. Быстрее всех восстанавливаются СЗ альbedo поверхности, что, по-видимому, связано с высокими значениями этого параметра для обнаженных субстратов, представленных здесь преимущественно песками и супесями. Существенно медленнее

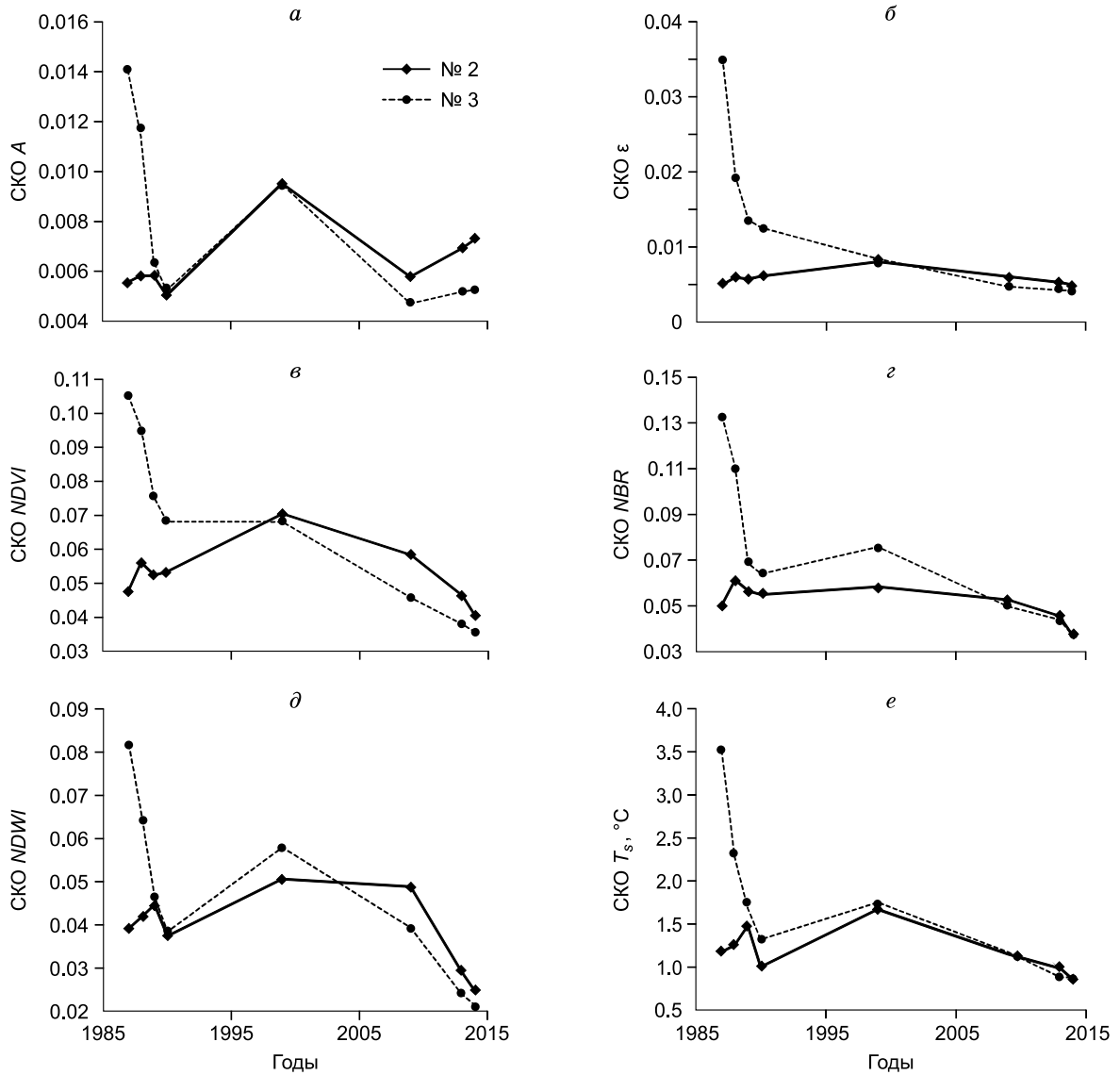


Рис. 5. Изменение среднеквадратических отклонений параметров на участках № 2 и 3 за период 1987–2014 гг.:

a – альbedo *A*; *б* – коэффициент излучения ε ; *в* – индекс *NDVI*; *з* – индекс *NBR*; *д* – индекс *NDWI*; *е* – температура поверхности T_s .

