

ГОРНАЯ ЭКОЛОГИЯ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 622.014.3-62-519

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТУНДРОВОЙ ЭКОСИСТЕМЫ ПОСЛЕ ЗАКРЫТИЯ РУДНИКА “ВАЛЬКУМЕЙ” НА ЧУКОТКЕ

Г. В. Калабин¹, В. И. Горный², Т. А. Давидан²,
С. Г. Крицук², А. А. Тронин²

¹Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН,
E-mail: kalabin.g@gmail.com, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия

²Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, E-mail: v.i.gornyy@mail.ru,
ул. Корпусная, 18, 197110, г. Санкт-Петербург, Россия

Обоснована возможность использования цифровых космических съемок на локальном и региональном уровне для количественной оценки состояния растительного покрова тундры на территории размещения предприятий горнопромышленного комплекса в зоне многолетней мерзлоты. Приведены и проанализированы результаты исследований влияния деятельности подземного рудника “Валькумей” (Чукотский АО) на состояние природной среды в постэксплуатационный период.

Спутниковый мониторинг, растительность тундры, экосистема, вегетационный индекс, криолитозона, горнодобывающее предприятие

DOI: 10.15372/FTPRPI20180216

Ранее по материалам спутникового мониторинга растительности изучалась реакция экосистем на техногенную нагрузку со стороны предприятий по освоению недр, расположенных в различных подзонах тайги: комбинат “Североникель” (Мурманская область) [1], Олимпиадинский горно-обогатительный комбинат (ГОК) (Красноярский край) [2], Качканарский ГОК (Свердловская область) [3], Сорский горно-металлургический комплекс (Республика Хакасия) [4, 5]. Показано, что в зоне тайги колебание уровня техногенной нагрузки как в сторону повышения при вводе новых мощностей, так и в сторону снижения за счет применения более эффективных методов очистки выбросов горно-металлургических предприятий проявляется в соответствующих пространственно-временных изменениях нормализованного дифференциального вегетационного индекса (NDVI) экосистем, окружающих эти предприятия. Вместе с тем до сих пор не изучена реакция тундровой растительности на техногенную нагрузку предприятий по освоению недр криолитозоны, хотя актуальность такого исследования с каждым годом возрастает в связи с принятием государственной программы “Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года”.

Известно, что из-за более короткого вегетационного периода и низкой инсоляции растительность арктических тундр восстанавливается после снятия техногенной нагрузки значительно дольше, чем в таежной зоне [6]. Тем не менее неясно, на какое расстояние предприятия освоения недр оказывают техногенную нагрузку на тундровую растительность и в течение какого времени

может происходить процесс восстановления тундровых экосистем криолитозоны. Объектом исследования выбран рудник “Валькумей” Певекского ГОКа, расположенный на расстоянии ~338 км за Северным-полярным кругом на берегу Чаунской губы Восточно-Сибирского моря в зоне классической тундры, переходящей в полярную пустыню на сопках.

Рудник закрыт в 1998 г., и население поселка (около 4000 чел.) покинуло его в том же году [7]. Таким образом, техногенная нагрузка на окружающие экосистемы со стороны рудника “Валькумей” в историческом плане была снята мгновенно, что определило “чистоту” результатов наблюдения за процессом восстановления тундровых экосистем за последние 17 лет после снятия антропогенной нагрузки.

Цель настоящей работы — оценка расстояния, на которое распространялось техногенное влияние рудника, обогатительной фабрики и населения пос. Валькумей на тундровую экосистему, и времени восстановления этой экосистемы после закрытия рудника.

ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ, ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ. ФАКТОРЫ ТЕХНОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Валькумейское оловорудное месторождение расположено в южной части Певекского полуострова в 14 км к югу от г. Певек. Месторождение эксплуатировалось в период 1942–1998 гг. подземным способом системой разработки с магазинированием руды подэтажными штреками [8], что обеспечивало сплошность налегающих пород и почвы. Руда поступала на обогатительную фабрику, где применялась комбинированная флотогравитационная схема обогащения руд с получением оловянного концентрата, содержащего 23 % олова. С 1982 г. в летнее время обогатительная фабрика вела переработку хвостов обогащения.

