

Верификация крупномасштабных карт термодинамического индекса нарушенности экосистем

В.И. Горный¹, С.Г. Крицук¹, И.Ш. Латыпов¹, В.Н. Храмцов²

¹ Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

² Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: vteberda@gmail.com

Разработана методика построения крупномасштабных карт термодинамического индекса нарушенности экосистем (ТИНЭ). Основой явилось комплексирование материалов тепловых и многоспектральных съемок спутниковыми системами низкого (EOS (MODIS) и NOAA (AVHRR)) и высокого геометрического разрешения (Landsat TM (ETM+), Terra (ASTER)). В качестве тестовых полигонов выбраны: особо охраняемая природная территория – заказник «Березовые острова» (северная часть российской акватории Финского залива); территория на побережье Финского залива в районе нового нефтеналивного порта г. Приморска (Карельский перешеек). Тестовые полигоны обеспечены комплектами карт масштаба 1 : 50 000, характеризующими как современное состояние растительных сообществ, так и историческую ретроспективу. Выполнен анализ статистических распределений ТИНЭ для различных растительных сообществ. Показано, что средние значения ТИНЭ, рассчитанные в пределах границ конкретных типов нарушенных экосистем, не противоречат легендам стандартной карты. Это обосновывает возможность применения ТИНЭ при построении карт нарушенности экосистем не крупнее масштаба 150 000.

Ключевые слова: экосистема, воздействие, термодинамика, спутник, тестовый полигон, картографирование, крупный масштаб.

Введение

Ранее для интегральной оценки накопленного антропогенного воздействия на экосистемы нами была теоретически обоснована и реализована методика построения карт термодинамического индекса нарушенности экосистем (ТИНЭ). Методика использует материалы многократной многоспектральной и тепловой космической съемок спутниками серии NOAA (AVHRR) и Terra/Aqua (MODIS) (Gornyy et al., 2010; Горный и др., 2011). ТИНЭ как количественный критерий нарушенности экосистем основан на феномене снижения скорости испарения влаги с поверхности нарушенных экосистем, сопровождающемся понижением эффективности поглощения солнечной радиации растительностью. Было показано, что ТИНЭ является вдвое более чувствительной характеристикой нарушенности экосистем, чем нормализованный дифференциальный вегетационный индекс НДВИ (Горный и др., 2011).

Недостатком полученных карт ТИНЭ является их низкое геометрическое разрешение на местности (~ 1 × 1 км), что не позволяет строить карты ТИНЭ в масштабе крупнее 1 : 1 000 000 и затрудняет проведение их наземной верификации на количественном (измерительном уровне). Это не позволяет решать многие практические задачи охраны окружающей среды. Поэтому появилась практическая необходимость повысить геометрическое разрешение на местности карт ТИНЭ.

В связи с этим целью настоящей работы является разработка методики повышения детальности и оценка достоверности карт ТИНЭ.

1. Основные соотношения

На основе теоретических исследований в области термодинамики экосистем (Jorgensen, Svirezhev, 2004) показано, что ТИНЭ – I_T – может быть записан как (Gornyy et al., 2010; Горный и др., 2011):

$$I_T = Ex_a / Ex_o \approx \Delta Ex_c / Ex_o; \quad (1)$$

где: Ex_o – эксергия поглощенной экосистемой (ЭС) солнечной радиации; Ex_a – эксергия поглощенной ЭС солнечной радиации, расходуемая на парирование воздействия антропогенной нагрузки (АН); ΔEx_c – разность между эксергиями, затрачиваемыми на депонирование углерода ненарушенными и нарушенными ЭС.

Из уравнения (1) следует, что ТИНЭ есть доля эксергии поглощенной ЭС солнечной радиации, расходуемая на парирование воздействия АН. Правая часть уравнения (1) позволяет рассчитать ТИНЭ по данным дистанционных (авиационных или спутниковых) измерений.

В соответствии с уравнением (1) для фоновой (ненарушенной) ЭС $I_T=0$, так как фоновая ЭС не подвергалась воздействию АН ($Ex_a=0$). В нарушенной (подвергавшейся воздействию АН) ЭС: $1 > I_T > 0$. Таким образом, из теоретических соображений ясно, что ТИНЭ количественно отражает уровень нарушенности ЭС в результате воздействия на нее АН¹.

Доля \hat{Ex}_o , затраченная ЭС на депонирование углерода – \hat{Ex}_c прямо пропорциональна количеству влаги, испаряемой ЭС. Для растительности необходимо затратить 278 кДж тепла для депонирования 1 г углерода в биомассе (Jorgensen, Svirezhev, 2004). Отсюда следует:

$$\hat{Ex}_c = a \times b \times \bar{V} = 3,66 \times \bar{E}; \quad (2)$$

где \bar{E} – удельная среднесуточная скорость испарения влаги с поверхности ЭС, $m^3/(m^2 \times c)$; $a = 1/879$, (кг углерода)/($m^3 H_2O$), – углерод/водный коэффициент (ЭС должна испарить 879 m^3 воды для депонирования 1 кг углерода); b – коэффициент удельной энергии ассимиляции углерода (278×10^6 Дж/(кг углерода)). Таким образом, для картографирования ТИНЭ прежде всего необходимо по дистанционным измерениям картографировать \bar{E} – удельную среднесуточную скорость испарения влаги с поверхности ЭС.

