

Термодинамический подход для дистанционного картографирования нарушенности экосистем

В.И. Горный, С.Г. Крицук, И.Ш. Латыпов

Учреждение Российской академии наук Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН
197110 Санкт-Петербург, ул. Корпусная, д.18
E-mail: v.i.gornyy@ecosafety-spb.ru

Выполнен анализ методологий количественной оценки реакции экосистем (ЭС) на антропогенную нагрузку (АН). Показано, что все существующие методики такой оценки базируются на микроскопическом и макроскопическом подходах изучения окружающей действительности. Сделан вывод, что по экономическим причинам микроскопический подход, требующий детального описания множества характеристик состояния ЭС, не реализуем в практике экологического мониторинга. Сделан вывод о необходимости выполнения разработок в направлении макроскопического подхода. В рамках этого методологического направления перспективным является изучение реакции термодинамических характеристик ЭС на АН. Теоретически этот вопрос наиболее полно разработан С.Йоргенсеном и Ю.Свирежевым, которые показали, что уровень АН на ЭС измеряется темпом прироста энтропии в ЭС. Оказалось, что эти аналитические выражения без перехода на микроскопический уровень невозможно использовать для дистанционного картографирования термодинамической реакции ЭС на АН.

В связи с этим, исходя из баланса эксергии¹, поглощенного ЭС солнечного излучения выведен термодинамический индекс нарушенности экосистем (ТИНЭ), который представляет собой: $I_T = Ex_a / Ex_o$ – отношение эксергии, расходуемой ЭС на парирование АН (Ex_a) ко всей, поглощенной ЭС эксергии солнечного излучения (Ex_o). Показано, что расчет ТИНЭ может быть выполнен по результатам дистанционного картографирования скорости испарения влаги с поверхности ЭС и эксергии поглощенного ЭС солнечного излучения. Верификация методики дистанционного картографирования ТИНЭ выполнена на примере г. Карабаш, Челябинской области – района с высокой АН. Для этого использованы материалы спутников EOS и NOAA. Количественная оценка показала, что ТИНЭ вдвое чувствительнее к АН, чем вегетационный индекс.

Ключевые слова: экосистема, антропогенное воздействие, термодинамика, эксергия, энтропия, баланс, индекс, спутник, картографирование.

1. Введение

Количественная оценка нарушенности ЭС под влиянием АН одна из наиболее актуальных проблем регионального экологического мониторинга. Из экономических соображений, учитывая гигантскую территорию России, регулярный мониторинг реакции ЭС на АН целесообразно выполнять, используя спутниковые методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

К настоящему моменту сделаны многочисленные попытки разработать методику оценки уровня воздействия АН на ЭС (Weidema: www.lca-net.com/publications/older/, Handbook..., 2005). Указанные методики основаны на принципе индукции (от частного случая к общему) и используют многочисленные количественные и полукачественные индексы, характеризующие:

- циклы энергии и вещества в ЭС;

1 Эксергия – максимальная работа, которую может осуществить ЭС по отношению к окружающей среде.

- реальную и потенциальную продуктивность ЭС;
- биоразнообразие ЭС;
- культурную ценность нарушенных ЭС;
- миграцию и рассеивание видов.

В.М. Ачтен и др. (Achten et al. 2008) предложили систему критериев оценки уровня АН на ЭС, базирующуюся на влиянии структурных и функциональных факторов. Авторы этой работы предложили 22 индекса, характеризующих уровень АН на ЭС, которые должны суммироваться с соответствующими весами. Ясно, что подобная технология оценки уровня АН на ЭС не может быть использована в практике регионального экологического мониторинга в силу ее высокой трудоемкости, а, следовательно, и стоимости.

В (Jorgensen, Svirezhev, 2004; Schnider, Kay, 1994; Moran, 2004; Luval and Holbo, 1989; Jackson, 1987; Wagendorp et al., 2006) сделаны попытки оценки степени нарушенности ЭС на основе термодинамического подхода. Предложены индекс теплового отклика (the thermal response number) ITRN и индекс диссиляции эксергии солнечной радиации (the solar exergy dissipation) ISED в виде (Luval and Holbo, 1989):

$$I_{TRN} = \sum_{\tau_1}^{\tau_2} [R_n \times \Delta\tau] / \Delta T \quad (1)$$

где: R_n – баланс приходящей на земную поверхность радиации; $\Delta\tau = (\tau_2 - \tau_1)$ – интервал времени между двумя последующими дистанционными съемками; ΔT – изменение температуры дневной поверхности T_s в промежуток времени между моментами времени τ_1 и τ_2 .

$$I_{SED} = R_n / K^* \quad (2)$$

где: K – баланс коротковолновой радиации.

I_{SED} – есть доля всей, приходящей на дневную поверхность радиации, которая превращается в низкокачественную (с низким содержанием эксергии) энергию – тепло. Дж.С.Лювалль и Ч.Р.Холбо построили карты I_{TRN} и I_{SED} по результатам многоспектральной и тепловой аэросъемки многоканальным тепловым инфракрасным сканером (Thermal Infrared Multichannel Scanner (TIMS)) (Luval and Holbo, 1989).

Анализ индексов (1) и (2) показал следующие их недостатки:

- индексы не выведены из базовых законов сохранения, а предложены эмпирически;
- I_{TRN} – паллиатив тепловой инерции (ТИ) (Watson et al., 1971; Горный и др., 1993; Xue and Cracknell, 1995; Cracknell and Xue, 1996; Горный, Крицук, 2006).

ТИ – есть свойство поверхности к сопротивлению периодическому нагреву и остыванию. В отличии от I_{SED} , ТИ, являясь физически свойством, и поэтому в отличии от I_{TRN} не зависит от времени наблюдения и метеорологических условий в моменты съемки.

Наилучшим достижением макроскопического подхода на сегодняшний день следует считать монографию С. Йоргенсена и Ю. Свирежева (S. Jorgensen and Yu. Svirezhev), посвященную термодинамической теории ЭС (Jorgensen, Svirezhev, 2004). Эти авторы показали, что интегральной термодинамической мерой АН на ЭС является σ_τ – скорость производства энтропии в ЭС:

$$\sigma_\tau = [S(\tau_o + \tau) - S(\tau_o)] = [\hat{W}_f + \hat{W}_{ch} + \langle P \rangle \Delta\tau - P_o \Delta\tau] / T; \quad (3)$$

где: S – энтропия ЭС; \hat{W}_f – полная энергетическая нагрузка на ЭС; \hat{W}_{ch} – полная химическая нагрузка на ЭС; P – удельная продуктивность ЭС, измеряемая массой углерода на единицу площади в течение года ($g\ Carbon/m^2/yr$). $\langle P \rangle$ – средняя удельная продуктивность ЭС есть удельная продуктивность ЭС, осредненная на интервале времени $\Delta\tau$; P_0 – первоначальная удельная продуктивность ЭС в момент времени: τ_o , когда АН начала действовать; T – абсолютная температура ЭС (предполагается постоянной на интервале времени $\Delta\tau$); $\Delta\tau = \tau - \tau_o$; τ – текущий момент времени.