Основным источником загрязнения атмосферы являлась мощная котельная с двумя трубами высотой 10–15 м, использовавшая привозной уголь. Вторым по мощности источником загрязнения воздуха был вентиляционный ствол рудника, который находился на фланге месторождения с исходящей струей рудничного воздуха, содержащего в основном пыль и в период взрывных работ — газ. Эти факторы в первую очередь негативно влияют на мхи и лишайники, которые, как известно, получают питание из воздуха. Кроме того, из-за отсутствия хвостохранилища отходы обогащения сливались на поверхность, что могло приводить к аэротехногенному пылевому загрязнению окружающих рудник экосистем.

Отметим, что олово — один из немногих металлов, растворимые соли которого не токсичны для человека (кроме гидрата олова), но токсичны для растений [9]. В целом можно считать, что негативное влияние антропогенного фактора оставалось в зоне повышенного экологического риска.

Главная особенность арктической тундры, окружающей рудник “Валькумей”, — безлесие и очень низкий ежегодный прирост фитомассы 1–2.5 т/га [10], что порождает скудный запас органики. Видовое разнообразие биоты тундровых экосистем структурировано в виде доминирующих по площади микрогруппировок и группировок сопутствующих, распределение которых определяется температурным режимом многолетнемерзлой толщи пород, выраженным через глубину слоя сезонного оттаивания.

Климатические условия территории размещения рудника и поселка крайне суровые. Месторождение располагается в криолитозоне со среднегодовой температурой ниже -5°C . Почвы обедненные, удельная эмиссия $\text{C}-\text{CO}_2$ низкая 500–700 кг/га за вегетационный период, при этом способность почв к самоочищению высокая 20–23 баллов. Вегетационный период короткий 40–60 дней. Территория характеризуется сильными ветрами (ветровое давление $0.6-0.73 \text{ кгс/м}^2$), поэтому интегральная оценка потенциала загрязнения атмосферы с учетом климатического фактора менее 2.4 [10]. Уровень техногенного загрязнения низкий, исключение составляют импактные зоны.

Информационной основой для изучения влияния рудника “Валькумей” на окружающие экосистемы стали цифровые карты NDVI, построенные по материалам многолетних съемок спутниками серии LandSat 5, 7, 8. Для построения карт NDVI использовалось выражение [11]:

$$I_V = \frac{\rho(\lambda_3 \div \lambda_4) - \rho(\lambda_1 \div \lambda_2)}{\rho(\lambda_3 \div \lambda_4) + \rho(\lambda_1 \div \lambda_2)}, \quad (1)$$

где I_V — NDVI; $\rho(\lambda_1 \div \lambda_2)$, $\rho(\lambda_3 \div \lambda_4)$ — спектральные коэффициенты яркости соответственно в красной и ближней инфракрасной областях спектра. Например, для космического аппарата (КА) LandSat 7 диапазоны длин волн $\lambda_1 \div \lambda_2$ составляют 0.63–0.69 мкм и $\lambda_3 \div \lambda_4$ — 0.75–0.90 мкм.

Для наиболее теплого сезона года (июль, август) в период с 1995 по 2016 г. на территорию, включающую рудник “Валькумей”, построены 10 карт NDVI (рис. 1). Для детальной привязки рудника и пос. Валькумей, а также для построения маски областей с отсутствием растительности на сопках, окружающих рудник, использованы материалы многоспектральной космической съемки сверхвысокого разрешения (3 м), полученные НЦ ОМЗ “Российские космические системы” с КА “Ресурс-П” в 2016 г.