Для дистанционного картографирования \bar{E} нами используется метод, основанный на теплоинерционном (ТИ) подходе. Этот подход предусматривает применение математической модели суточного хода температуры земной поверхности T_s , учитывающей все основные факторы, определяющие тепловой режим поверхности (Горный и др., 1993; Горный, Крицук, 2006). Для картографирования \bar{E} необходимо спутниковыми измерениями обеспечить описание суточного хода температуры поверхности, т.е. выполнить тепловую съемку в периоды наибольшего нагрева и остывания дневной поверхности, а также в близинверсионные периоды (утро, вечер).

¹ Кроме воздействия АН ЭС могут нарушаться под воздействием природных факторов (например, лесные и степные пожары, массовое размножение вредителей растений и т.п.).

2. Материалы и методы

2.1. Выбор материалов спутниковых съемок для крупномасштабного картографирования ТИНЭ

Основная трудность повышения детальности карт ТИНЭ заключается в необходимости выполнения космической съемки съемочными системами ИК-теплого диапазона спектра электромагнитных волн (ЭМВ) высокого разрешения. В *табл. 1* приведены технические характеристики современных систем, выполняющих тепловую космическую съемку.

Анализ *табл. 1* показывает, что для повышения детальности карт ТИНЭ могут быть использованы материалы съемок спутниками Landsat TM (ETM+) и Terra (ASTER). Тем не менее, эти материалы обладают рядом недостатков. К материалам Landsat TM (ETM+) неприменим метод учета влияния атмосферы, использующий разделенные тепловые каналы (split window method), так как сканер этого спутника имеет только один тепловой канал.

Таблица 1. Технические характеристики современных съемочных систем, выполняющих тепловую космическую съемку

Характеристика	Спутник					
	NOAA-15	NOAA-16	Terra	Aqua	Landsat	Terra
Сканер	AVHRR	AVHRR	MODIS	MODIS	TM/ETM+	ASTER
Геометрическое разрешение на местности тепловых каналов, м	1100	1100	1000	1000	120/60	90
Ширина полосы обзора, км	2700	2700	2330	2330	185	60
Время пересечения экватора, чч:мм	07:00	14:00	10:30	13:30	10:00	10:30
Повторяемость съемки, суток	0,5	0,5	0,5	0,5	15	15

Еще одним недостатком спутников Landsat TM (ETM+) и Terra (ASTER) является то, что они не могут обеспечить условие полного описания суточного хода температуры дневной поверхности, так как выполняют съемку только в утреннее или вечернее время суток (*рис. 1*). Кроме того, практически не выполняются вечерние съемки этими спутниками. Выполнить такую съемку можно только по специальному заказу.

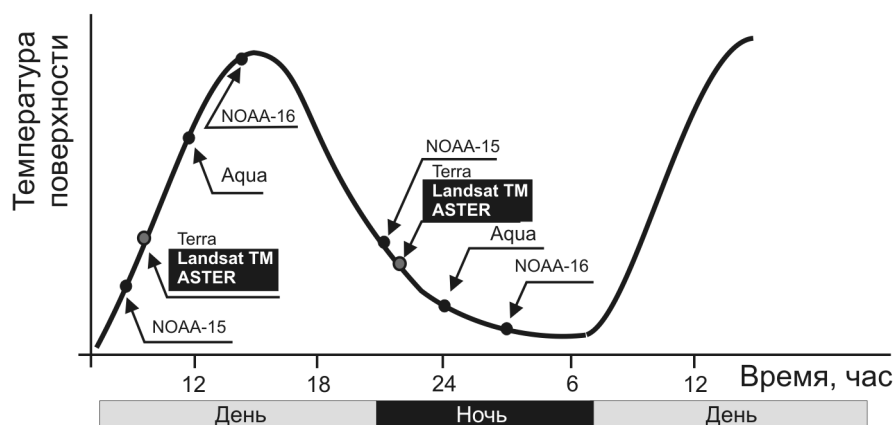


Рис. 1. Время выполнения тепловой космической съемки различными спутниками по отношению к суточному ходу температуры дневной поверхности