Анализ уравнения (3) показывает, что дистанционное измерение возможно для $\hat{W}_f, \langle P \rangle, P_0, T$. В то же время, из-за большого количества неопределенностей химическую нагрузку (\hat{W}_{ch}) в настоящее время измерить дистанционно чрезвычайно сложно и, соответственно, невозможно непосредственно использовать уравнение (3). Таким образом, основной целью настоящей статьи является разработка ТИНЭ, который мог бы дистанционно картографироваться на основе макроскопического термодинамического подхода.

2. Основные соотношения

В соответствие с основными положениями термодинамики ЭС (Jorgensen, Svirezhev, 2004; Schnider, Kay, 1994; Wagendorp et al., 2006) будем считать, что ЭС и окружающая среда формируют суперсистему и окружающая среда значительно больше, чем ЭС. В соответствии с уравнением (3) АН проявляется в возрастании энтропии ЭС. Этот момент является ключевым для понимания термодинамического подхода к оценке воздействия АН на ЭС.

Прежде чем начать рассмотрение возможных методик дистанционной оценки АН на ЭС необходимо отметить некоторые важные положения термодинамики ЭС. В (Jorgensen, Svirezhev, 2004) отмечено, что в ЭС потеря эксергии и производство энтропии являются двумя различными описаниями одного и того же процесса. Ю.М.Свирежевым введено важное для понимания существования ЭС понятие «энтропийного насоса». Это понятие предполагает, что «энтропийный насос» удаляет из ЭС энтропию, которая производится в ЭС при расходовании эксергии, поглощенной ЭС солнечной радиации. В результате в ЭС энтропия не накапливается и ЭС не деградирует из-за избытка энтропии (Jorgensen, Svirezhev, 2004).

Чтобы оценить степень деградации ЭС под воздействием АН в след за Йоргенсеном и Свирежевым (Jorgensen, Svirezhev, 2004) предположим, что ЭС находится в состоянии динамического равновесия с окружающей средой, т.е. годовой баланс энтропии в ЭС равен нулю². Из этого следует:

$$P_0 - \langle P \rangle = (\hat{W}_f + \hat{W}_{ch}) / \Delta\tau \quad (4)$$

Важным следствием выражения (4) является то, что под действием АН изменяется продуктивность ЭС. Иными словами ЭС может снижать (или повышать в случае применения агротехники) продуктивность. Это означает, что эксергия поглощенной ЭС солнечной радиации затрачивается на:

² Это означает, что ЭС не сильно выведена из состояния устойчивого равновесия под влиянием АН, т.е. количество эксергии, поглощенной ЭС солнечной радиации достаточно для удаления энтропии, которая вырабатывается в ЭС под воздействием АН.

- удаление из ЭС энтропии, стандартно производящейся в процессе жизнедеятельности ЭС (в противном случае в ЭС будет иметь место деградация биомассы);

- вывод из ЭС дополнительной энтропии, которая возникает в ЭС под действием АН.

Таким образом, в результате воздействия АН снижается продуктивность ЭС. Если продуктивность биомассы в ЭС под воздействием АН становится нулевой, дальнейшее повышение АН проявляется уже в деградации биомассы ЭС.

Принимая во внимание вышеприведенные соображения, баланс эксергии в ЭС может быть представлен в виде:

$$Ex_o = Ex_c + Ex_e + Ex_a, \quad (5)$$

где Ex_o – плотность эксергии поглощенной ЭС солнечной радиации, Bm/m^2 ; Ex_c – эксергия, затраченная ЭС на депонирование углерода (создание новой биомассы), Bm/m^2 ; Ex_e – эксергия, затраченная на стандартный вывод из ЭС энтропии, производящейся в процессе жизненного цикла уже существующей биомассой Bm/m^2 ; Ex_a – эксергия, затрачиваемая ЭС на парирование воздействия АН, Bm/m^2 .

Уравнение (5) показывает, что эксергия, поглощенной ЭС солнечной радиации, расходуется на удаление энтропии из биомассы («энтропийный насос»), депонирование углерода в биомассе, парирование АН.

Далее, следуя (Jorgensen, Svirezhev, 2004), используем понятие референсной (фоновой) ЭС, т.е. такой ЭС, которая не подвергалась воздействию АН (в реальности такие ЭС наблюдаются только в пределах особо охраняемых территорий). После чего, для референсной (фоновой) ЭС исходя из уравнения (5) баланс эксергии может быть представлен в виде:

$$Ex_o^b = Ex_c^b + Ex_e^b, \quad (6)$$

где индекс “*b*” обозначает фоновую ЭС.

После вычитания выражения (5) из выражения (6) получаем:

$$Ex_a = \Delta Ex_c + \Delta Ex_e - \Delta Ex_o, \quad (7)$$

где: $\Delta Ex_o = Ex_o^b - Ex_o$; $\Delta Ex_c = Ex_c^b - Ex_c$; $\Delta Ex_e = Ex_e^b - Ex_e$.

Из предположения о том, что ЭС незначительно выведена из состояния устойчивого равновесия, следует, что ΔEx_o и ΔEx_e являются малыми величинами по сравнению с остальными членами уравнения (7). Предположение $\Delta Ex_o = 0$ справедливо, если ЭС, подвергшаяся АН не потеряла биомассу, а, следовательно, ее фотосинтетическая способность не снизилась. В этом же случае справедливо и утверждение $\Delta Ex_e = 0$, которое говорит о том, что не изменилось и количество энтропии стандартно выводимой из ЭС.

Далее, предположим, что ЭС парирует АН путем дополнительного расходования эксергии на вывод энтропии, возникшей в ЭС из-за воздействия АН. В нормальном состоянии эта часть эксергии расходуется на депонирование углерода в ЭС. Таким образом, в результате воздействия АН в ЭС снижается количество депонируемого в ЭС углерода (уменьшается темп прироста биомассы). Это является ключевым моментом для создания ТИНЭ, которое приводит к заключению, что если АН возрастает, то ΔEx_c , также, увеличивается. Поэтому ΔEx_c может являться количественной мерой реакции ЭС на воздействие АН.

Отсюда ТИНЭ – I_T может быть записан как (Gornyy et al., 2010):

$$I_T = Ex_a / Ex_0 \approx \Delta Ex_c / Ex_0 \quad (8)$$

Как следует из уравнения (8) ТИНЭ есть доля (Ex_a) эксергии поглощенной ЭС солнечной радиации (Ex_0), расходуемая на парирование воздействия АН. Правая часть уравнения (8) позволяет рассчитать ТИНЭ по данным дистанционных (авиационных или спутниковых) измерений.

В соответствии с уравнением (8) для фоновой ЭС $I_T = 0$, т.к. фоновая ЭС не подвергалась воздействию АН ($Ex_a = 0$). В нарушенной (подвергшейся воздействию АН) ЭС: $1 > I_T > 0$.

Таким образом, ТИНЭ отражает уровень нарушенности ЭС в результате воздействия на нее АН³.

Подводя итог теоретическим исследованиям необходимо еще раз подчеркнуть следующие преимущества ТИНЭ:

- в отличии от вышеприведенных индексов (см. уравнения (1) и (2)), которые были предложены эмпирически, ТИНЭ выведен исходя из базовых законов сохранения (см. уравнение (5));
- для построения карт ТИНЭ по материалам спутниковых съемок необходимо разработать методику дистанционного картографирования скорости депонирования углерода в ЭС и Ex_0 .

