

УДК 91.528.7

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ДЕГРАДАЦИИ ПОЧВЫ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДОЛГОСРОЧНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

^{3,5}Рихтер А.А., ^{1,3,4,5}Шахраманьян М.А., ^{1,2}Казарян М.Л., ^{5,6}Мурынин А.Б.

¹Владикавказский филиал Финансового университета

при Правительстве Российской Федерации, Владикавказ, e-mail: vfek@bk.ru;

²Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова, Владикавказ, e-mail: nosu@nosu.ru;

³Институт аэрокосмических технологий и мониторинга РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина», Москва, e-mail: 7283963@mail.ru;

⁴Московский институт открытого образования, Москва, e-mail: 7283963@mail.ru;

⁵Научно-исследовательский институт «Аэрокосмос», Москва;

⁶Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Российской академии наук, Москва, e-mail: wcan@ccas.ru

С использованием космических изображений возможно изучение различных форм деградации почв. Одним из главных признаков деградации почв является уменьшение их репродуктивности. В работе исследована технологическая деградация почвы, как наиболее актуальная ее форма. На основе космических данных рассчитаны различные вегетационные индексы и индексы подстилающей поверхности за тридцатилетний период наблюдений. Разработан метод оценки степени деградации почв, базирующийся на вегетационных индексах и индексах подстилающей поверхности. Идея методики состоит в оценке реакции растительности на внешние факторы на примере температуры окружающей среды как природного и необходимого для жизнедеятельности условия. Расчет степени деградации почв проводится для участков интенсивного антропогенного воздействия. Особое внимание уделяется исследованию такой формы деградации, как замусоривание территорий. В рамках этой задачи были проведены расчеты по тестовым объектам захоронения отходов Московской области.

Ключевые слова: деградация почвы, индексы реакции растительности, степень деградации почвы, температура, дистанционное зондирование, алгоритмы, космические изображения, полигон ТБО

THE METHODOLOGICAL ELABORATION OF ASSESSMENT SOIL DEGRADATION ON THE BASIS OF TERM OBSERVATION DATA

^{3,5}Rikhter A.A., ^{1,3,4}Shakhramanyan M.A., ^{1,2}Kazaryan M.L., ^{5,6}Murynin A.B.

¹Financial University at Government of Russian Federation Vladikavkaz branch, Vladikavkaz, e-mail: vfek@bk.ru;

²North Ossetian State University by K.L. Khetagurov, Vladikavkaz, e-mail: nosu@nosu.ru;

³Institute of Aerospace Technology and Monitoring, Moscow, e-mail: 7283963@mail.ru;

⁴Moscow Institute of Open Education, Moscow, e-mail: 7283963@mail.ru;

⁵Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow;

⁶Dorodnicyn Computing Centre of RAS, Moscow, e-mail: wcan@ccas.ru

Using space images it is possible to study various of soil degradation forms. One of the main of soil degradation signs is reducing their reproductive rate. In the work of the investigated technological soil degradation, as the most current form of it. On the basis of space-based data are calculated various vegetation indices and underlying surface indices for the thirty-year observations period. Developed an estimating method the degree of soil degradation, based on vegetation indices and underlying surface indices. Method idea consist from the vegetation cover reaction to the external influence, in particular environment temperature as natural and essential condition. The calculation of the degree soil degradation implemented in intensive anthropogenic impact areas. Special attention is paid to investigation of such degradation forms, as marine litter territories. In the framework of this objective were conducted calculations on test waste disposal objects Moscow region.

Keywords: soil degradation, indices of vegetation response, the degree of degradation of soil, temperature, remote sensing, algorithms, space images, municipal solid waste landfill

Дистанционное измерение плодородия почвы актуально для решения задач управления, экономического планирования, экологического мониторинга [1, 2, 3, 5]. Существуют различные методы измерения деградации почвы по данным космической

съемки. Так, в работе [4] был введен вегетационный индекс роста *VCI*, отражающий погодные условия для растительности: влажные и благоприятные, близкие к норме, стрессовое состояние растительности. Также был введен вегетационный индекс

температурного режима TCI , значение которого отражает риск возникновения засухи как формы деградации почвы [4].

В данной работе предлагается метод оценки деградации почвы с использованием данных о температуре поверхности и вегетационном индексе.