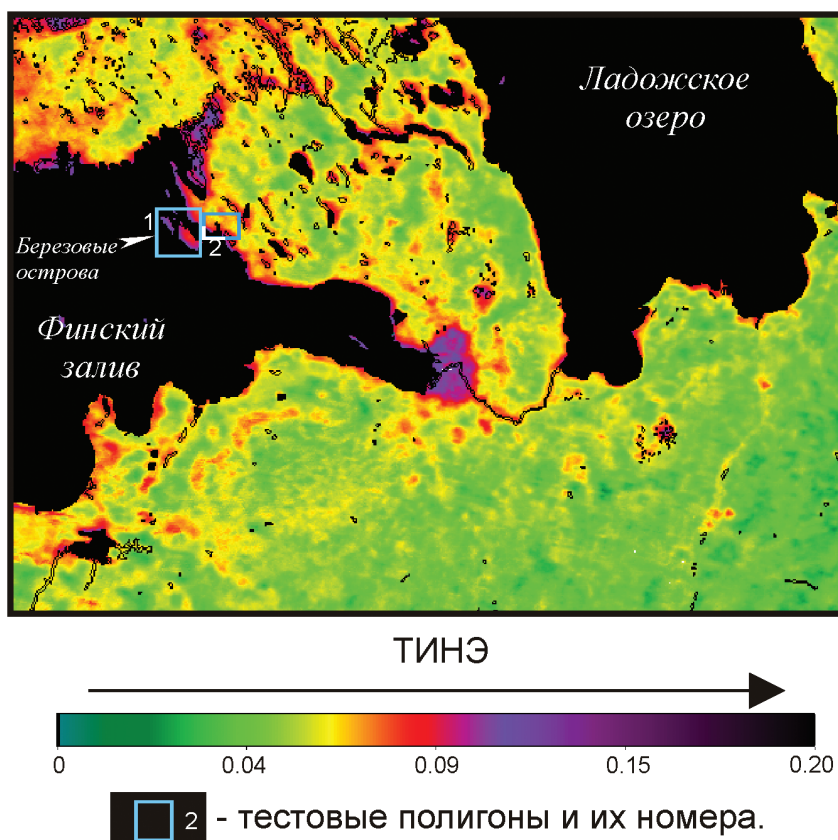


Рис. 2. Фрагмент карты ТИНЭ Ленинградской области масштаба 1 : 1 000 000, подготовленной по материалам съемок только спутниками низкого разрешения Terra/Aqua (MODIS). Прямоугольником показаны границы карты современного состояния экосистем, подготовленные БИИ РАН на район г. Приморска. Территории тестовых полигонов: 1 – заказник «Березовые острова»; 2 – район порта г. Приморск

Преодоление вышеуказанных ограничений возможно следующим образом. Учет влияния атмосферы для тепловой съемки спутником Landsat TM (ETM+) может быть выполнен с использованием известных характеристик состояния атмосферы с помощью моделей пропускания атмосферы, например, MODTRAN.

Для требуемого полного описания суточного хода температуры дневной поверхности целесообразно совместно с тепловыми материалами утренних съемок высокого геометрического разрешения на местности спутниками Landsat TM (ETM+) или Terra (ASTER) включить в комплект материалы тепловой космической съемки низкого разрешения, полученные спутниками NOAA (AVHRR), Terra / Aqua (MODIS). При этом расчет эксергии поглощенной ЭС солнечной радиации (методика изложена в (Горный др., 2011) должен выполняться по материалам съемки высокого разрешения, полученным в каналах видимого и ближнего-ИК диапазонов ЭМВ.

В табл. 2 приведены материалы тепловой космической съемки, использованные для построения крупномасштабной карты ТИНЭ на территорию Карельского перешейка (Ленинградская область).

Таблица 2. Характеристики использованных спутниковых материалов

<i>№ п/п</i>	<i>Спутник</i>	<i>Дата</i>	<i>Время съемки (Гринвич)</i>
1	Landsat	16.09.2006	10:50
2	Terra (MODIS)	15.09.2006	19:10
3	Terra (MODIS)	16.09.2006	00:50
4	Terra (MODIS)	16.09.2006	10:15

В результате была подготовлена карта ТИНЭ высокого разрешения, фрагменты которой анализируются далее. Для сравнения, на основе только материалов съемки спутниками Terra / Aqua (MODIS) были подготовлены карты масштаба 1 : 1 000 000 (рис. 2).

2.2. Характеристика тестового полигона

Верификация крупномасштабных карт ТИНЭ выполнена на примере хорошо исследованной и обеспеченной тематическими картами территории заказника «Березовые острова» и прилегающей к ней береговой части Карельского перешейка, включая порт г. Приморска. На эти территории в БИН РАН по стандартной методике подготовлены комплекты карт масштаба 1 : 50 000 состояния растительности (Природная среда..., 2007; Волкова, Храмцов, 2003) (рис. 3, 4 А).

При построении этого комплекта карт степень нарушенности растительного покрова ключевых участков оценивалась исходя из:

- степени изменения коренных или условно коренных растительных сообществ, которые свойственны данной зоне и данному экотопу;
- времени, необходимого для восстановления экосистемы до субкоренного состояния.

Например, для таежной зоны не свойственна естественная луговая растительность вне пойм рек и приморских территорий (сублиторали). Все луга являются вторичными и созданы человеком на месте лесов или болот. На восстановление лесной растительности на месте вторичных лугов требуется несколько столетий. В связи с этим луга рассматриваются как сильнонарушенные экосистемы.

Нарушения в растительном покрове проявляются по-разному в зависимости от силы и характера воздействия антропогенного или естественного фактора. В исследованном районе практически не существует ненарушенных растительных сообществ. При незначительной нарушенности растительности (например, при рекреационной нагрузке) происходят изменения флористических и структурно-ценотических черт растительных сообществ. При этом в лесных сообществах сохраняется целостность главного компонента (эдификаторной синузии) – древостоя – и в основном сохраняются экологические функции сообществ. Такие фитоценозы довольно быстро восстанавливаются. При более сильных нарушениях (вырубки, пожары, рекреация) происходит смена эдификаторов, и обычно коренные сообщества заменяются производными. При этом нарушаются основные функции лесных сообществ, особенно водорегулирующая и почвозащитная. Восстановление этих сообществ к коренным типам идет длительное время и разными путями.

