

УДК 504.06(1/9):004.9

И.Н. Владимиров

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА БАЙКАЛЬСКОЙ СИБИРИ



Байкальская Сибирь – географическое понятие, территориально совпадает с границами Предбайкалья и Забайкалья [11, 12]. Байкальская Сибирь, расположенная на юге Восточной Сибири, в административном плане включает территорию трех субъектов Российской Федерации: Иркутской области, Республики Бурятия и Забайкальского края.

Байкальская Сибирь представляет собой сложный в природно-ландшафтном отношении регион, обладающий громадным запасом различных природных ресурсов, промышленное освоение которых начиная с 70-х гг. XX столетия непрерывно возрастает, формируя сложные экологические проблемы [1].

Низкий потенциал устойчивости природных комплексов этого региона к антропогенным деструкциям, замедленные процессы самовосстановления нарушенных геосистем, определяющиеся значительной суровостью природных условий, создают большое количество экологических ограничений в области природопользования, стимулируя тем самым повышение его рациональности. Необходимость экологической рационализации природопользования в Байкальской Сибири определяется еще и тем, что большая часть региона относится к Байкальской природной территории, на которой экологическая регламентация природопользования определяется Федеральным законом «Об охране озера Байкал» [18].

Все эти факторы стимулируют поиск новых научных и прикладных подходов в экологизации природопользования в Байкальской Сибири с учетом особенностей ее природно-ландшафтных комплексов и их компонентов. В первую очередь это относится к экологическому потенциалу.

Существует несколько определений экологического потенциала, но все они, в основном, сводятся к пониманию его как совокупности природных условий, необходимых для жизни и воспроизводства населяющих данную территорию организмов [5, 6, 7, 15].

Экологический потенциал характеризует возможность сохранения и функционирования природных систем, рационального использования всех компонентов биосферы в интересах человека [14].

А.Г. Исаченко подчеркивал фундаментальное значение понятия экологического потенциала

и давал его определение как «способность ландшафта обеспечивать потребности населения во всех необходимых первичных (т.е. собственно экологических, не связанных с производством) средствах существования – тепле, воздухе, воде, источниках пищевых продуктов, а также в природных условиях трудовой деятельности, отдыха, лечения и духовного развития» [7, с. 6]. При этом он предупреждал, что не следует путать экологический потенциал ландшафта с его производственно-ресурсным потенциалом.

Цель оценки экологического потенциала – дать общее представление об условиях существования в них людей, создать естественнонаучную основу для разумной региональной экологической политики, совершенствования системы расселения и социальной сферы, рациональной организации труда и отдыха, охраны здоровья населения.

Материалы и методы

Для организации исследований экологического потенциала, факторов и условий, оказывающих влияние на его формирование, использовались:

- цифровая модель рельефа (ЦМР), созданная на основе данных радарной топографической съемки *SRTM (Shuttle radar topography mission)*;
- набор глобальных климатических данных *WorldClim* (<http://www.worldclim.org>) с пространственным разрешением 30 угловых секунд, что примерно соответствует 1 км² [22];
- данные о чистой первичной биологической продукции (*Net primary production – NPP*) – результат обработки данных дистанционного зондирования спектрорадиометра *MODIS* спутниковой системы *Terra/Aqua (MOD 17)*;
- нормализованный разностный вегетационный индекс (*Normalized Difference Vegetation Index – NDVI*);
- усовершенствованный вегетационный индекс (*Enhanced vegetation index – EVI*).

Данные радарной топографической съемки SRTM

Исходные данные *SRTM* представляют собой матрицу высот с размером ячейки 3 угловые секунды

(около 90 м). Следует заметить, что пространственное разрешение *SRTM* определенным образом накладывает отпечаток на последующие вычисления. Это в полной мере относится к уклону, экспозиции склонов и другим переменным, величины которых реагируют на заданные размеры ячейки модели, устанавливают пределы детализации моделируемой поверхности [24].

Набор глобальных климатических данных WorldClim

WorldClim – массив климатических данных, включающих минимальную, максимальную и среднюю температуру, осадки, высоту над уровнем моря, набор из 19 производных биоклиматических характеристик (*BioClim*), а также данные о климатах прошлого и будущего. Данные покрывают всю поверхность суши (за исключением Антарктиды) и доступны в разных форматах с различным пространственным разрешением вплоть до 30 arcsec, что примерно соответствует 1 км² (<http://www.worldclim.org>).

Чистая первичная продуктивность

Чистая первичная продуктивность – запасаемое автотрофными организмами органическое вещество, которое идет на рост фитомассы, выражаемое потоками органического вещества и его потенциальной химической энергии на единицу площади за единицу времени. Первичная биологическая продуктивность характеризуется образованием биомассы (первичной продукции) в процессе фотосинтеза зелеными растениями (автотрофами).

При исследованиях первичной биологической продуктивности наземных биогеоценозов определяют ряд показателей, которые затем используют в качестве отдельных статей баланса органического вещества на конкретных участках. Продукция, определяемая с учетом затрат вещества и энергии на процессы метаболизма самих организмов-продуцентов, называется первичной брутто-продукцией, или валовой продукцией (*GPP-gross primary production*). Разность между первичной брутто-продукцией и затратами растений на дыхание определяет первичную нетто-продукцию (*NPP – net primary production*). *NPP* включает в себя не только чистую продукцию прироста за учитываемый период, но и продукцию, перешедшую за то же время в опад (листья, цветки, семена и др.) и отпад (отмершие деревья, сучья и др.), а также часть продукции живых растений, пошедшую на корм животных-фитофагов (консумпцию).