Постановка задачи

Известно, что растения нуждаются в тепле и растут при определённом температурном режиме. Если температура слишком низкая, то растения вымерзают, если слишком высокая – высыхают. Т.е. существует определённый диапазон температур, при котором растения не погибнут. Этот диапазон, конечно, зависит от вида растения. Есть, например, морозоустойчивые растения, есть, наоборот, теплолюбивые. Но, как известно, в зонах с умеренным климатом интенсивный рост растений начинается и заканчивается в определённое время года. Например, в районах с умеренно континентальным и резко континентальным климатом весна (начало вегетации) и осень (конец вегетации) наступают в разное время. Это значит, что интенсивность роста растений зависит, прежде всего, не от географического местоположения, а от погодных условий и в первую очередь от температуры воздуха. Таким образом существует определённый температурный диапазон, при котором наблюдается вегетация для большинства видов растений.

Температура влияет не только на интенсивность роста растений, но и на плодородие почвы. В районах с умеренно континентальным климатом «производительность» почвы выше, чем в районах с резко континентальным климатом, т.к. период вегетации дольше, а среднегодовая температура воздуха выше. Понятия «увеличение плодородия» и «деградация почвы» противоположны по смыслу. Но снижение плодородия является деградацией почвы только в том случае, если это не вызвано сезонными изменениями погоды, в частности температурой воздуха.

Если деградации почвы нет, то рост растительности соответствует сезонным изменениям температуры воздуха. Если же деградация есть, то растительность будет расти хуже, чем это «положено» при той или иной температуре.

Метод, основные понятия

Введем понятие индекса реакции растительности (ИРР) как отклик вегетации растительности на изменение температуры окружающей среды [4]. Обозначим его символом \mathfrak{X} и будем требовать, чтобы ИРР принимал следующие значения (ε близко к нулю, например, $\varepsilon = 10^{-1}$):

1. $|\mathfrak{X}| \leq \varepsilon$. Предполагается, что процессы жизнедеятельности растительного покрова соответствуют норме, растения в полной мере отрабатывают приходящее тепловое солнечное излучение.

2. $\varepsilon < \mathfrak{X} \leq 1$. Предполагается, что солнечного тепла приходит больше, чем усваивается растительностью, растения находятся в стрессовой ситуации;

3. $-1 \leq \mathfrak{X} < -\varepsilon$. Предполагается, что для жизнедеятельности растительного покрова не требуется комфортного температурного режима. Растения выносливы к недостатку или избытку солнечного тепла. Например, вечнозеленые деревья морозостойки, и их индекс $NDVI > 0$ даже в зимнее время.

Тенденция изменения состояния покрова даст информацию о том, подвержен ли покров деградации или нет. Для этого следует провести анализ временных рядов ИРР.

Введем понятие степени деградации почвы (СДП) как величину, пропорциональную изменению ИРР во времени [4]. Обозначим его символом \mathfrak{A} и потребуем, чтобы СДП принимала следующие значения:

1. $\eta < \mathfrak{A} \leq 1$. За время периода наблюдения произошла деградация почвы (ухудшение её состояния).

2. $-1 \leq \mathfrak{A} < -\eta$. Деградация не наблюдается. В этом случае предполагается, что происходит улучшение состояния почвы, её восстановление и процессы адаптации к условиям внешней среды. Физический смысл отрицательных значений СДП подлежит дальнейшему исследованию.

3. $|\mathfrak{A}| \leq \eta$, то будем считать, что ни деградации, ни улучшения состояния почвы не произошло. Не будем с уверенностью утверждать что-либо о том, в каком направлении происходит процесс, в сторону деградации или улучшения состояния. Растения как бы сопротивляются каким-то внешним вредоносным воздействиям.

СДП определяется для каждого пикселя изображения, т.е. результаты расчетов СДП можно представить в виде изображений. Сперва строится временной ряд значений ИРР. Затем рассчитывается линия регрессии первого порядка (линейный тренд), например, методом среднеквадратического отклонения. Коэффициент наклона линии регрессии будет пропорционален СДП. Таким образом выполняется темпоральная обработка как по одному (единичная линейная регрессия), так и по массиву пикселей (множественная линейная регрессия).

Влияние температуры на растительный покров можно разбить на 2 вида:

1) При повышении температуры от $T1$ до $T3$ плотность покрова увеличивается;

2) При повышении температуры от T_3 до T_5 плотность покрова уменьшается.

T_1 , T_3 и T_5 рассчитываются по алгоритму А1.