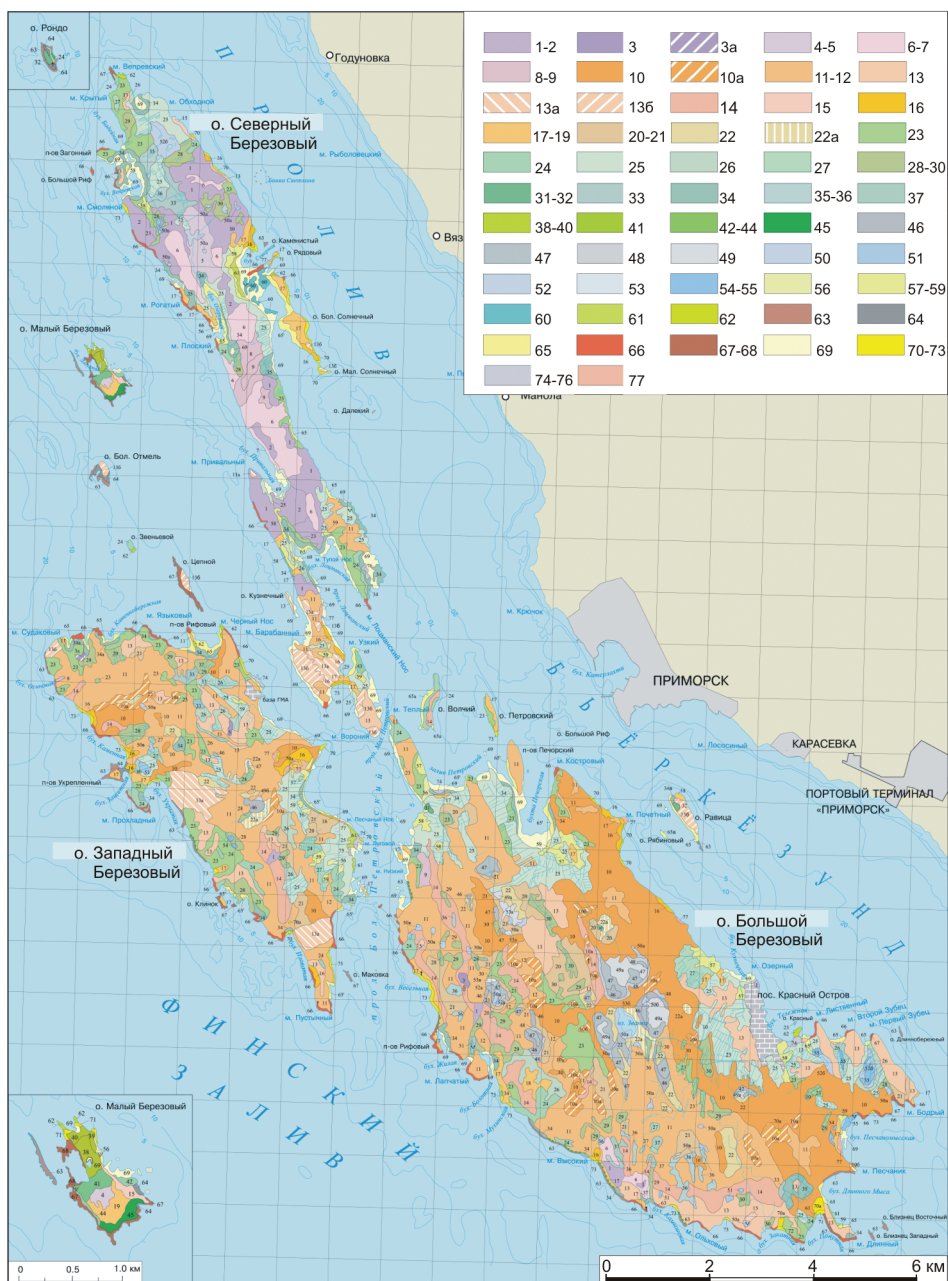


Рис. 3. Карта растительности заказника Березовые острова (Природная среда..., 2007).
 Условные обозначения. Леса: 1–2. Еловые зеленомошные. 3. Еловые кисличные. 3а. Еловые мертвопокровные. 4–5. Еловые сфагновые. 6–7. Елово-сосновые зеленомошные и мелкотравные. 8–9. Еловые сфагновые. 10. Сосновые кустарничково-зеленомошные. 10а. Сосновые молодняки лишайниково-зеленомошные. 11–12. Сосновые и березово-сосновые чернично- и мелкотравно-зеленомошные. 13. Сосновые и березово-сосновые леса мелкотравно-черничные. 13а. Березовые молодняки с отдельными соснами. 13б. Иван-чаевые с редкой сосной. 14. Сосновые черничные с березой и елью. 15. Сосновые черничные с неморальными травами. 16. Разреженные сосновые лишайниково-моховые. 17–19. Сосновые травяные с участием неморальных видов. 20–21. Березово-сосновые леса сфагновые. 22. Сосновые и березово-сосновые болотнокустарничково-сфагновые леса. 22а. Сосновые багульниково-чернично-сфагново-зеленомошные. 23. Березовые чернично-травяные. 24. Березняки, травяные с участием неморальных видов. 25. Березовые щучковые и щучково-разнотравные. 26. Березовые и черноольхово-березовые папоротниковые. 27. Березовые гигрофитнотравяные. 28–30. Березовые гигрофитнотравяно-сфагновые и долгомошные. 31–32. Осиновые папоротниковые, чернично-травяные с участием неморальных видов.

33. Черноольховые травяные с участием неморальных видов. 34. Черноольховые таволговые. 35. Черноольховые папоротниковые и гигрофитнотравяные, осоковые.
37. Черноольховые гигрофитнотравяно-сфагновые. 38–40. Дубово-ясеневые и ясеневые травяные. 41. Липовые с дубом и кленом неморальнотравные. 42–44. Дубовые травяные. 45. Широколиственные смешанного состава неморальнотравные.
- Верховые болота: 46. Сосново-пушицево-кустарничково-сфагновые. 47. Кустарничково-сфагновые с низкой сосной. 48. Пушицево-сфагновые. 49. Грядово-ковровые комплексы: сфагновые и сосново-кустарничково-сфагновые. Переходные болота: 50. Осоково-сфагновые. 51. Травяно-сфагновые. 52. Тростниково-сфагновые. 53. Коврово-кочкарные травяно-сфагновые комплексы. Низинные болота: 54–55. Осоковые, травяные, тростниковые. Луга: 56. Сухие злаково-разнотравные. 57–59. Злаковые.
- Приморская растительность, литоральные луга: 60. Злаково-болотничево-ситниковые низкотравные. 61. Таволговые высокотравные. 62. Пижмовые высокотравные. 63. Разреженные двукисточниково-разнотравные. 64. Нитрофильнотравяные. 65. Экологические микропоясные ряды растительных сообществ в бухтах.
66. Экологические микропоясные ряды растительных сообществ на песчано-каменистых берегах. 67–68. Экологические микропоясные ряды растительных сообществ на каменистых берегах. Гигрофитнотравяная растительность: 69. Тростниковые, камышовые и клубнекамышовые сообщества. Псаммофитнотравяная растительность: 70–73. Псаммофитнотравяные сообщества. Литоральные болота: 74–76. Осоковые, болотничевые, молиниевые. Пустошная растительность: 77. Мохово-лишайниковые и овсяницево-мохово-лишайниковые