3. Материалы и методы

3.1. Тестовый полигон

Уральский тестовый полигон (УТП) расположен в юго-восточной части Урала. На его территории была апробирована методика дистанционного картографирования ТИНЭ (рис. 1).

Климат УТП континентальный. Зима продолжительная. Лето относительно короткое и теплое. В пределах УТП отмечают три физико-географические зоны: – зона тайги (западная часть УТП); – южная подзона Западно-Сибирской лесо-степи; – зона степей (восточная часть УТП) (Левит, 2005).

В пределах УТП различают две основные геоморфологические единицы: – Транс-Уральский пенеплен (западная часть УТП); – Западно-Сибирскую низменность (Восточная часть УТП).

УТП расположен в пределах одного из старейших промышленных регионов России с большим количеством металлургических, металлообрабатывающих, машиностроительных и химических предприятий. Наиболее значительными промышленными центрами являются города Челябинск, Карабаш, Копейск, Миасс, Златоуст (см. рис. 1).

Главными требованиями к выбору тестового полигона для апробации дистанционной методики картографирования ТИНЭ были следующие: – наличие полного диапазона (от минимума до максимума) АН на ЭС; – ЭС тестового полигона должна быть достаточно однородна, а источник АН должен быть близок к точечному по форме.

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

Этим требованиям отвечает г. Карабаш, расположенный в центре УТП (рис. 1) в пределах горной тайги, в которой основными видами являются ель, пихта, и смесь сосны, рябины и можжевельника. Почва УТП представлена подзолом. Основное направление ветра – широтное. Город расположен во впадине.

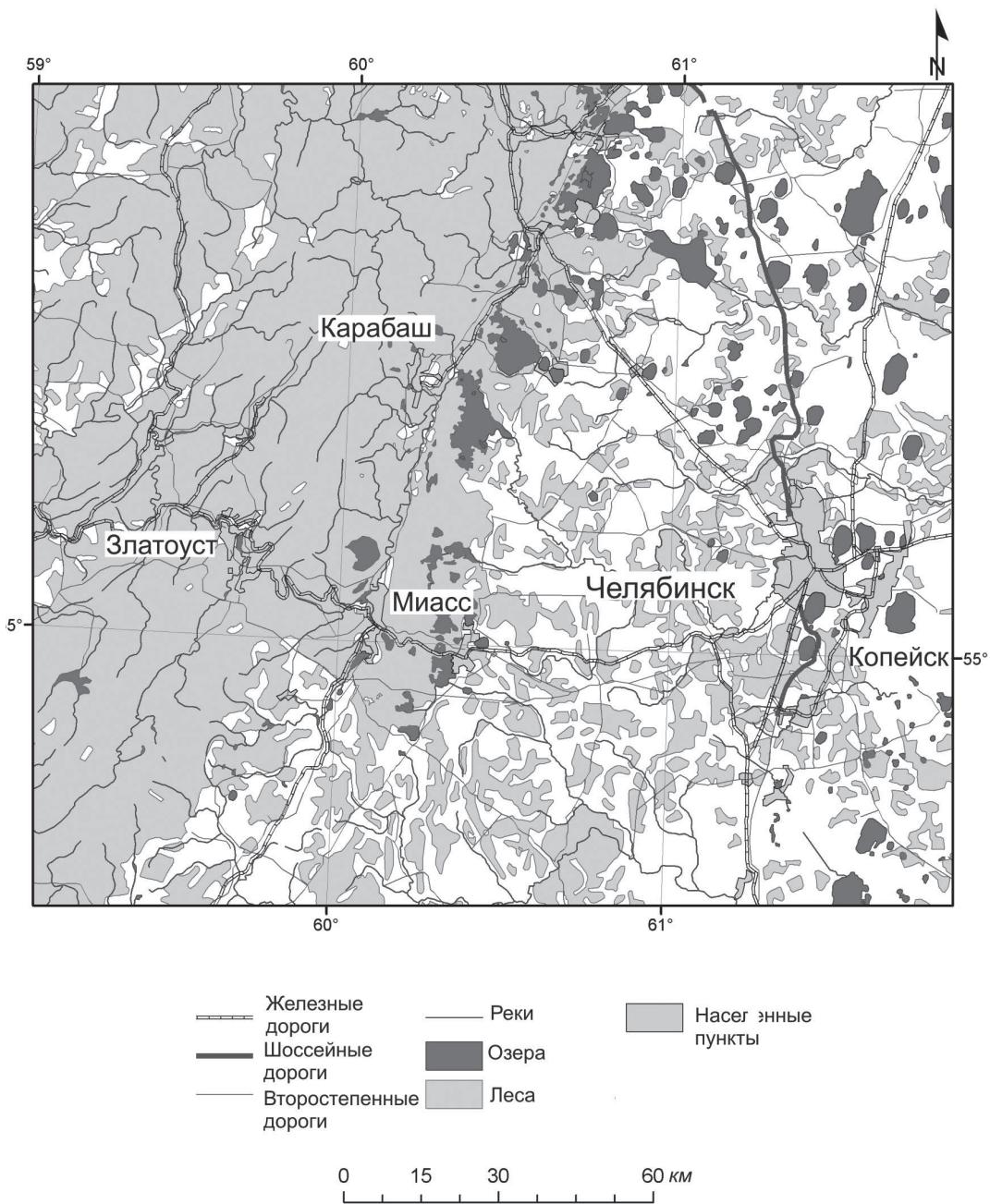


Рис. 1. Схематическая карта УТП

Медеплавильный завод в г. Карабаш основан в начале 19 века. За все время существования металлургического производства в атмосферу было выброшено 12 миллионов тонн поллютантов. В результате, к концу 20-го века ЭС вокруг г. Карабаш испытала чрезвычайно высокую АН. Это наглядно иллюстрируется картой нормализованного дифференциального вегетационного индекса НДВИ – (см. рис. 5). В результате г. Карабаш окружен обширной территорией с мертвой растительностью.

3.2. Материалы

Для расчетов (см. (9)) использовались материалы спутника Terra(MODIS) (Табл. 1).

Таблица 1. Материалы съемок спутником Terra/Aqua(MODIS) и NOAA(AVHRR), использованные для подготовки карт

Дата	Время GMT, чч:мин:сс	Спутник	Сканер	Каналы
4 июня 2009 г.	07:00:00	NOAA-18	AVHRR	4,5
	07:00:00	Terra	MODIS	1-7,31,32
	08:50:00	Aqua	MODIS	1-7,31,32
	15:23:00	NOAA-17	AVHRR	4,5
	18:15:00	Terra	MODIS	31,32
	22:00:00	Aqua	MODIS	31,32
5 июня 2009 г.	01:31:00	NOAA-15	AVHRR	4,5
	05:35:00	NOAA-17	AVHRR	4,5
	07:45:00	Terra	MODIS	1,2,31,32
	07:55:00	Aqua	MODIS	1,2,31,32
	21:25:00	Aqua	MODIS	31,32

3.3. Карта среднесуточной Ex_o

Ex_o может быть рассчитана с применением методики, изложенной в (Jorgensen J S., Svirezhev, 2004):

$$Ex_o = \int_{\Omega} Q^{out}(\nu) \ln[Q^{out}(\nu) / Q^{in}(\nu)] d\nu + R = \\ R[1 + \bar{\alpha}(Ku + \ln \bar{\alpha} - 1) / (1 - \bar{\alpha})]; \quad (9)$$

Где: Q^{out} , Q^{in} мгновенные значения соответственно уходящая и падающая плотности потока солнечной радиации, W/m^2 ; ν – спектральная частота излучения; Ω – измеряемый спектральный интервал; $K = \sum^n p_i \log(p_i / p_i^0)$ – мера (расстояние) Кульбака; p_i^0, p_i – вероятности (степени свободы), соответственно, до и после взаимодействия излучения с растительностью; R – радиационный баланс на поверхности ЭС, W/m^2 ; $\bar{\alpha} = Q^{out} / Q^{in}$ – альбедо поверхности.