Алгоритм оценки деградации почвы

T_1 , T_3 и T_5 рассчитываются по алгоритму А1 (рис. 1).



Рис. 1. Блок-схема получения характерных температур (алгоритм А1)

На входе алгоритма – участки мультиспектральных космических изображений, снятых в разное время года: зимой, летом, весной, осенью. Снимки должны быть безоблачными, но могут быть разных серий и описывать разные территории. По резуль-

татам алгоритма построена зависимость характерных значений NDVI от температур поверхности $NDVI_m(T)$ (рис. 2, график 1). Линия регрессии (рис. 2, график 2) для Московского региона получена методом наименьших квадратов.

Условно назовём температуру T_5 – верхней, T_1 – нижней температурой выживаемости растительного покрова (для Московской области), T_3 – оптимальной. Также условно считаем, что T_2 и T_4 – границы диапазона температур, наиболее благоприятных для жизнедеятельности растительного покрова в целом. T_1 и T_5 – минимально и максимально возможные температуры, при которых наблюдается жизнедеятельность растений.

Значения таких температур $T_1...T_5$ могут отличаться для разных видов растительности в отдельности [5]. Но мы предполагаем, что для растительного покрова в целом в том или ином регионе существуют некоторые средние температуры T_2 , T_3 , T_4 , а также минимальная T_1 и максимальная T_5 , найденные по алгоритму А1. Как меняются данные температуры в зависимости от региона (либо являются постоянными величинами) – задача, которая подлежит дальнейшему исследованию.

ИРР будем определять по формуле

$$\mathfrak{R} = HT - VCI;$$

$$HT = \begin{cases} (T - T_1)/(T_3 - T_1), & T_1 \leq T < T_3; \\ 1, & T = T_3; \\ (T_5 - T)/(T_5 - T_3), & T_3 < T \leq T_5, \end{cases} \quad (1)$$

где HT – функция значений нормированных температур.

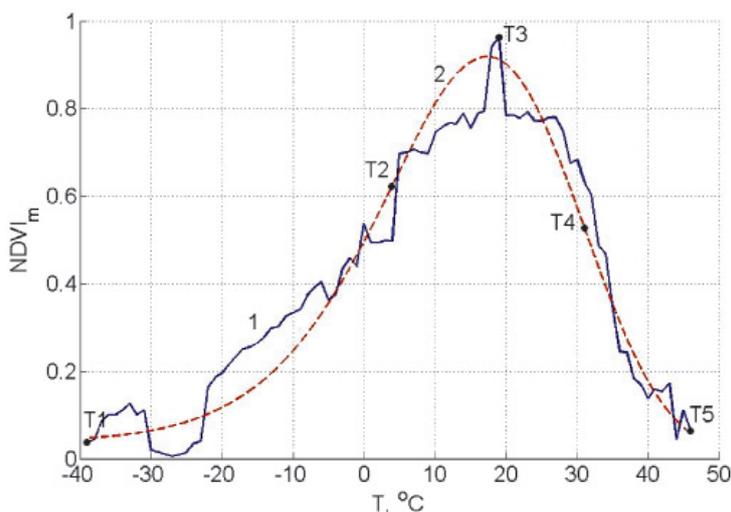


Рис. 2. Зависимость характерных значений вегетационного индекса NDVI от температуры поверхности (график 1) и линия регрессии временного ряда (график 2); T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 – характерные температуры

СДП будем рассчитывать по формуле

$$\mathbf{x} = \begin{cases} D \cdot k, & k > \eta; \\ 0, & |k| \leq \eta; \\ R \cdot k, & k < -\eta, \end{cases} \quad (2)$$

где k – коэффициент наклона линейного тренда временного ряда ИРР, D и R – коэффициенты пропорциональности; η – близко к нулю, например, $\eta = 10^{-3}$. D и R можно найти так: $R = \min(K)^{-1}$; $D = \max(K)^{-1}$, где K – вектор значений k на большой контрольной области.

Результаты экспериментальных исследований

Покажем результаты исследований индексов реакции растительности на температуру воздуха и степени деградации почвы. Рассмотрим 2 прямоугольных участка Московского региона (рис. 3):

1) с загрязнением почвы: окрестности полигона ТБО Торбеево, Люберецкий рай-

он (а); 2) экологически благоприятный: окрестности Лосиноостровского лесопарка Щелковского района (в). 1 – участок складирования, 2 – хоззона, 3 – прилегающий лесомассив, 4 – дер. Русавкино-Романово, 5 – дер. Торбеево, 6 – р. Черная (а, в).