Наиболее сильные нарушения (строительство, распашка) приводят к полному уничтожению естественных растительных сообществ и замены их агроценозами и селитебно-промышленными комплексами. Снятие воздействия (например, прекращение сельскохозяйственной деятельности) ведет в таежной зоне к восстановлению лесной растительности. Процесс восстановления коренных лесов очень длительный – сотни лет, со сменой нескольких эдификаторных синузидии, в том числе и древесных.

Исходя из изложенного подхода, для территории заказника «Березовые острова» и прилегающей к ней береговой части Карельского перешейка, включая порт г. Приморска, выделены следующие четыре градации степени нарушенности коренных лесных сообществ.

- Слабонарушенная растительность. К ней отнесены условно-коренные еловые и сосновые леса, слабо затронутые деятельностью человека; устойчивые длительнопроизводные сосняки (преимущественно кустарничково-зеленомошные) без признаков восстановления ели; болотная и литоральная растительность без явных нарушений.
- Средненарушенная растительность включает хвойные леса, находящиеся под воздействием таких факторов, как выборочные рубки, низовые пожары, умеренные рекреационные нагрузки; кратковременнопроизводные хвойно-мелколиственные лесные сообщества с явными признаками восстановительных процессов, прошедшие стадию сильной нарушенности; болотные растительные сообщества с некоторыми изменениями в их видовом составе, преимущественно под влиянием мелиорации. Травянистая растительность островов (литоральные луга и сублиторальные луга).

- Сильнонарушенная растительность включает производные растительные сообщества, возникшие на месте полностью сведенных лесов и сильнонарушенную болотную растительность. Сильнонарушенная лесная растительность подразделена на три категории:
 - а) вторичные мелколиственные леса и кустарники без явных признаков восстановления коренных типов леса (сероольховые, березовые — преимущественно на месте заброшенных сельскохозяйственных угодий; березовые — на месте вырубок и гарей);
 - б) суходольные луга;
 - в) пустошная растительность на месте недавних гарей и вырубок.
- Полностью уничтоженная естественная растительность (населенные пункты, промышленные предприятия, свалки мусора, пашни).

Особенностью заказника «Березовые острова» является полное прекращение хозяйственной деятельности после организации этого заказника в начале 1960-х годов прошлого века. Можно предположить, что в целом антропогенная нагрузка на природную среду на этом архипелаге значительно снизилась уже в начале 40-х годов прошлого века, когда эта территория вошла в состав СССР. Состояние нарушенности лесных экосистем на начало 40-х годов прошлого века хорошо иллюстрирует карта освоенности территории *рис. 4А*.

3. Результаты

На *рис. 4Б* представлена крупномасштабная карта ТИНЭ, построенная с использованием комплекта материалов тепловой-многоспектральной космической съемки, характеристика которых приведена в *табл. 2*. Сравнение крупномасштабной карты ТИНЭ, построенной с применением материалов спутника Landsat ТМ (*рис. 4Б*), с картой освоенности территории (*рис. 4А*) показывает, что бывшие сельхозугодья, гари, населенные пункты индицируются повышенными значениями ТИНЭ. После прекращения хозяйственной деятельности на бывших сельхозугодьях возникли лесные экосистемы (березняки разнотравные и березовые леса черничные; *рис. 3* и *1* на *рис. 4*). На данный момент экосистемы на этих площадях так и не восстановились до того уровня, который был до начала хозяйственной деятельности, т.е. еще не сформировались лесные экосистемы, представленные сосняками чернично-зеленомошными и черничными с участием неморальных видов (*рис. 3*).

Наиболее отчетливо бывшие сельхозугодья, гари и населенные пункты отражаются областями превышения порогового значения ТИНЭ = 0,07 (*рис. 4В*), что открывает возможность для автоматизированного распознавания таких экосистем.