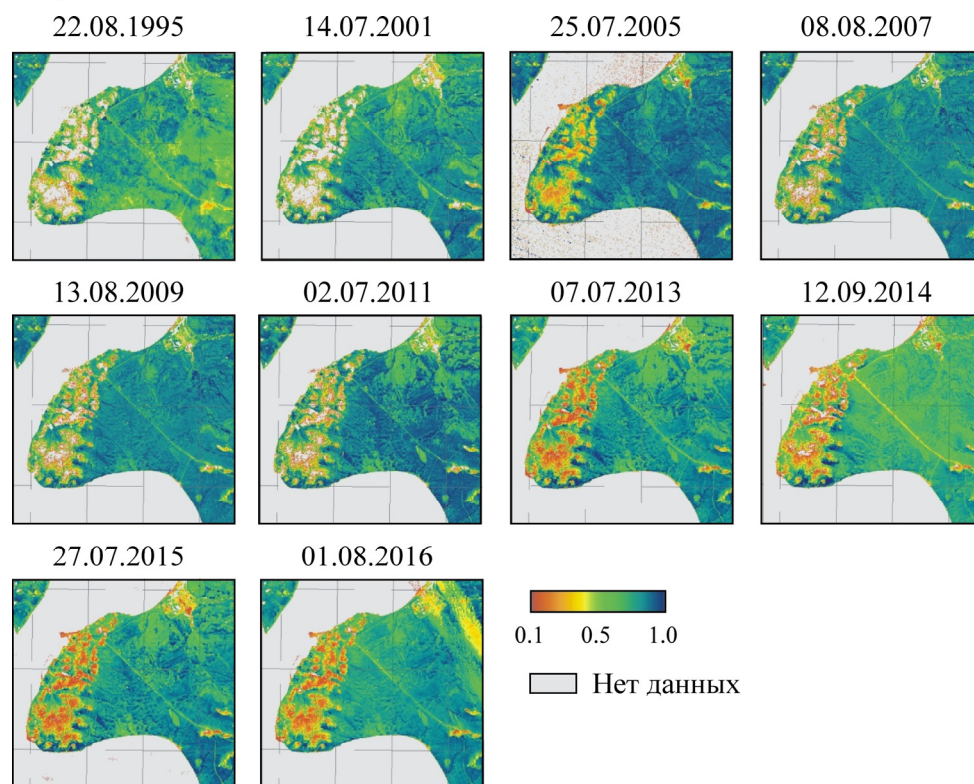


Рис. 1. Набор карт NDVI, подготовленный по материалам съемок КА серии LandSat за период с 1995 по 2016 г.

МЕТОДИКА АНАЛИЗА КАРТ NDVI

Количественная оценка состояния окружающей среды на территории размещения предприятия по спутниковым материалам проводилась согласно модифицированной методике, разработанной для природной зоны тайги [1–5]. В пределах исследуемого региона вокруг рудника “Валькумей” размечены кольцевые концентрические зоны, ширина которых с точностью до округления равна ~0.7 км (рис. 2б, табл. 1).