Таблица 1. Расчетное время снижения разности средних значений (СЗ) и разности среднеквадратических отклонений (СКО) параметров на 90 % динамического диапазона (лет)

Параметр	Между участками № 2 и 3		Между участками № 2 и 6	
	СЗ	СКО	СЗ	СКО
<i>A</i>	5.8	12.6	14.7	17.0
ε	13.8	10.6	15.7	13.4
<i>NDVI</i>	14.3	18.3	17.7	17.8
<i>NBR</i>	16.4	11.0	19.3	18.8
<i>NDWI</i>	19.8	8.0	20.3	16.9
T_s	22.4	9.2	24.3	15.7

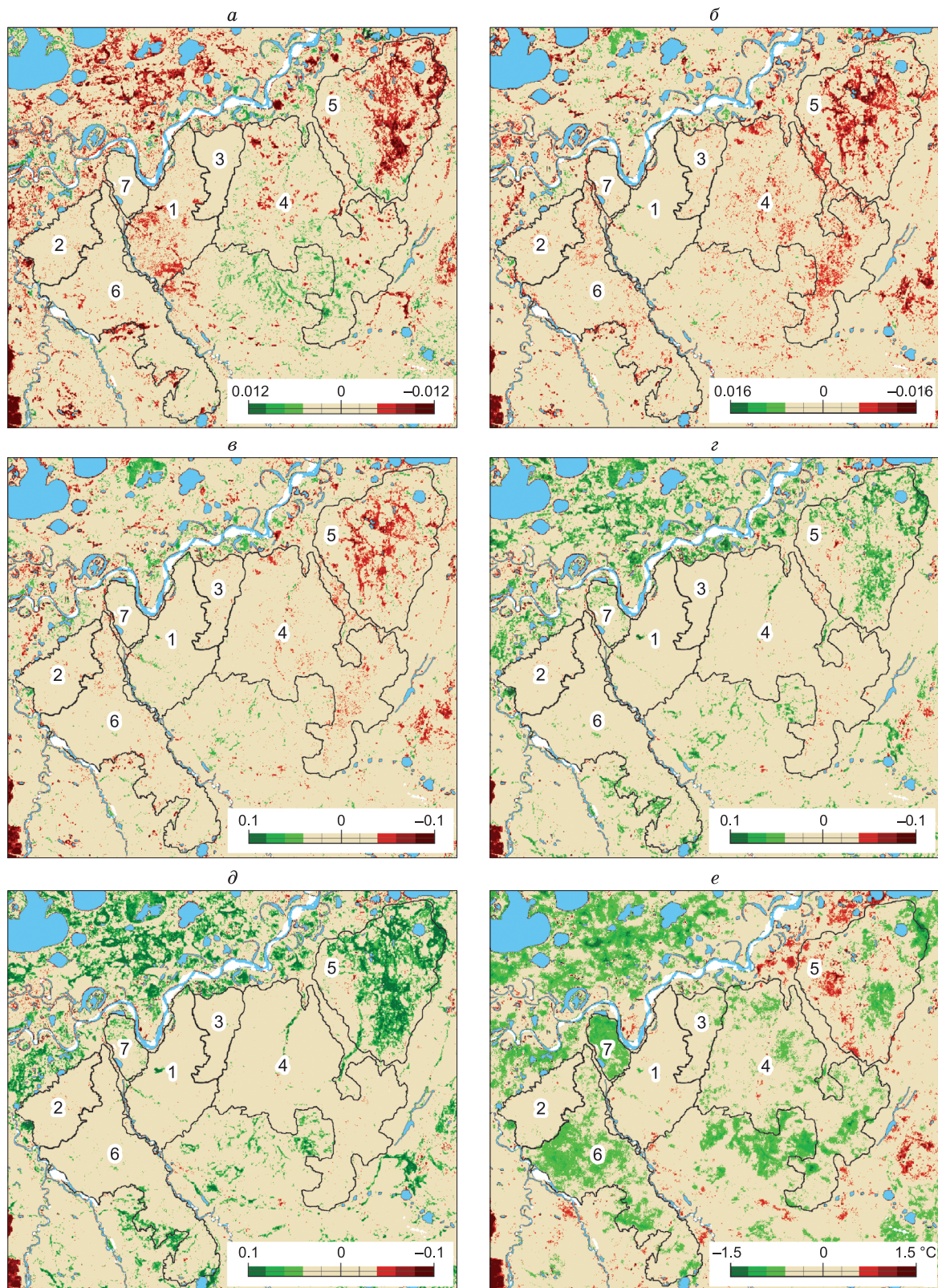


Рис. 6. Карты, характеризующие относительные изменения параметров по району исследований за период 2009–2014 гг.:

a – альbedo A ; *б* – коэффициент излучения; *в* – индекс $NDVI$; *г* – индекс NBR ; *д* – индекс $NDWI$; *е* – температура поверхности T_s .

Таблица 2.

Доля площадей (%) на участках пирогенного поражения без признаков продолжающейся сукцессии за период 2009–2014 гг.

Номер участка	Параметр					
	<i>A</i>	ε	<i>NDVI</i>	<i>NBR</i>	<i>NDWI</i>	T_s
3	99.65	100	99.97	99.75	99.60	92.50
4	94.86	99.99	99.77	99.21	99.15	83.40
6	99.27	99.84	99.53	96.64	95.15	63.08
7	98.97	99.83	98.87	88.01	87.43	21.89

остальных восстанавливаются СЗ температуры поверхности. Различия расчетного времени восстановления СЗ параметров на участках № 3 и 6, вероятно, связаны с двухгодичной разницей во времени от момента пожаров и с разной частотой измерений в начальный период после пожара. Несмотря на это, сохраняется общая тенденция увеличения времени восстановления СЗ параметров на обоих участках: от