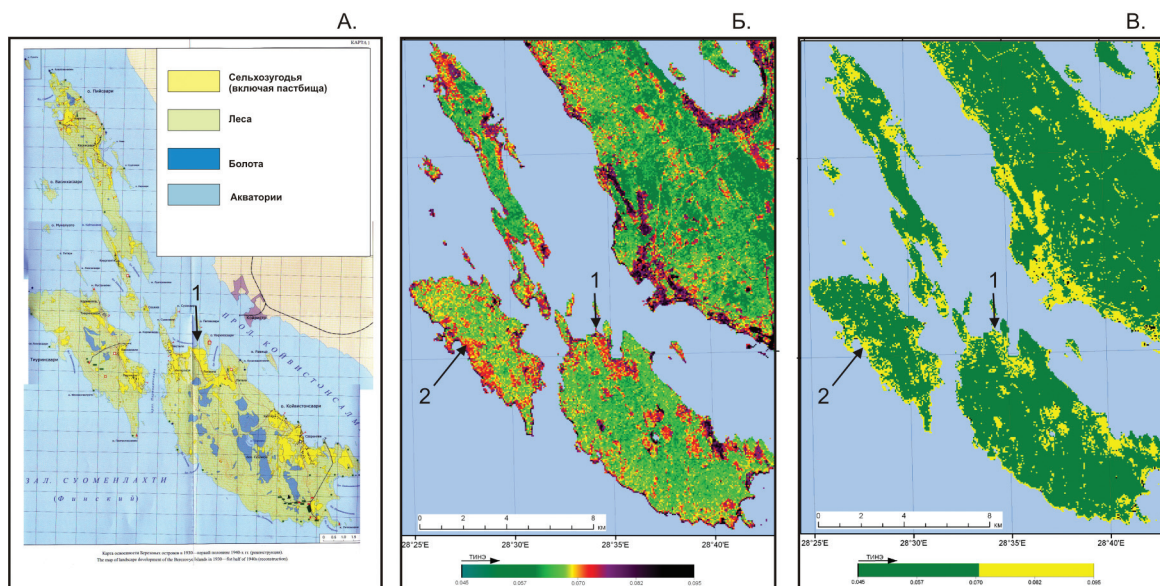


Рис. 4. Сравнение карт ТИНЭ с картой освоенности Березовых островов в первой половине 1940-х гг. А. Карта освоенности Березовых островов в первой половине 1940-х гг. Масштаб 1 : 50 000 (Природная среда..., 2007). Б. Карта ТИНЭ. В. Карта ТИНЭ с порогом 0,07. Условные обозначения: 1 – бывшие сельхозугодия; 2 – березовые молодняки после верховых пожаров, произошедших 5–10 лет тому назад (Природная среда..., 2007)

Сравнение карты современного состояния экосистем района порта в Приморске (рис. 5) с крупномасштабной картой ТИНЭ (рис. 6) и результаты расчетов средних значений ТИНЭ по каждому из выделов карты (рис. 7), показывают, что в соответствии с легендой карты (Волкова, Храпцов, 2003) слабонарушенные и средненарушенные экосистемы отличаются по средним значениям ТИНЭ от сильно нарушенных. Кроме того, сильнонарушенные пустоши и сильнонарушенные луга характеризуются повышенными средними значениями ТИНЭ по сравнению с первыми тремя экосистемами. Наибольшими средними значениями ТИНЭ характеризуются территории уничтоженных экосистем.

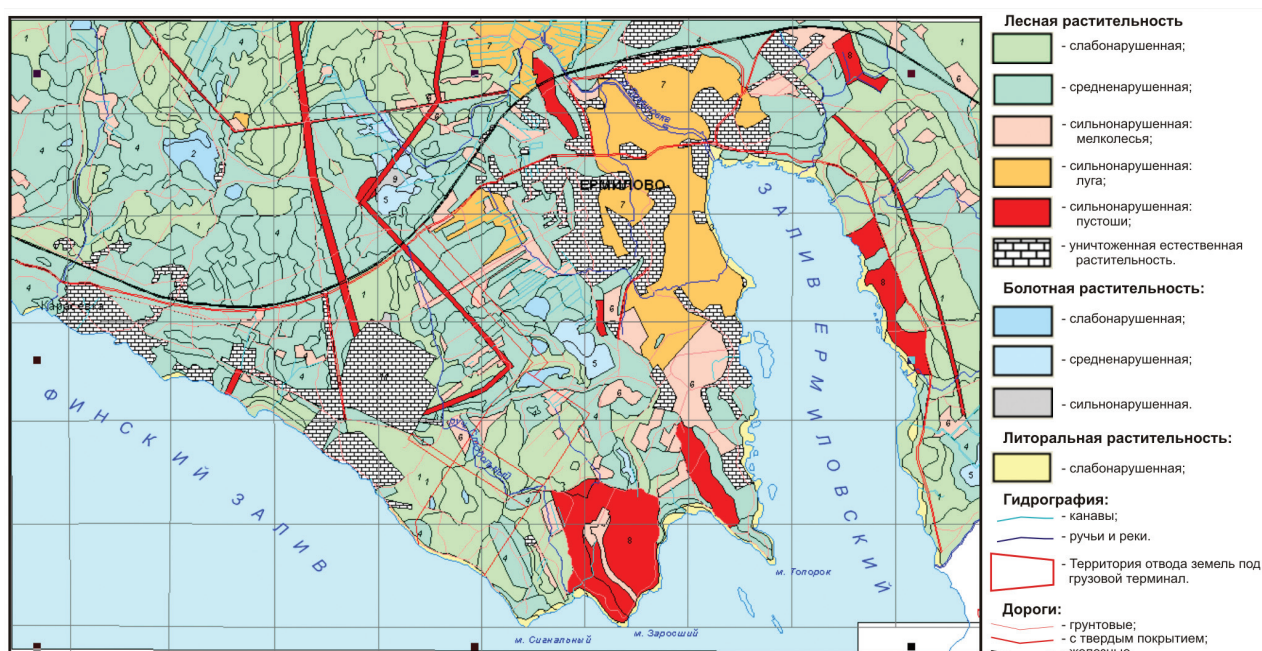


Рис. 5. Карта нарушенности экосистем прибрежной части Финского залива в районе г. Приморск (Волкова, Храпцов, 2003)

Таким образом, усредненные значения ТИНЭ различных экосистем, полученные по данным крупномасштабных карт ТИНЭ, не противоречат стандартной легенде карты современного состояния экосистем и могут быть использованы для автоматизации построения таких карт.