Для материалов спутника Terra (MODIS) альбедо поверхности может быть рассчитано, используя стандартный продукт спектрорадиометра MODIS уровня 1B, характеристики которого приведены в (<http://mcst.gsfc.nasa.gov/uploads/files/documents/M1058.pdf>).

В связи с тем, что для расчета ТИНЭ (см. (8)) используется среднесуточная скорость испарения влаги с поверхности ЭС, соответственно, было рассчитано среднесуточное значение эксергии, поглощенной растительностью солнечной радиации: \hat{Ex}_o . Расчет \hat{Ex}_o был выполнен путем введения поправочного коэффициента, который определялся для момента съемки как отношение мгновенных значений плотностей потоков эксергии и солнечной радиации. После чего этот коэффициент применялся к среднесуточному значению плотности потока солнечной радиации, поглощенной растительностью, которая в нашем случае рассчитывалась по формуле Т.Г.Берлянд (Берлянд, 1961).

Результат картографирования \hat{Ex}_o в пределах УТП приведен на рис. 2.

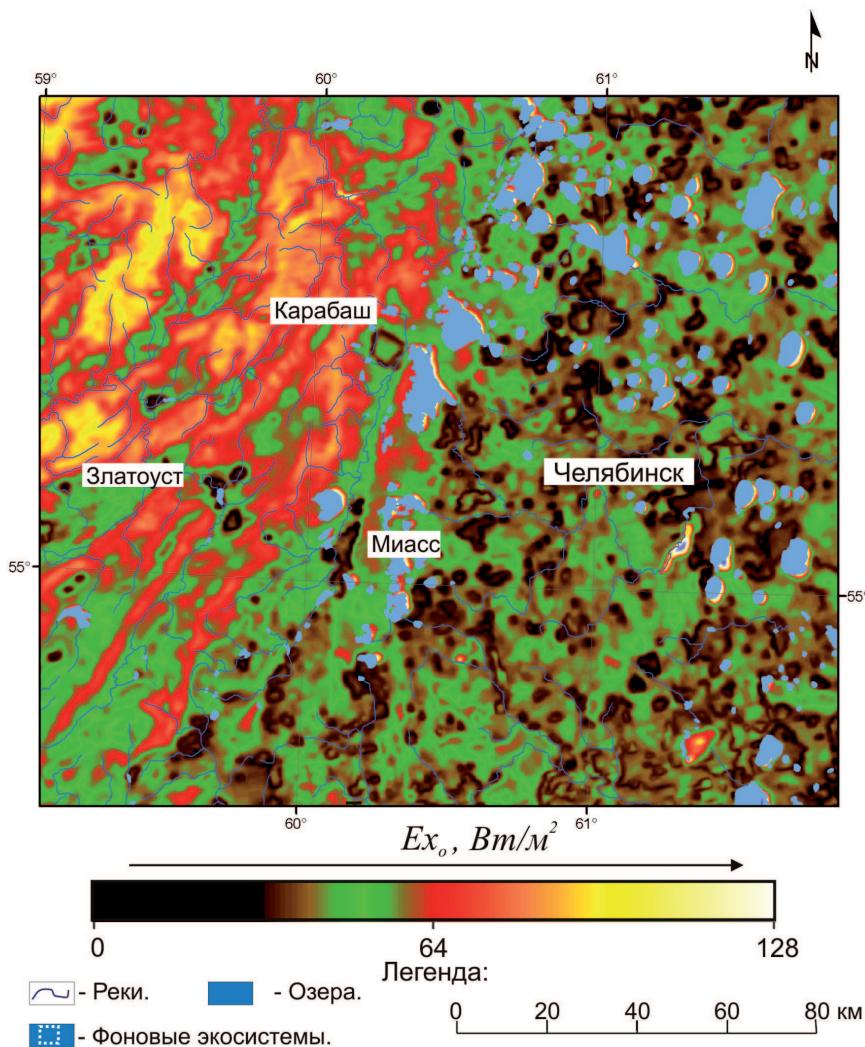


Рис. 2. Карта $\hat{E}x_o$, составленная для УТП по данным съемки спутниками Terra(MODIS) и NOAA(AVHRR)

3.4. Карта скорости депонирования углерода в ЭС

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

$$\hat{E}x_c = a \times b \times \bar{E} = 3.66 \times \bar{E}; \quad (10)$$

где: \bar{E} – удельная среднесуточная скорость испарения влаги с поверхности ЭС, $m^3/(m^2 \cdot c)$; $a=1/879$, $(kg\text{ углерода})/(m^3 H_2O)$, 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)).

Метод, использованный нами для дистанционного картографирования \bar{E} основан на теплоинерционном (ТИ) подходе (рис. 3). Этот подход предусматривает применение математической модели суточного хода температуры земной поверхности T_s , учитывающей все основные факторы, определяющие тепловой режим поверхности. Наша модель (Горный и

др., 1993; Горный, Крицук, 2006) построена на следующих предположениях: – метеорологические условия и концентрации оптически активных газов в атмосфере неизменны в пределах всей исследуемой территории; – коэффициент излучения, альbedo земной поверхности и ТИ неизменны во времени в интервале времени, в котором выполнялась спутниковая съемка. Для картографирования \bar{E} , использовались цифровые материалы съемки спутниками Terra/Aqua(MODIS), NOAA(AVHRR) (см. Табл. 1), полученные каналами видимого, ближнего инфракрасного и инфракрасного-теплового диапазонов спектра электромагнитных волн. Спутниковые материалы отобраны для нескольких дней устойчивой безоблачной погоды. Дополнительно, для подстановки в математическую модель T_s использовались следующие результаты срочных метеорологических наблюдений:

- суммарная падающая солнечная радиация.
- температура и влажность воздуха, скорость ветра на высоте 2 м над земной поверхностью.
- атмосферное давление.
- облачность.