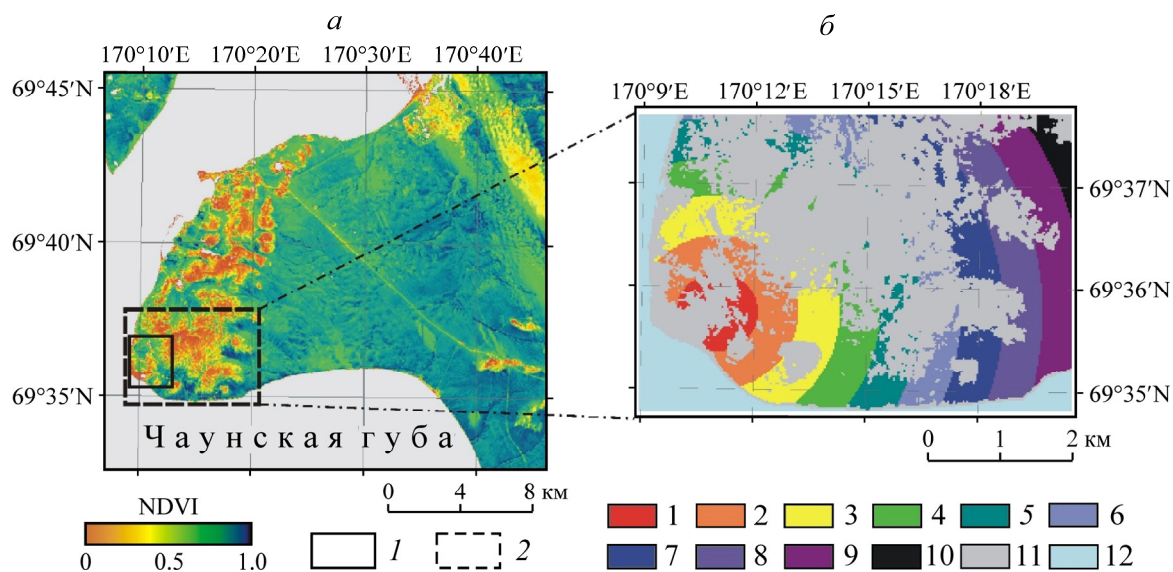


Рис. 2. Территория исследования реакции тундровых экосистем на снятие техногенной нагрузки: *а* — карта индекса NDVI, построенная по материалам съемки КА LandSat 8 в 2016 г. (1 — граница космического снимка сверхвысокого разрешения; 2 — граница исследуемой территории); *б* — карта зонирования территории для изучения пространственно-временной динамики NDVI (1–10 — номера концентрических зон, в пределах которых рассчитывался средний NDVI). Характеристики зон приведены в табл. 1; 11 — область отсутствия растительности; 12 — акватория

ТАБЛИЦА 1. Характеристики концентрических зон

Номер зоны <i>n</i>	Радиус, м	Количество пикселей <i>N</i>	Номер зоны <i>n</i>	Радиус, м	Количество пикселей <i>N</i>
1	0–1065	1607	6	3885–4605	4723
2	1065–1800	3707	7	4605–5325	4469
3	1800–2490	4667	8	5325–5895	4270
4	2490–3195	4944	9	5895–6575	3515
5	3195–3885	5305	10	6575 до границ участка (см. рис. 2б)	809

Поскольку на исследуемой территории значительные по площади участки лишены растительного покрова в силу суровости природных условий, при изучении реакции растительности на снятие техногенной нагрузки со стороны рудника “Валькумей” они исключены из анализа. При таком подходе сохранялась чувствительность к изменениям NDVI на участках с растительным покровом. В противном случае, если бы существенная доля площади исследуемой концентрической зоны приходилась на оголенные территории (например, зона 4 на рис. 2), то на этой площади не наблюдалось бы никаких изменений NDVI. Это снижало бы средние по зоне вариации NDVI.

По материалам съемки сверхвысокого пространственного разрешения, полученным в 2016 г. с космического аппарата “Ресурс-П”, построена детальная карта NDVI. Эпоха 2016 г. выбрана потому, что с момента закрытия рудника прошло уже 17 лет и отсутствие растительности в максимальной степени было обусловлено климатическим фактором, а не антропогенной нагрузкой, включая техногенную. В пределах этой карты пороговым методом очерчена область отсутствия растительности (нулевой NDVI) и на этой основе подготовлена маска отсутствия растительности в масштабе, соответствующем масштабу карт NDVI, построенных по материалам съемок КА серии LandSat.

Для устранения влияния межгодовых климатических вариаций на результаты анализа карт NDVI использовался поправочный коэффициент, базирующийся на NDVI фона, за который принята десятая зона ($n = 10$). Поправочный коэффициент рассчитывался по формуле

$$k = \frac{\sum_{x,y} I_V^{n=10}(x,y,t_0)}{\sum_{x,y} I_V^{n=10}(x,y,t)}, \quad (2)$$

где n — номер концентрической зоны (рис. 2б); x, y — номера пикселей цифровой карты в пределах данной концентрической зоны, находящиеся за пределами маски отсутствия растительности; t — текущее время съемки, t_0 — время первой съемки.

В результате пространственно-временная изменчивость растительности изучалась по среднему в каждой концентрической зоне NDVI, нормированному на первоначальное состояние фоновой области:

$$\bar{I}_V^n(t) = \frac{k \sum_{x,y} I_V^n(x,y,t)}{N}, \quad (3)$$

где N — количество не маскированных пикселей в данной концентрической зоне; $n = 1-9$ — номера концентрических зон.

Необходимо отметить, что применение маски отсутствия растительности, с одной стороны, повысило чувствительность метода, а с другой — повлияло на значения стандартных погрешностей (рис. 3, 4), которые в данном случае зависели от площади концентрической зоны, занятой растительностью (точнее, от количества пикселей внутри области зоны, находящейся вне маски). Тем не менее, как следует из табл. 1, количество пикселей внутри каждой зоны статистически весьма представительно, что позволяет говорить о незначимости погрешностей при оценке средних значений NDVI по каждой концентрической зоне. Например, для концентрической зоны № 2 стандартная погрешность оценки значения $\bar{I}_V^n(t)$ в каждом пикселе равна ~ 0.05 (рис. 3). При количестве пикселей второй зоны, равном 2077, погрешность определения среднего будет почти в 45 раз меньше, т. е. незначима.