минимального для *A* и до максимального для T_s . Сроки восстановления СКО T_s соизмеримы со сроками по другим параметрам, что, скорее всего, означает близкое по темпам снижение неоднородности спектральных и теплофизических свойств НП по мере его восстановления.

Карты на рис. 6 и данные в табл. 2, характеризующие динамику параметров за последние 5 лет периода наблюдений, в целом хорошо согласуются с результатами оценок по первому критерию (см. табл. 1). На участке № 3 через 22 года после пожара значения всех параметров, за исключением T_s , не изменились более чем на 99 % площади, что может свидетельствовать о восстановлении состояния вторичного НП, в то время как для параметра T_s изменений нет на 92.5 % площади (см. табл. 2). На участке № 6 ситуация приблизительно та же, с учетом того, что пожар здесь прошел 20 лет назад и T_s восстановилась только на 63 % площади участка. Если считать, что на участке № 7 пожар прошел не позже 1994 г., то получается, что параметры *A*, ε и *NDVI* уже через 15 лет восстановились здесь на 99 % площади, в то время как T_s восстановилась менее чем на 22 % площади участка. На участке № 4 динамика параметров несколько отличается от остальных. Здесь через 26 лет после пожара параметр *A* восстановился приблизительно на 95 %, а T_s – на 83.4 % площади участка. Чувствительные к содержанию влаги в НП параметры *NBR* и (в большей степени) *NDWI* восстанавливаются позже, чем *A*, ε и *NDVI*, но раньше, чем T_s .