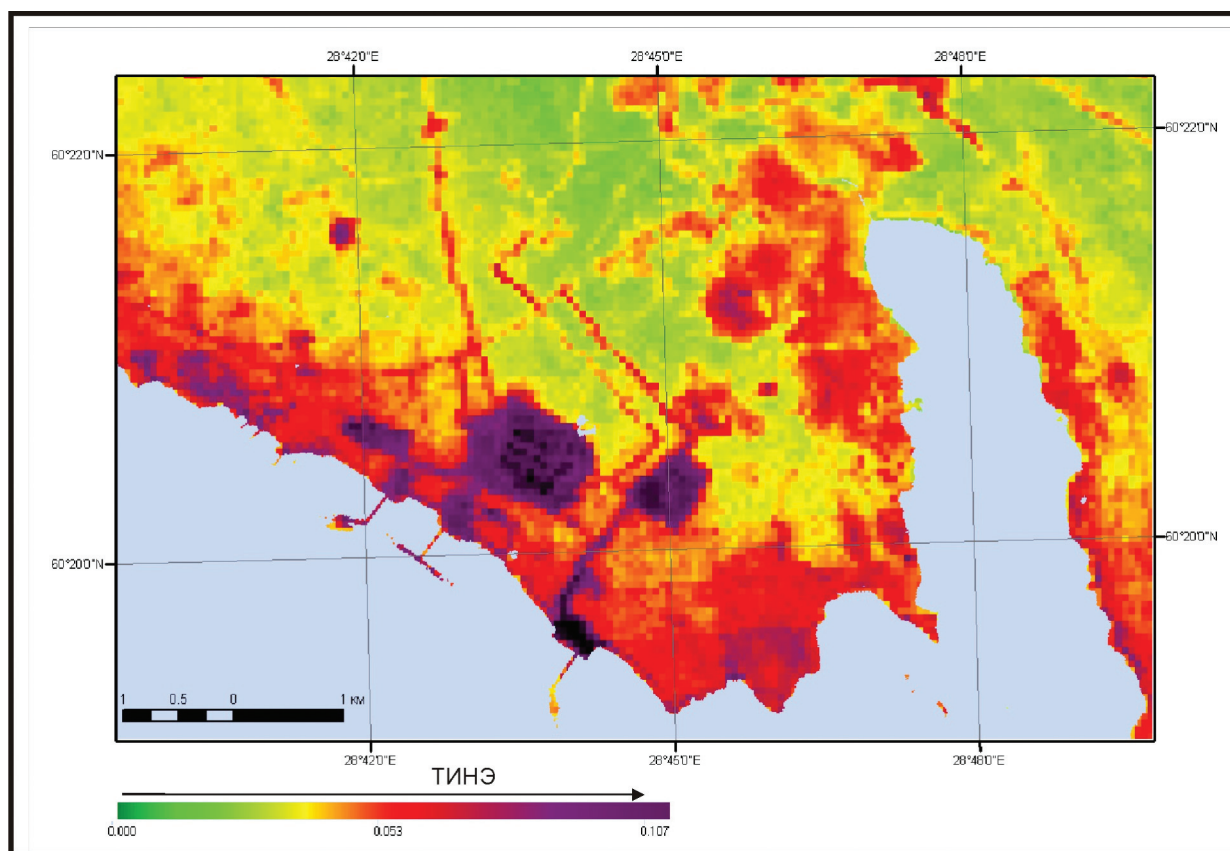


Рис. 6. Карта ТИНЭ высокого разрешения прибрежной части Финского залива в районе г. Приморск

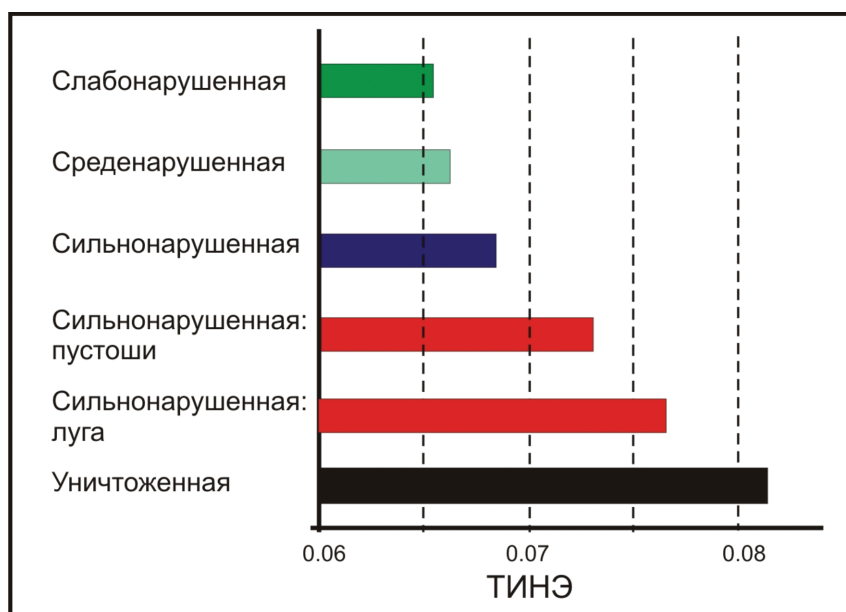


Рис. 7. Средние значения ТИНЭ для экосистем различной нарушенности, выделенных на рис. 5 для прибрежной территории Финского залива в районе г. Приморск

Далее на примере территории заказника «Березовые острова», основываясь на карте растительности (рис. 3), для площадей различных типов растительных сообществ сосновых лесов по крупномасштабной карте ТИНЭ (рис. 4Б) рассчитаны средние значения ТИНЭ и статистические характеристики распределений (табл. 3).