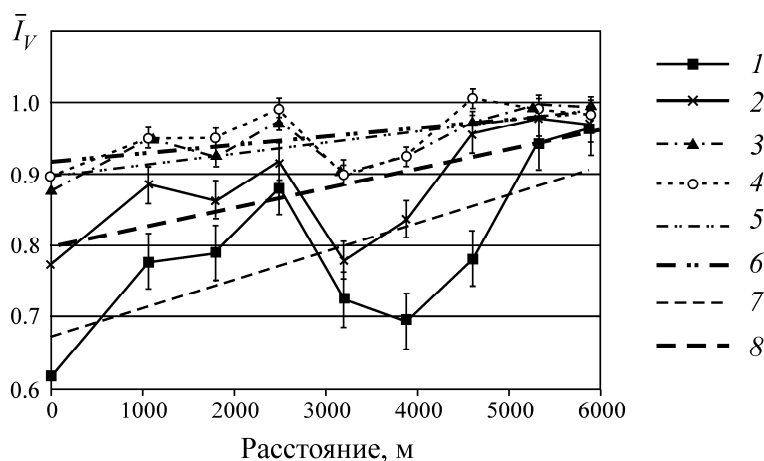


Рис. 3. Пространственная изменчивость $\bar{I}_V^n(t)$. Интервалы показывают стандартные погрешности оценок $\bar{I}_V^n(t)$: 1 — 22.08.1995; 2 — 14.07.2001; 3 — 25.07.2005; 4 — 10.08.2016; пространственные тренды изменения $\bar{I}_V$ соответственно: 5 — 22.08.1995; 6 — 14.07.2001; 7 — 25.07.2005; 8 — 10.08.2016

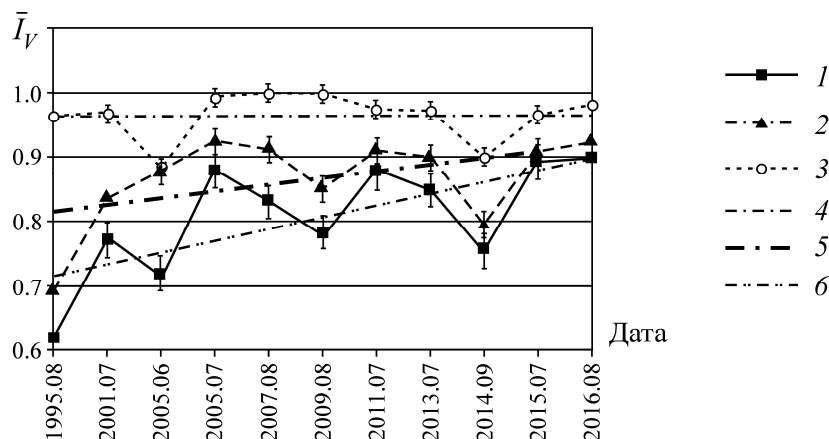


Рис. 4. Временная изменчивость $\bar{I}_V^n(t)$. Интервалы показывают стандартные погрешности оценок $\bar{I}_V^n(t)$. Номера концентрических зон: 1 — $n = 1$; 2 — $n = 5$; 3 — $n = 9$; временные тренды изменения $\bar{I}_V^n(t)$ концентрических зон: 4 — $n = 1$; 5 — $n = 5$; 6 — $n = 9$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Применение приведенной методики позволило изучить пространственную (рис. 3) и временную (рис. 4) изменчивости $\bar{I}_V^n(t)$. Установлено, что в 1995 г., т. е. за три года до закрытия рудника “Валькумей”, при удалении от него отчетливо прослеживался рост $\bar{I}_V^n(t)$ с 0.6 в зоне № 1 до 1.0 в зоне № 9, т. е. почти до фоновое (ненарушенное) состояние экосистем. Кроме того, на расстоянии ~4 км (зона № 6) от промплощадки рудника наблюдался минимум, что объясняется практически полным отсутствием растительного покрова на вершинах сопков (желтый цвет на рис. 2а), которые занимают большую часть площади этой зоны.