Полевые исследования 2005 и 2006 гг. на аналогичных участках старых гарей и вторичных сукцессий в границах исследуемой территории в сопоставлении с датами прошедших пожаров (по архивным космическим снимкам) свидетельствуют о том, что новый НП полностью формируется приблизительно через 20 лет после пожара (см. рис. 2). Данные табл. 1, 2 в целом подтверждают

эти сроки, за исключением значений T_s , которые, согласно расчетам, восстанавливаются не менее чем через 25–30 лет. Этим же срокам будет соответствовать время восстановления радиационного баланса, т. е. время, после которого вариации радиационного баланса не будут связаны с сукцессией. Разность T_s между референтными участками ненарушенного НП № 1 и 2 практически не изменилась, как за предыдущие 24 года (см. рис. 3), так и за последние 5 лет периода наблюдений (см. рис. 6).

Продолжающееся снижение температуры на поверхности вторичного НП даже после его полного формирования предположительно связано с аккумуляцией тепла в грунте и повышением среднегодовой температуры грунтов после пожара. Известно, что удаление мохово-лишайниковых покровов может быть причиной повышения среднегодовой температуры ММП [Методы..., 2004]. В работе [Комплексный мониторинг..., 2012] показано, что температура в грунте на глубине 20 см на нарушенном бугре пучения (без НП) в течение года всегда выше, чем на аналогичном бугре с НП. Покров мха-сфагнума понижает среднегодовую температуру ММП на 0.5–1.5 °С в тундре и до 2–3 °С в лесотундре и северной тайге, а мхи и лишайники понижают среднегодовую температуру ММП в лесотундре на 0.5–1.0 °С [Геокриология..., 1989]. В работе [Скрябин, Варламов, 2013] показано, что на гарях с вырубкой температура на глубине 10 м даже через 20–25 лет остается на 1.0–1.5 °С выше начальной температуры грунтов. С понижением температуры в грунте и соответственно на поверхности вторичного НП могут быть также связаны повышение влажности НП и усиление транспирации, к которой параметр T_s более чувствителен по сравнению с другими параметрами. Предположение о повышении влажности НП отчасти подтверждается относительно длительным временем восстановления СЗ индекса *NDWI* (см. табл. 1). В то же время на участке № 6 при существенном понижении T_s изменения *NDWI* не столь значительны (см. рис. 6, табл. 2).

Достаточно заметная разница во времени восстановления одних и тех же параметров на участках № 3, 4, 6 и 7 свидетельствует о возможных различиях в скорости сукцессий даже в пределах одной геоморфологической зоны, что отмечалось ранее в [Комплексный мониторинг..., 2012].

Выявленные закономерности изменения параметров на участках пожаров позволяют более достоверно характеризовать процессы на других участках, не претерпевших нарушений НП. В частности, на болотистом участке № 5 повышение значений индексов *NBR* и *NDWI*, скорее всего, связано с ростом влажности (см. рис. 6). Также с увеличением количества воды на этом участке (в НП, в обнаженном субстрате или мелких водоемах) могут быть связаны понижение значений *A*, *NDVI*, ε (как производного от *NDVI*) и уменьшение T_s на большей части участка. В то же время понижение *A* на участке № 1 (см. рис. 6) не может быть связано с повышением влажности, поскольку по другим параметрам изменений здесь практически не фиксируется. Понижение *A* на участках севернее р. Нгарка-Табьяха (верхняя левая часть снимка) может быть связано с повышением влажности, поскольку значения *NBR* и *NDWI* здесь увеличились, а T_s понизилась. Приведенные примеры показывают, что в районах с обширными нарушениями НП только комплексная интерпретация изменений параметров позволяет отличать пирогенные сукцессии от увлажнения и более достоверно характеризовать происходящие трансформации ландшафта.

В целом полученные результаты свидетельствуют о достаточно высокой информативности временного ряда снимков спутников Landsat для характеристики состояния НП на участках пирогенного поражения, а также для характеристики ландшафтных изменений условий теплообмена мерзлых грунтов с атмосферой.