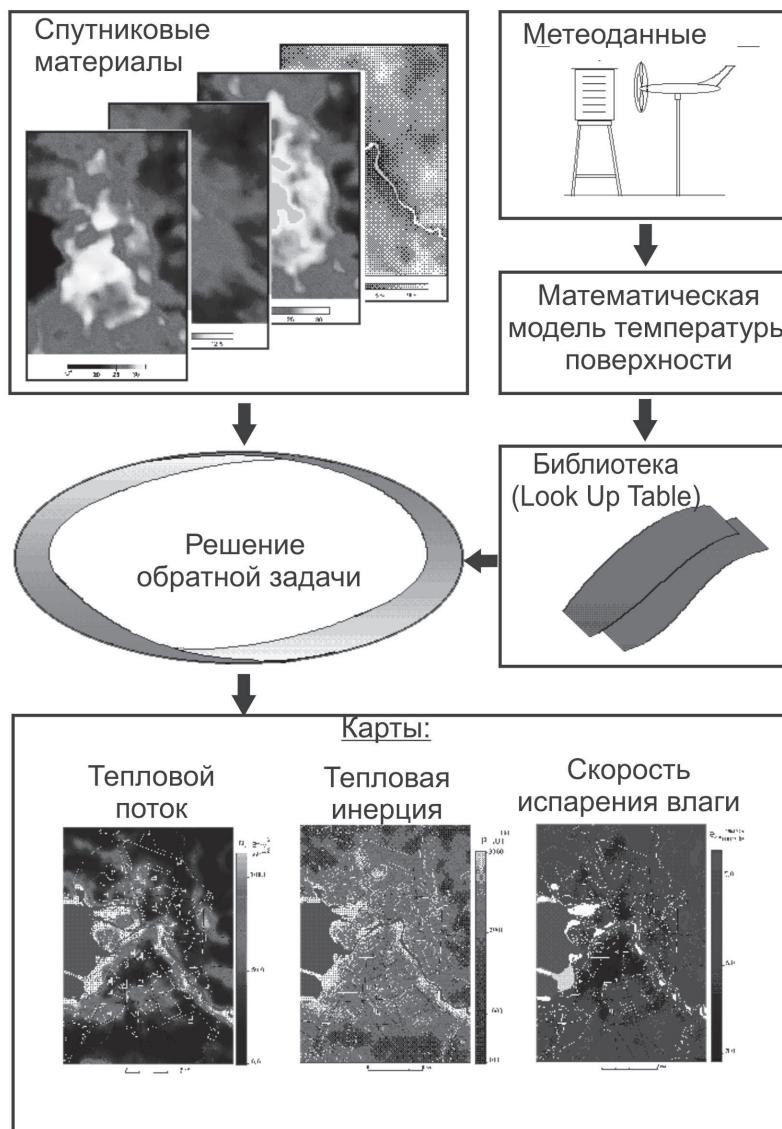


Рис. 3. Алгоритм картографирования ТИ, среднесуточной скорости испарения \bar{E} и теплового потока по данным дистанционных съемок и наземных метеонаблюдений

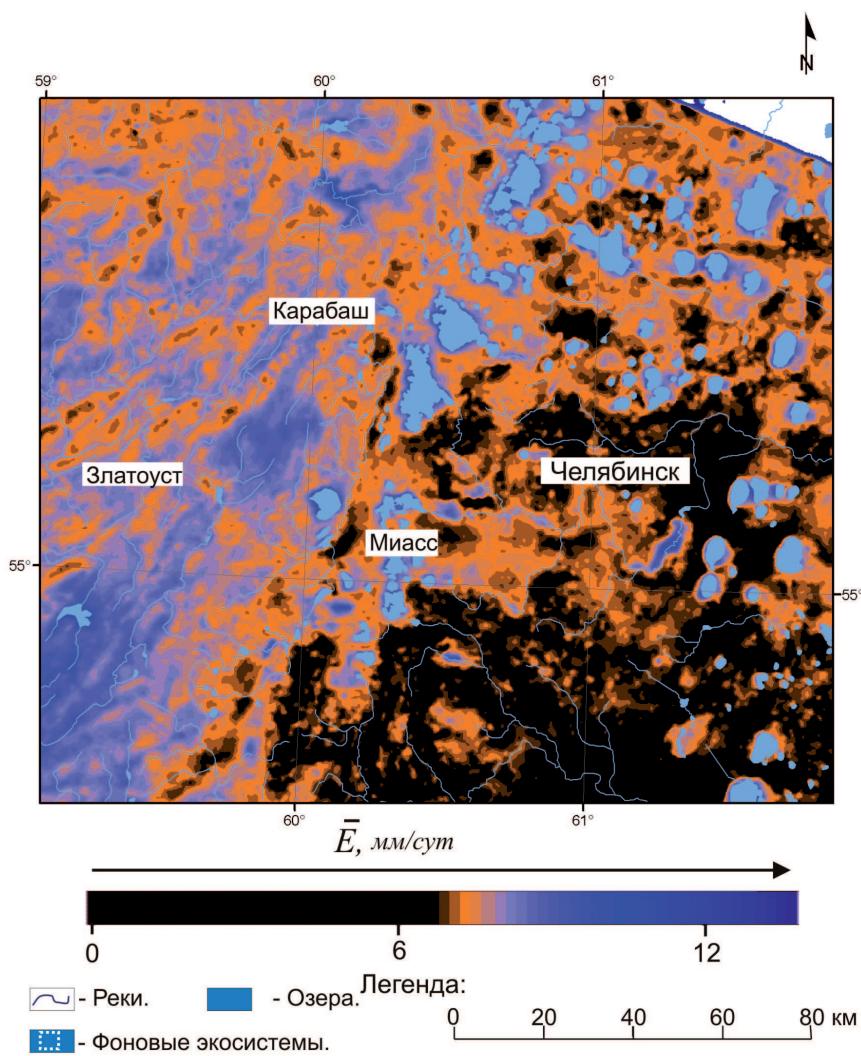


Рис. 4. Карта \bar{E} , составленная для УТП по данным съемки спутниками Terra(MODIS) и NOAA(AVHRR)

Для решения обратной задачи вслед за Дж. С. Прайсом (Price, 1982) использован метод обращения таблиц (look-up table method). Математическое моделирование T_s выполнялось для всех возможных комбинаций ТИ, \bar{E} , теплового потока и альбедо поверхности. После чего, для каждого пикселя измеренные значения T_s сравнивались с модельными. Далее, в соответствии с выбранными критериями согласия измеренных и модельных температур выбирались значения \bar{E} . Систематическая ошибка использованного алгоритма (рис. 3) при определении \bar{E} составила $0.3 \text{ мм } H_2O / (\text{м}^2 * \text{сум})$, а среднеквадратическая ошибка: $0.1 \text{ мм } H_2O / (\text{м}^2 * \text{сум})$.

Анализ пространственного распределения \bar{E} (рис. 4) подчеркивает вышеотмеченные различия ЭС между Западной и Восточной частями УТП. На Западе УТП отмечаются более высокие значения \bar{E} , чем в пределах восточной части УТП. После этого, в соответствии с (8) был выполнен расчет \hat{E}_c .

В заключение необходимо подчеркнуть, что алгоритм, основанный на теплоинерционном подходе, был использован потому, что он позволяет дистанционно картографировать \bar{E} – среднесуточную удельную скорость испарения влаги с поверхности ЭС. В настоящее время наилучшее геометрическое разрешение на местности, с которым возможно выполнение мно-

гократных съемок спутниковыми системами инфракрасного-теплового диапазона, составляет ~ 1 км. Поэтому теплоинерционный подход не может быть пока реализован для тепловых материалов высокого геометрического разрешения на местности, полученных спутниками Landsat TM (ETM+) и/или ASTER. В этом случае целесообразно воспользоваться методикой, изложенной в работах (Thunnissen and Nieuwenhuis, 1990; Vidal and Perrier, 1989), допускающей картографирование скорости испарения влаги с поверхности по результатам однократной тепловизионной съемки. Но при использовании материалов однократной съемки необходимо понимать, что полученные результаты отражают не среднесуточную скорость испарения, а мгновенное ее значение, справедливое только на момент съемки.