Для расчета ИРР были использованы мультиспектральные космические снимки серий Landsat 4-5 TM с 7-ю спектральными каналами. Индексы VCI рассчитывались по третьему и четвертому каналам. Далее по формуле (1) находились ИРР. Масштабирование изображений СДП участков (б, г) по яркости различно: б) 0–0,5032; г) 0–0,0456. Чем темнее пиксель, тем больше значение СДП. Видно, что максимальная СДП загрязненного участка 1 (а) на порядок больше, чем максимальная СДП экологически благоприятного участка 2 (б). Деградации подвержена вся территория полигона (объекты 1 и 2), прилегающий к нему лес (объект 3), частично территория деревень Русавкино-Романово (4) и Торбеево (5).

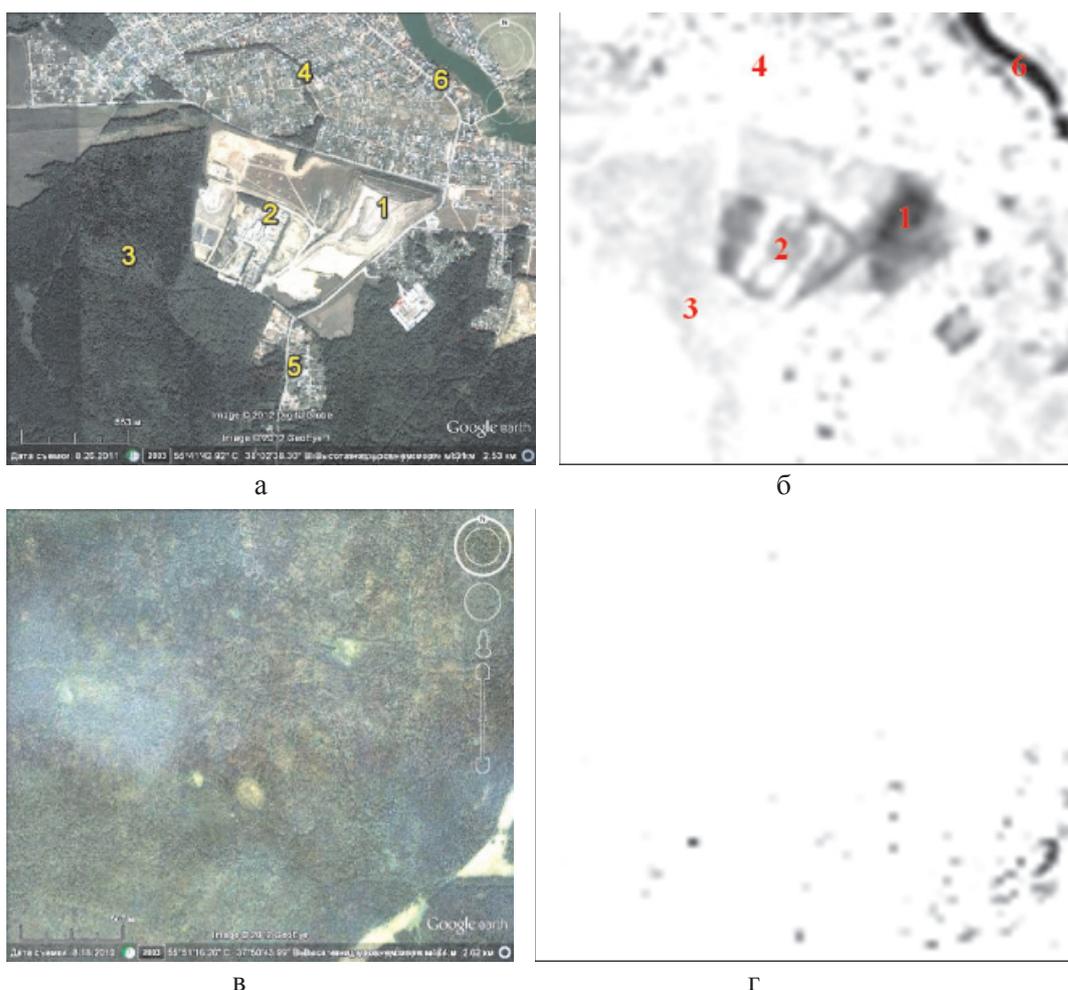


Рис. 3. Изображения Google Earth (а, в), СДП (б, г); (а, б) – участок 1; (в, г) – участок 2