В 2001 г. через три года после закрытия рудника отмечалось некоторое повышение $\bar{I}_V^n(t)$ с 0.8 в районе бывшего рудника (зона № 1) до почти 1.0 в зоне № 9. В 2005 г. значения $\bar{I}_V^n(t)$ достигли насыщения и изменялись уже с 0.88 в зоне № 1 до почти 1.0 в зоне № 9. Дальше между 2005 и 2016 г. во все изученные годы съемок (рис. 1) пространственная изменчивость $\bar{I}_V^n(t)$ в пределах доверительных интервалов не отличалась от таковой в 2016 г. (кривая 4 на рис. 3).

Анализ временной изменчивости $\bar{I}_V^n(t)$ (рис. 4) показывает, что самое быстрое возрастание этого индекса происходило вокруг промплощадки закрытого рудника “Валькумей” в зоне № 1. В дальней зоне № 9 изменения за весь период наблюдений практически не заметны (кривая 3 и линия временного тренда 6 на рис. 4). В промежуточных зонах прослеживалось монотонное уменьшение угла наклона временных трендов с удалением от рудника.

Восстановление $\bar{I}_V^n(t)$ в зоне № 1 с ~60 до ~90 % от уровня фона (ненарушенной экосистемы) произошло достаточно быстро — за 7 лет (рис. 3). Полное восстановление экосистем до уровня фона (100 %) потребует большего времени.

Применение разработанной методики многолетнего мониторинга реакции тундровой растительности на снятие техногенной нагрузки показало, что в дальней зоне № 9, т. е. на расстоянии около 6 км от рудника “Валькумей”, не зафиксированы многолетние изменения $\bar{I}_V^n(t)$. Это расстояние можно принять за радиус негативного влияния на природную среду предприятия освоения недр, разрабатывающего оловорудное месторождение подземным способом.

Анализ результатов спутникового мониторинга (табл. 2) показывает, что расстояние техногенного влияния на окружающие экосистемы для большинства предприятий по освоению недр составляет 6–13 км. Исключением является ОАО “Комбинат Североникель”, его негативное влияние достигает 45 км на север, в сторону основного направления ветров. Это можно объяснить наличием высокой трубы, которая обеспечивает дальний аэротехногенный перенос сильно токсичных продуктов переработки никелевых руд.

ТАБЛИЦА 2. Расстояния негативного влияния предприятий освоения недр (по данным спутникового мониторинга [1])

Предприятие	Регион, природная подзона	Расстояние, км
ОАО “Комбинат Североникель”	Мурманская область, лесотундра	7–45 (в зависимости от розы ветров)
ГОК “Олимпиадинский”	Красноярский край, северная тайга	10–12
Сорский молибденовый ГОК	Хакасия, степь, лесостепь, горная тайга	8
ОАО “ЕВРАЗ Качканарский ГОК”	Свердловская область, средняя тайга	13
Рудник “Валькумей”	Чукотский АО, тундра	6 (рис. 2)

Таким образом, несмотря на то что на руднике “Валькумей” добыча касситерита осуществлялась подземным способом, дальность его негативного влияния на окружающие тундровые экосистемы оказалась того же порядка, что и предприятий, ведущих разработку месторождений открытым способом. Можно предположить, что в дополнение к техногенной нагрузке со стороны рудника “Валькумей” действовал еще один мощный фактор, определивший угнетение тундровых экосистем на столь значительное расстояние в 6 км. В отличие от зоны тайги, тундровые экосистемы более подвержены пожарам антропогенного происхождения, особенно при потеплении климата [6].

В Чаунском районе, где расположен рудник “Валькумей”, начиная с середины 70-х годов прошлого века наблюдалось монотонное возрастание среднегодовой температуры воздуха (рис. 5), что увеличило вероятность возникновения тундровых пожаров.