Далее, исходя из уравнения (8) с использованием карт \hat{E}_{x_c} и \hat{E}_{x_o} была построена карта ТИНЭ.

Граница западной и восточной частей УТП (рис. 6) проведена на основе визуального дешифрирования спутниковых материалов. Для более надежного построения границ ЭС целесообразно применять безэталонную классификацию спутниковых материалов. В пределах западной и восточной частей УТП были выделены участки фоновых (ненарушенных) ЭС (показаны точечной белой линией на рис. 6) как области с максимальной для каждой ЭС скоростью испарения \bar{E} . Расчет ТИНЭ относительно фонового (ненарушенного) участка выполнен для каждой части УТП, раздельно.

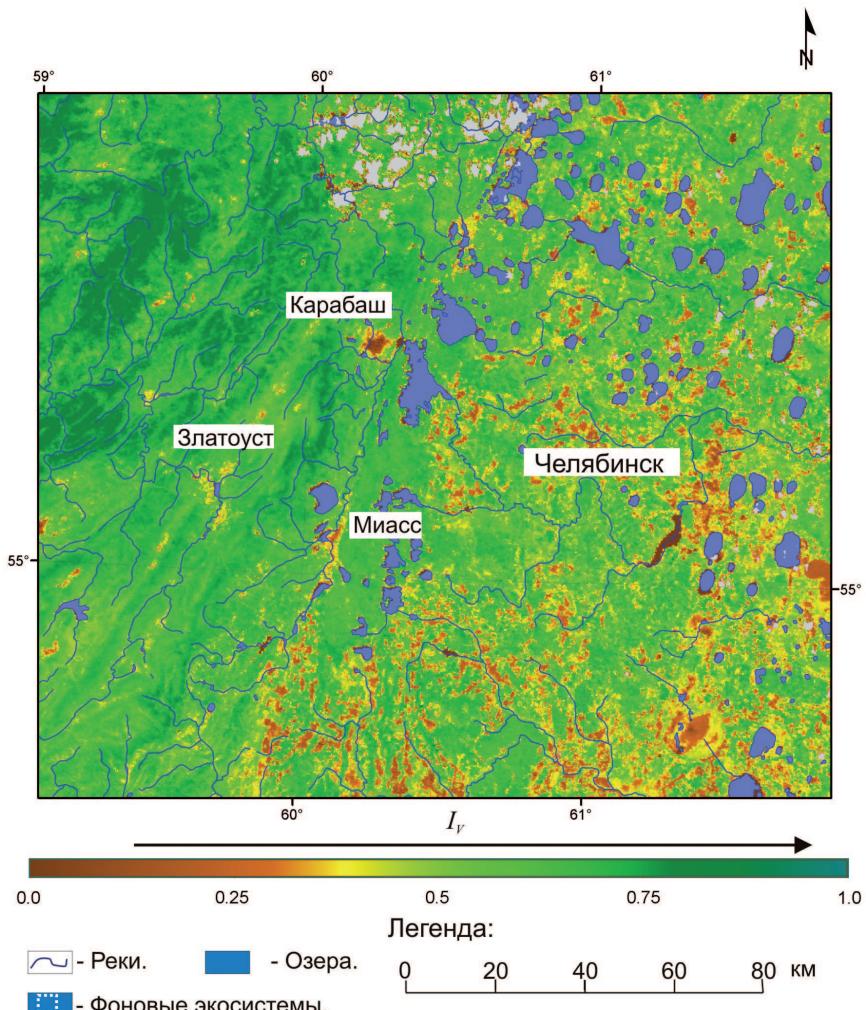


Рис. 5. Карта вегетационного индекса (NDVI), построенная для территории УТП по данным съемки со спутника Terra(MODIS) (4 июня 2009 г.)

4. Результаты и обсуждение

Результаты дистанционного картографирования ТИНЭ приведены на рис. 6.

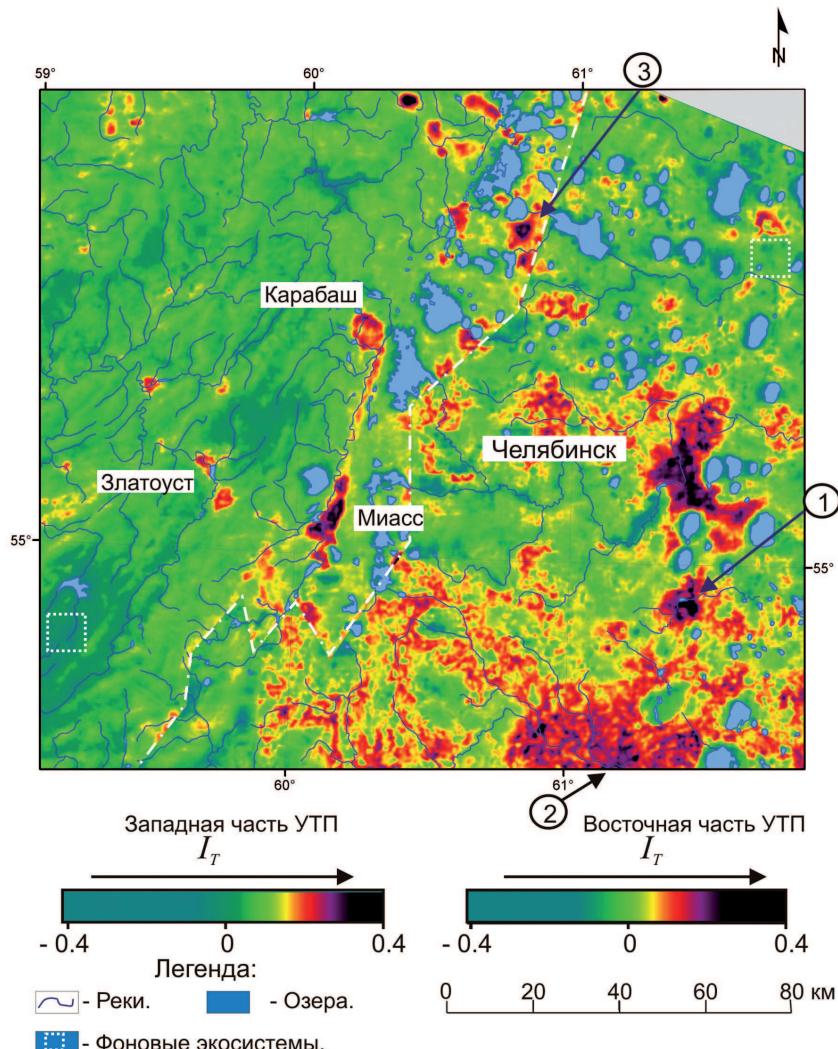


Рис. 6. Карта ТИНЭ, составленная для территории УТП по данным спутниковым съемок. Белой пунктирной линией показана граница западной и восточной частей УТП. 1. Буруогольный разрез Коркино. 2. Местоположение Южно-Уральской и Троицкой ГРЭС. 3. Химкомбинат «Маяк»

Визуальный анализ набора построенных карт (рис. 1, рис 5 и рис. 6,) позволяет отметить:

- селитебные территории и промышленные зоны характеризуются высокими значениями ТИНЭ, достигающими $I_T=0.4$.
- площади с высокими значениями ТИНЭ, включающие селитебные территории и промышленные зоны, превышают по площади понижения НДВИ на этих же территориях.