Как видно из рис. 3, г, лесопарк является экологически благоприятной зоной. Лишь незначительная деградация почвы наблюдается на юго-восточной области участка 2. Вероятно, это вызвано тем, что поблизости от неё находится дачный кооператив и автомагистраль за пределами участка 2. Влияние этих антропогенных объектов распространилось на окраину лесопарка и вызвало здесь затоптанность и образование грунтовых проезжих дорог. Для водоисточников интерпретация СДП другая: чем больше ИРР и СДП, тем меньше цветение водоема, т.е. он экологически чище и является в среднем более благоприятной средой обитания для растительных и живых организмов. И наоборот, чем меньше ИРР и СДП водоема, тем больше цветение его поверхности и меньше выживаемость животных и растений под поверхностью. Река Черная (б) на рис. 3, б имеет высокую СДП, к тому же водоисточник подвижный, что уменьшает вероятность его цветения.

Выводы

По результатам исследований можно заключить следующее.

Установлено наличие корреляции между замусориванием почвы и индексом реакции растительности на температуру воздуха, а также степенью деградации почвы;

Вегетационный период растительности, для которой почва подвержена замусориванию, значительно короче, чем вегетационный период растительности, не подверженной загрязнению. Начало периода первой происходит позже, а окончание – раньше;

Чем более продолжительным является значение $\hat{A} > \varepsilon$, тем больше вероятность возникновения деградации почвы. Большое значение \hat{A} за текущий год приводит к тому, что репродуктивность растительного покрова уменьшается и может привести к меньшей сопротивляемости растительности негативным воздействиям среды в следующем году.

Список литературы

1. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления. – СПб.: Профессия, 2003. – 52 с.
2. Казарян М.Л. Исследование вейвлет-преобразований Хаара на корректность в контексте задачи космического мониторинга Земли // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2013. – № 6 (178). – С. 14–17.
3. Шахраманьян М.А., Рихтер А.А. Методы и технологии космического мониторинга объектов захоронения отходов в интересах обеспечения экологической безопасности территории: учебно-методическое пособие. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2013. – 241 с.
4. Baret F., Guyot G., and Major D. (1989) TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI or APAR estimation, in 12th Canadian Symposium on Remote Sensing and IGARSS 1990. – Vancouver, Canada, July10–14.
5. Kazaryan M.L. Optimal zone coding of digital Lipschitzian signals by the class of systems of modified Haar Transforms. Telecommunications and Radio Engineering. – 2013. – Vol. 72, № 11. – Begell House. – P. 1005–1020.

References

1. Besekerskii V. A. Teoriia Sistem Avtomaticheskogo Upravleniia, Spb.; Professiia, 2003. 52 p.
2. Kazaryan M.L. Issledovanie veivlet-preobrazovaniia Khaara na korrektnost' v kontekste zadachi kosmicheskogo monitoringa Zemli // Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Serii: Estestvennye nauki. 2013. no. 6 (178). pp. 14–17.
3. Shakhraman'ian M.A., Rikhter A.A. Metody i tekhnologii kosmicheskogo monitoringa ob'ektov zakhoroneniia otkhodov v interesakh obespecheniia ekologicheskoi bezopasnosti territorii: Uchebno-metodicheskoe posobie. M.: Izdatelskii tsentr RGU nefi i gaza imeni I.M. Gubkina, 2013. 241 p.
4. Baret F., Guyot G., and Major D. (1989) TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI or APAR estimation, in 12th Canadian Symposium on Remote Sensing and IGARSS 1990. Vancouver, Canada, July10–14.
5. Kazaryan M.L. Optimal zone coding of digital Lipschitzian signals by the class of systems of modified Haar Transforms. Telecommunications and Radio Engineering. 2013. Vol. 72, no. 11. Begell House. pp. 1005–1020.

Рецензенты:

Заалишвили В.Б., д.ф.-м.н., профессор, директор, ФГБУН «Центр геофизических исследований», г. Владикавказ;

Кусраев А.Г., д.ф.-м.н., профессор, директор, Институт прикладной математики и информатики, г. Владикавказ.

Работа поступила в редакцию 10.04.2015.