Таблица 3. Статистические характеристики распределений ТИНЭ для нескольких типов сосновых лесов

<i>Тип соснового леса</i>	<i>Средний ТИНЭ</i>	<i>σ Ср. кв. откл.</i>	<i>γ_1 Асимметрия</i>	<i>γ_2 Эксцесс</i>
Чернично-зеленомошный	0,049	0,007	0,60	2,25
Вересково-лишайниково-зеленомошный	0,049	0,009	1,86	5,36
Редколесье (старая вырубка)	0,054	0,010	0,39	0,91
Редколесье с фрагментированным травяным покровом (вытоптанное)	0,061	0,012	0,54	1,05
Пустошь	0,059	0,013	0,54	0,12
Грунт открытый	0,069	0,019	0,70	1,30

Анализ характеристик статистических распределений ТИНЭ (табл. 3) показывает, что различные типы сообществ сосновых лесов не могут быть автоматизированно разделены простым пороговым ограничением, так как их гистограммы в значительной степени перекрываются. Для решения этой задачи не помогает и использование среднеквадратических отклонений, асимметрии и эксцесса. Отсюда следует вывод, что для дистанционной оценки нарушенности экосистем на основе ТИНЭ необходимо использовать дополнительную информацию и на этой основе картировать типы растительных сообществ. В качестве дополнительной информации могут использоваться либо карты растительности, построенные по стандартной методике (рис. 3), либо растительности карты, построенные по материалам многоспектральной съемки высокого разрешения (см., например, (Крицук, 2012)). После чего внутри каждого типа растительных сообществ можно рассчитать средние значения ТИНЭ, которые, как показано на рис. 7, и будут количественной мерой нарушенности экосистем. Безусловно, такая технология должна включать наземную заверку предварительной карты на ключевых участках.

Выводы

1. Крупномасштабная карта ТИНЭ обладает достаточной детальностью и чувствительностью, чтобы охарактеризовать степень нарушенности экосистем в пределах выделов тематических карт масштаба 1 : 50 000.
2. Чувствительность ТИНЭ, рассчитываемого с применением материалов съемки спутником Landsat TM, позволяет выявлять нарушенные экосистемы, восстановление которых началось более 50 лет тому назад.
3. Автоматизированное построение карт нарушенности экосистем с широким применением материалов дистанционного зондирования должно включать в себя предварительное

построение границ различных типов растительных сообществ на основе дополнительной многоспектральной / гиперспектральной дистанционной информации и расчет средних значений ТИНЭ в пределах каждого выдела.

Литература

1. Волкова Е.А., Храмов В.Н. Карта современной растительности // Природная среда побережья и акватории Финского залива (район порта Приморск). СПб. 2003. С. 34–37.
2. Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И. Тепловая аэрокосмическая съемка // М.: Недра, 1993. 128 с.
3. Горный В.И., Крицук С.Г. О возможности картографирования физико-географических зон тепловой космической съемкой // ДАН. 2006. Т. 411. № 5. С. 684–686.
4. Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш. Термодинамический подход для дистанционного картографирования нарушенности экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 179–194.
7. Крицук С.Г. Картирование бореальных лесов на основе спутниковых данных (на примере ООПТ Ленинградской области) // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 255–265.
8. Природная среда и биологическое разнообразие архипелага Березовые острова (Финский залив) / Отв. ред. Н.Н. Цевелев. СПб., 2007. 368 с.
9. Gornyy V.I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh. Remote mapping of thermodynamic index of ecosystem health disturbance // Journal of Environmental Protection. 2010. No. 1. P. 242–250.
10. Jorgensen J S., Svirezhev Yu. M. Towards a thermodynamic theory for ecological systems // Oxford: Elsevier, 2004. 366 p.

Verification of large scale maps of thermodynamic index ecosystem health disturbance

V.I. Gornyy¹, S.G. Kritsuk¹, I.Sh. Latypov¹, V.N. Khramtsov²

¹ Scientific Research Centre for Ecological Safety, Russian Academy of Sciences

Saint-Petersburg, Russia

E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

² Komarov Botanical Institute, Russian Academy of Sciences

Saint-Petersburg, Russia

E-mail: vteberda@gmail.com

The technique of large scale maps of Thermodynamic Index Ecosystem Health Disturbance (TIEHD) mapping was developed. The complex results of infrared-thermal and multispectral surveys carried out by remote sensing systems based on satellites of low spatial resolution (EOS (MODIS), NOAA (AVHRR)) and high spatial resolution (Landsat TM (ETM+), Terra (ASTER)) were used for that. The preserved zone “Beriozovye Islands” (the Northern part of Russian portion of Gulf of Finland) and the territory around the new sea port Primorsk (shore of Karelian Isthmus) were chosen as test sites for the verification. These test sites were supplied by sets of detailed thematic maps of modern state of vegetation in scale 1: 50 000, as well as by retrospective map. The statistical analyses of TIEHD distribution in the frames of disturbed ecosystems was carried out. The solution that averaged TIEHD does not contradict to the standard legend of disturbed ecosystems was done. These results were the scientific bases of possibility to develop automated technique of disturbed ecosystem mapping.

Keywords: ecosystem, loading, thermodynamics, satellite, test site, mapping, large scale.