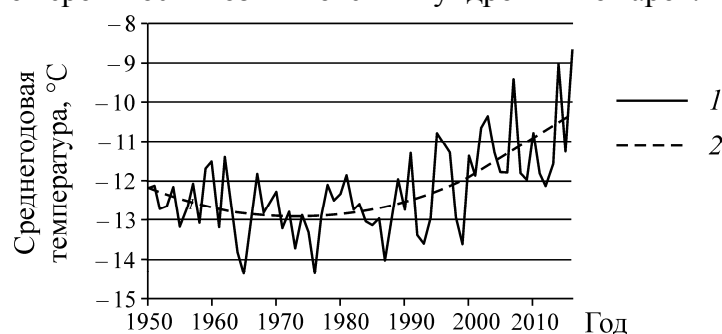


Рис. 5. Изменение среднегодовой температуры воздуха в Чаунском районе за последние 65 лет: 1 — среднегодовая температура; 2 — многолетний тренд среднегодовой температуры

Высокое для полярных районов количество жителей пос. Валькумей обеспечивало постоянное нахождение людей в тундре, а значит, риск возникновения антропогенных пожаров. Подтверждением этого предположения является совпадение времени восстановления NDVI с временем восстановления после пожара продуктивности тундровой растительности. Так, для южной тундры (район Воркуты) уже через 2 года после пожара валовая первичная продукция

достигает 50 % от контроля, а через 5 лет — 115 % [6, 12]. В кочкарной тундре Аляски гарь покровов сосудистой растительности восстанавливается на 80 % через 8 лет после пожара [12, 13]. Эти цифры совпадают с полученными на основе анализа космических материалов. Отсюда следует заключение о преимущественном влиянии антропогенного фактора на угнетение тундровых экосистем вокруг рудника “Валькумей”, проявившегося в антропогенных тундровых пожарах.

ВЫВОДЫ

Разработанная методика спутникового мониторинга реакции растительности на техногенное воздействие со стороны предприятий освоения недр после незначительной модификации применима и для природной зоны тундры в районах многолетней мерзлоты.

Мониторинг с использованием материалов съемки спутниками серии LandSat показал, что:

— обедненный растительный покров тундры характеризуется низкими абсолютными значениями NDVI даже в фоновых зонах 0.3–0.34;

— основным источником загрязнения атмосферного воздуха являлась мощная котельная, расположенная на промплощадке и работавшая на привозном угле практически круглый год;

— влияние техногенной нагрузки на атмосферу незначительно, поскольку газопылевые отходы рудника рассредоточены, малы по объему и нетоксичны, что подтверждается незначительными вариациями NDVI в импактной зоне от 0.19 (1995 г.) до 0.26 (2016 г.);

— реакция тундровой растительности на антропогенное, включая техногенное, воздействие рудника “Валькумей”, распространяется на расстояние до 6.5 км.

После закрытия рудника “Валькумей” время восстановления NDVI до уровня 90 % от фонового составило около 7 лет, что указывает на процесс самовосстановления тундровых экосистем.

В период функционирования рудника существенный вклад в деградацию тундровой растительности могли внести пожары антропогенной природы, связанные с посещением населения пос. Валькумей окружающих тундровых территорий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kalabin G. V. Use of remote sensing to assess the environmental setting of the territories – zones of mining complex enterprises, Mining World Express (MWE), 2012, Vol. 1, No. 1. — P. 1–7.
2. Калабин Г. В. Экодинамика территорий освоения георесурсов России. Изд-во Lambert Academic Publishing, 2012. — 314 с.
3. Государственная программа “Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации”. Постановление Правительства от 31.08.2017 г., № 1064.
4. Честных О. В., Лопес де Греню В. О. Послепожарные изменения углеродного цикла в субарктической тундре северо-востока Европейской части России // Эмиссия и сток парниковых газов на территории северной Евразии: тез. докл. 2-й Междунар. конф., 16–20 июня 2003. — Пушино. — С. 124–125.
5. Постсоветский период — Чукотский АО. Чукотка. [pф/region/history](http://region/history)
6. Певекский ГОК. Горная энциклопедия. www/mining-enc.ru.
7. Севрюков Н. Н. Олово // Краткая химическая энциклопедия. Т. 3. — М., 1969. — С. 738–739.
8. Природные ресурсы и экология России. Федеральный атлас. — М., 2002. — 277 с.
9. Баргалева С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. — М.: ИКИ РАН, 2016. — 208 с.
10. Замолотчиков Д. Г., Карелин Д. В., Иващенко А. И. Послепожарные изменения углеродного цикла в южных тундрах // Экология. — 1998. — № 4. — С. 271–276.
11. Racine C. H. Tundra fire effects on soils and three plant communities along a hill-slope gradient in the Seward Peninsula, Alaska, Arctic., 1981, Vol. 34, No. 1. — P.71–84.

Поступила в редакцию 29/IX 2017