ВЫВОДЫ

Анализ межгодовых вариаций параметров, характеризующих изменение тундрового напочвенного покрова на участках пирогенного поражения по данным спутников Landsat, позволяет сделать следующие выводы.

На участках пирогенных сукцессий время восстановления температуры и радиационного баланса на поверхности вторичного НП составляет 25–30 лет, что существенно превышает время восстановления альбедо, коэффициента излучения и различных спектральных индексов, характеризующих его состояние.

В пределах однотипных геоморфологических зон с идентичным сгоревшим коренным НП время восстановления спектральных индексов поверхности вторичного НП может существенно различаться.

В районах с обширными пирогенными поражениями НП и вторичными сукцессиями характеристика трансформаций ландшафта, в том числе связанных с изменением влажности, может осуществляться только на основе комплексной интерпретации изменений параметров, рассчитанных по космическим снимкам.

Литература

- Геокриология СССР.** Западная Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1989, 456 с.
- Комплексный мониторинг северотаежных геосистем Западной Сибири** / Отв. ред. В.П. Мельников. Новосибирск, Академ. изд-во "Гео", 2012, 207 с.
- Методы геокриологических исследований:** Учеб. пособие / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 2004, 512 с.
- Скрябин П.Н., Варламов С.П.** Термический режим грунтов нарушенных ландшафтов Центральной Якутии // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 3, с. 44–49.
- Beck I., Ludwig R., Bernier M. et al.** Assessing permafrost degradation and land cover changes (1986–2009) using remote sensing data over Umiujaq, Sub-Arctic Québec // Permafrost and Periglacial Processes, 2015, vol. 26, p. 129–141.
- Brooker A., Fraser R.H., Olthof I. et al.** Mapping the activity and evolution of retrogressive thaw slumps by tasselled cap trend analysis of a Landsat Satellite Image Stack // Permafrost and Periglacial Processes, 2014, vol. 25, p. 243–256.
- Gao B.** NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sens. Environ., 1996, vol. 58, p. 257–266.
- Korniyenko S.G.** Assessing the transformations of natural landscapes of the Taz Peninsula using space-borne imagery // Geography and Natural Res., 2011, No. 1, p. 67–73.
- Liang S.** Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I – Algorithms // Remote Sens. Environ., 2000, vol. 76, p. 213–238.
- Loboda T.V., French N.H.F., Hight-Harf C. et al.** Mapping fire extent and burn severity in Alaskan tussock tundra: An analysis of the spectral response of tundra vegetation to wild-land fire // Remote Sens. Environ., 2013, vol. 134, p. 194–209.
- Muster S., Langer M., Abnizova A. et al.** Spatio-temporal sensitivity of MODIS land surface temperature anomalies indicates high potential for large-scale land cover change detection in Arctic permafrost landscapes // Remote Sens. Environ., 2015, vol. 168, p. 1–12.
- Shen H., Huang L., Zhang L. et al.** Long-term and fine-scale satellite monitoring of the urban heat island effect by the fusion of multi-temporal and multi-sensor remote sensed data: A 26-year case study of the city of Wuhan in China // Remote Sens. Environ., 2016, vol. 172, p. 109–125.
- Tucker C.J.** Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sens. Environ., 1979, vol. 8, p. 127–150.
- Van de Griend A.A., Owe M.** On the relationship between thermal emissivity and the normalized different vegetation index for natural surfaces // Intern. J. Remote Sensing, 1993, vol. 14, No. 6, p. 1119–1131.
- Weng Q., Lu D., Schubring J.** Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies // Remote Sens. Environ., 2004, vol. 89, p. 467–483.
- Westermann S., Langer M., Boike J.** Spatial and temporal variations of summer surface temperatures of high-arctic tundra on Svalbard – Implications for MODIS LST based permafrost monitoring // Remote Sens. Environ., 2011, vol. 115, p. 908–922.
- Zhu Z., Woodcock C.E.** Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data // Remote Sens. Environ., 2014, vol. 144, p. 152–171.

Поступила в редакцию
25 сентября 2015 г.