Кроме визуального анализа для ЭС вокруг г. Карабаш было выполнено количественное сравнение чувствительности ТИНЭ и НДВИ к воздействию АН. Для этого акватории и облачность маскировались на картах ТИНЭ и НДВИ. После чего, были рассчитаны и построены в виде графиков (см. рис. 7) следующие индексы: – нормализованный на максимум ТИНЭ: $(I_T) / [(I_T)_{\max}]$; – нормализованный на максимум дополнительный НДВИ: $(1-I_V) / [(1-I_V)_{\max}]$. Эти индексы были усреднены в пределах каждой западной полуокружно-

сти с центром в г. Карабаш. В результате, на рис. 7 наглядно видно, что нормализованный ТИНЭ изменяется от $I_T^n = 1.0$ при радиусе $R \approx 2$ км от центра г. Карабаш до $I_T^n = 0.4$ при радиусе $R = 11$ км от центра г. Карабаш. В то же время, нормализованный дополнительный вегетационный индекс НДВИ имеет максимум ($I_{Vd}^n = 1.0$) точно в центре г. Карабаш и минимум ($I_{Vd}^n = 0.36$) при расстоянии от центра г. Карабаш $R \approx 12$ км.

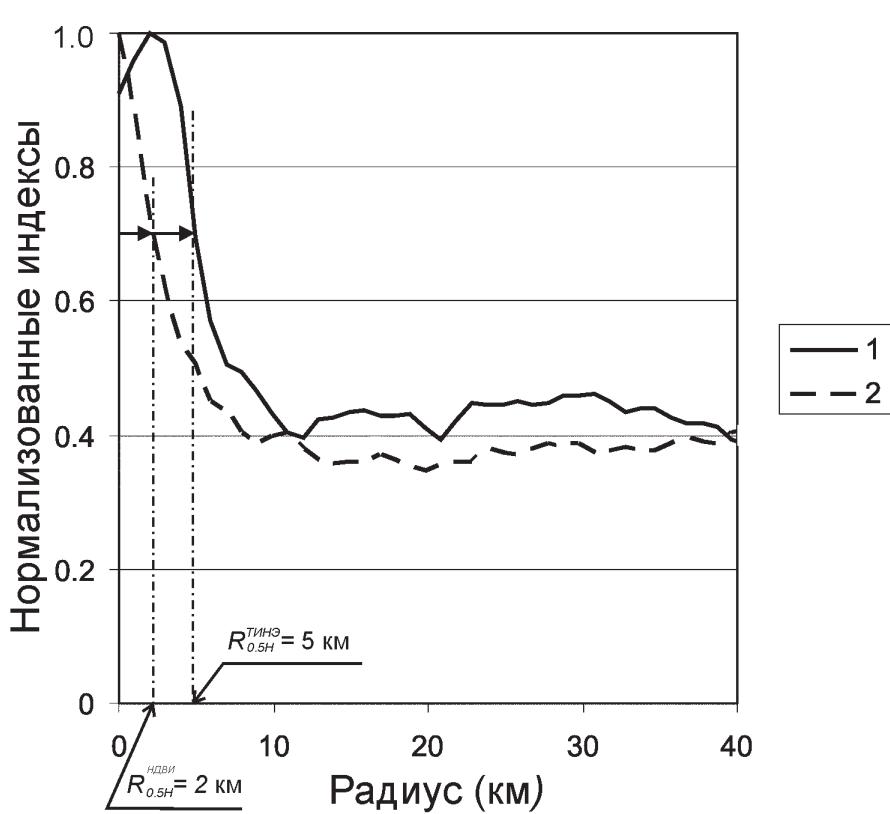


Рис. 7. Сравнение чувствительности к воздействию АН нормализованного ТИНЭ и нормализованного дополнительного NDVI (на примере г. Карабаш на территории УТИ).

1. Нормализованный ТИНЭ: $(I_T) / [(I_T)_{\max}]$. 2. Нормализованный дополнительный NDVI: $(1-I_V) / [(1-I_V)_{\max}]$

Примем ширину пиков индексов на их полувысоте в качестве меры чувствительности индекса к воздействию АН, т.е. более широкий пик отражает более высокую чувствительность индекса к АН. Тогда, для г. Карабаш ширина пика на полувысоте нормализованного ТИНЭ равна 10 км (рис.7), а для нормализованного дополнительного НДВИ эта ширина равна только 4 км (рис. 7). Это позволяет утверждать, что чувствительность ТИНЭ к воздействию АН в 2.5 раза выше, чем для вегетационного индекса НДВИ.

Более высокая чувствительность ТИНЭ к воздействию АН на ЭС может быть объяснена следующими соображениями. ТИНЭ отражает изменение физиологических характеристик растительности (как активность и качество фотосинтеза, так и транспирацию влаги растительным покровом). В то же время, вегетационный индекс характеризует наличие в ЭС хлорофилла. Снижение вегетационного индекса отражает глубокую деградацию (потерю) биомассы в ЭС, в результате которой растительность ЭС теряет хлорофилл (вырубки лесов, лесные и степные пожары, гибель растительности под действием кислотных дождей, как это произошло в окрестностях г. Карабаш и т.п.).

Сравнение пространственного распределения ТИНЭ между западной и восточной частями УТП (см. рис. 6) показывает существенное различие. Восточная часть УТП характеризуется высокими значениями ТИНЭ. Этот факт может быть объяснен как различиями в типах ЭС в западной и восточной частях УТП, так и различным уровнем АН на ЭС. Как следует из карты УТП (рис. 1) западная часть территории покрыта лесами, а восточная часть УТП представлена, в основном, сельскохозяйственными угодьями. Карта ТИНЭ составлена по материалам спутниковых съемок, полученным в начале лета. Для агроклиматической зоны УТП это время начала вегетационного периода с отсутствием растительности на свежевспаханных полях. В результате в это время года имеются обширные площади открытой почвы, у которых скорость испарения влаги значительно меньше, чем у территорий покрытых лесом. Поэтому ТИНЭ вспаханных полей в начале июня значительно выше, чем у лесных районов, которые не подвергались высокой АН.

Значительный по площади район, включающий г. Челябинск, из-за воздействии на ЭС высокой АН характеризуется большими значениями ТИНЭ. Участок с высокими значениями ТИНЭ (1 на рис. 6) индицирует крупнейший в мире буроугольный разрез Коркино. Глубина этого разреза достигает 500 м. Технология эксплуатации угольных разрезов предусматривает бурение скважин по их периметру и откачуку подземных вод с целью понижения их уровня ниже дна разреза. В результате, в уровне подземных вод формируется депрессионная воронка. Поэтому, в пределах депрессионной воронки следует ожидать понижение влажности почвы и меньшую транспирацию влаги с поверхности ЭС. На примере угольного разреза Коркино это и проявляется в форме обширной области высокого ТИНЭ, включющей в центре сам разрез.

Разрез Коркино снабжает углем Южно-Уральскую и Троицкую ГРЭС. Общая электрическая мощность этих ГРЭС составляет ~ 3000 МВт. Эти ГРЭС выбрасывают в атмосферу значительный объем продуктов сгорания бурых углей. Это может являться одной из причин для формирования обширной территории очень высокого ТИНЭ на юге УТП (2 на рис. 6).

Особо следует отметить локальную область аномально-высокого ТИНЭ на севере УТП (участок 3 на рис. 6). Этот участок характеризуется высокими значениями вегетационного индекса (см. рис. 5), что указывает на ненарушенность в этом районе биомассы ЭС. В то же время, на этом участке отмечаются высокие значения ТИНЭ (3 на рис. 6). Анализ литературы показал, что участок 3 на рис. 6 совпадает с местоположением химкомбината ПО «Маяк», где в озере Карабай складировано около 120 млн. кюри радиоактивных материалов: цезий – 137 и стронций – 90. Известно, также, что 29 сентября 1957 года на ПО «Маяк» произошла авария, в результате которой в окружающую среду было выброшено 20 млн. кюри радиоактивных веществ. Поэтому доступ на эту территорию ограничен, а, следовательно, чисто механическая нагрузка на ЭС минимальна. Это подтверждается и многочисленными фотографиями, сделанными в этом районе. В связи с этим можно предположить, что в данном случае высокие значения ТИНЭ индицируют загрязнение ЭС радионуклидами. Этот факт указывает на то, что требуется дальнейшее более глубокое изучение реакции ЭС на воздействие ионизирующих излучений. В первую очередь, необходимо выявить какой из физиологических процессов, определяющих ТИНЭ, реагирует на радиационное воздействие: - фотосинтез или транспирация влаги.

В отличие от вышеприведенных примеров, водоемы (озера, пруды) окружены зонами чрезвычайно низкого ТИНЭ (см. рис. 6). Возможно, что это отражает тот факт, что в соответствии с Российским законодательством зоны вокруг водоемов являются территориями особо защищенными от техногенного воздействия.

5. Заключение

Разработанная методика дистанционного картографирования ТИНЭ лежит в русле макроскопического подхода и является значительно более простой и менее затратной при выполнении спутникового мониторинга реакции ЭС на воздействие АН, чем микроскопический подход, требующий расчета большого количества индексов и их последующей генерализации.

Представляется, что дальнейшее развитие настоящего исследования целесообразно выполнить в направлении изучения сезонной динамики ТИНЭ. Особый интерес, представляет более глубокое изучение реакции растительности на воздействие ионизирующих излучений.

Литература

1. Берлянд Т.Г. Распределение солнечной радиации на континентах // Гидрометеоиздат, 1961. 227 с.
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. Левит А.И. Южный Урал: география, экология, природопользование // Челябинск: Южно-Уральское издательство. 2005. 246 с.
5. Achten W. M. J., Mathijs E., Muys B. Proposing a life cycle land use impact calculation methodology // Proc. of the 6th Int. Conf. on LCA in the Agri-Food Sector. Zurich. November 12-14, 2008. P.22-33.
6. Boulet G., Chehbouni A., Braud I., Vauclin M., Haverkamp R., Zammit C. A simple water and energy balance model designed for regionalization and remote sensing data utilization // Agricultural and Forest Meteorology, 2000. Vol. 105, No. 1–3. P. 117 – 132.
7. Cracknell A. P. and Xue Y. Thermal inertia de-termination from space - a tutorial review // International Journal of Remote Sensing, 1996, Vol.17, No. 3. P. 431 - 461.
8. 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.
9. Handbook of Ecological Indicators for Assessment of Ecosystem Health // Editors: Jorgensen S. E., Costanza R., Xu F. L. Taylor & Frances, 2005. 126 p.
10. Jackson R. D. The Crop Water Stress Index: A second look // Proceedings of International Conference on Measurment of Soil and Plant Water Stress, Utah State Univ., July, 1987. P. 87-92.
11. Jorgensen J S., Svirezhev Yu. M. Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems // Oxford: Elsevier, 2004. 366 p.
12. Luvall J. C., and Holbo H. R. Measurements of Short Term Thermal Response of Coniferous Forest Canopies Using Thermal Scanner Data // Remote Sensing of Environment, 1989. Vol. 27. P. 1-10.
13. Moran S. M. Chapter 8. Thermal infrared measurements as indicator of plant ecosystem health // In: Ed: Quatocchi D. A. and Luvall J. C. Thermal Remote Sensing in Land Surface Processes. London: Tailor and Frances, 2004. P.257-282.
14. Price J. C. On the use of satellite data to infer surface fluxes at meteorological scales // Journal of Applied Meteorology, 1982. Vol. 21. P. 1111-1122.
15. Schnider E. D., Kay J. J. Life as a Manifestation of the Second Law of Thermodynamics // Mathematical and Computer Modeling, 1994. Vol. 19, No. 6-8. P.25-48.
16. Thunnissen H. A. M. and Nieuwenhuis G. J. A. A Simplified Method to Estimate Regional 24-h Evapotranspiration from Thermal Infrared Data // Remote Sensing of Environment, 1990. Vol. 31. P. 211-225.
17. Vidal A. and Perrier A. Analysis of a Simplified Relation for Estimating Daily Evapotranspiration from Satellite Thermal IR Data // International Journal of Remote Sensing, 1989. Vol. 10, No.8. P.1327-1337.

18. Wagendorp T., Gulinck H., Coppin P., Muys B. Land use impact evaluation in life cycle assessment based on ecosystem thermodynamics // Energy, 2006. Vol. 31. P.112–125.
19. Watson K., Rowan L. C., Offield T. V. Application of Thermal Modeling in Geologic Interpretation of IR Images // Proceedings of 7-th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor, Michigan. 1971. P. 2017- 2041.
20. Weidema B. P. Physical impacts of land use in product life cycle assessment, 2001. Internet available: <http://www.lca-net.com/publications/older/>
21. Xue Y. and Cracknell A. P. Advanced thermal inertia modeling // International Journal of Remote Sensing, 1995. Vol. 16, No. 3. pp. 431-446.

Thermodynamic approach for remote mapping of ecosystem disturbance

V.I. Gornyy, S.G. Kristsuk, I.Sh. Latypov

*Scientific Research Centre for Ecological Safety
Russian Academy of Sciences*

18, Korpusnaya Str., Saint-Petersburg 197110, Russia

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

The study of the ecological system (ES) reaction to anthropogenic loading (AL) has been aimed at developing the remote sensing method for quantitative mapping of AL on ES. The analysis of the problem has shown that the main approach for its solution is to assess the amount of entropy induced in ES by AL. The general formalism has been discussed and the thermodynamic index of ES health disturbance (TIEHD –) has been deduced from the conservation law as a portion of solar exergy spent by ES on the parrying entropy formed in ES due to AL with respect to the total amount of exergy of solar irradiations absorbed by ES. The technique of remote mapping of TIEHD has been developed. The maps of TIEHD and the normalized differential vegetation index (NDVI) – have been compiled on the basis of NOAA and EOS satellite data. The qualitative and quantitative analysis exhibited the best sensitivity of TIEHD to AL on ES in respect to NDVI.

Keywords: Ecosystem, Anthropogenic Loading, Thermodynamics, Exergy, Entropy, Budget, Index, Satellite, Mapping.