Для определения *NPP* использованы данные дистанционного зондирования спектрометра *MODIS* спутниковой системы *Terra/Aqua* – продукт обработки *MOD 17*, содержащий данные о чистой первичной продукции. Исходными материалами для *MOD 17* являются информация о типе экосистемы

(продукт *Land Cover MOD 12*), индексе листовой поверхности (*LAI*), фракции фотосинтетически активной радиации, поглощенной растением (*FPAR*) – продукт *MOD 15* [21]. В качестве метеорологических данных используются среднесуточные значения результатов реанализа системы MERRA (<http://gmao.gsfc.nasa.gov/merra>), позволяющей на основе информации сети метеорологических станций строить непрерывные поля метеорологических параметров для каждого пиксела геоизображения. Третьим компонентом при расчете чистой первичной продукции является радиационно-термодинамическая модель экосистем *Biome Properties Lookup Table (BPLUT)* [27], основной задачей которой является восстановление значений эффективности фотосинтеза в определенных метеорологических условиях и типе экосистемы.

Вегетационные индексы NDVI и EVI

Вегетационный индекс – показатель, рассчитываемый в результате операций с разными спектральными диапазонами ДДЗ и имеющий отношение к параметрам растительности в данном пикселе снимка [29]. В настоящее время существует около 160 вариантов вегетационных индексов [19].

Основное предположение по использованию вегетационных индексов состоит в том, что некоторые математические операции с разными каналами ДДЗ могут дать полезную информацию о растительности. Это подтверждается множеством эмпирических данных [25]. Второе предположение – это идея, что открытая почва на снимке будет формировать в спектральном пространстве прямую линию (т.н. почвенная линия) [26]. Почти все распространенные вегетационные индексы используют только соотношение красного – ближнего инфракрасного каналов, предполагая, что в ближней инфракрасной области лежит линия открытой почвы. Подразумевается, что эта линия означает нулевое количество растительности.

Нормализованный разностный вегетационный индекс (*NDVI*) – один из самых известных индексов – прост в вычислении, имеет широкий динамический диапазон и лучшую чувствительность к изменениям в растительном покрове [2, 3, 9, 10, 31]. Он умеренно чувствителен к изменениям почвенного и атмосферного фона. Расчет *NDVI* базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках спектральной кривой отражения сосудистых растений: красной области спектра (1-й канал *MODIS Terra* 0,62-0,67 мкм) – максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, и ближней инфракрасной области (2-й канал *MODIS Terra* 0,841-0,876 мкм) – область максимального отражения клеточных структур листа, т.е. высокая

фотосинтетическая активность ведет к меньшему отражению в красной области спектра и большему в инфракрасной. *NDVI* вычисляется как отношение измеренных значений спектральной яркости в красной (*RED*) и ближней инфракрасной зонах (*NIR*) спектра по следующей формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}.$$

На значения индекса также влияет видовой состав растительности, ее сомкнутость, состояние, экспозиция, угол наклона поверхности, тип почвы под разреженной растительностью. Индекс может принимать значения от -1 до 1 . Для зеленой растительности значения индекса составляют от $0,2$ до $0,8$.

Основным преимуществом вегетационных индексов является легкость их получения и широкий диапазон решаемых с их помощью задач. Так, *NDVI* часто используется как один из инструментов при проведении более сложных типов анализа, результатом которых являются карты продуктивности лесов и сельскохозяйственных земель, карты ландшафтов и природных зон, почвенные, аридные, фитогидрологические, фенологические и другие эколого-климатические карты [4, 10, 20].

Основным недостатком *NDVI* является врожденная нелинейность индекса, базирующегося на отношении, и чувствительность к аддитивным шумам, например к вызванным атмосферным излучением.

Существуют индексы, основанные на *NDVI*, но корректирующие сразу несколько помехообразующих факторов, например усовершенствованный вегетационный индекс (*EVI*):

$$EVI = G \frac{NIR - RED}{NIR + C1 \cdot RED - C2 \cdot Blue + L},$$

где *RED* – значения спектральной яркости в красной области спектра, *NIR* – значения спектральной яркости в ближней инфракрасной зоне, *Blue* – значения спектральной яркости в синей области спектра, *G*, *L*, *C1* и *C2* – коэффициенты, равные $2,5$; $1,0$; $6,0$ и $7,5$ соответственно [23].

Индекс может принимать значения от -1 до 1 . Для зеленой растительности значения составляют от $0,2$ до $0,8$.

EVI был предложен для оптимизации вегетационного сигнала с целью повысить чувствительность в регионах с большим запасом биомассы (леса) и улучшить мониторинг вегетации путем уменьшения влияния почвенных и атмосферных условий на значение индекса. Индексы *EVI* и *NDVI* дополняют друг друга при исследовании растительности и повышают точность получаемых биофизических параметров [23].

Результаты исследования

Каждый компонент или элемент геосистемы в отдельности может служить объектом экологической оценки, имея в виду выяснение степени его позитивного или негативного влияния на жизнь людей [1, 7]. Однако значение того или иного природного фактора зависит от его сочетания с другими свойствами геосистем. Нередко экологический эффект различных природных факторов оказывается противоположным и взаимоисключающим. Следовательно, оценка природных экологических факторов должна быть комплексной – охватывать всю их совокупность и взаимные связи, воплощаемые в понятии экологический потенциал ландшафтов (геосистем) [8].

Для обработки и анализа полученных значений была построена *GRID*-модель с регулярным шагом 90 угловых секунд (3 км). *GRID* (англ. «сеть», «решетка») – модель представляет собой регулярную матрицу количественных значений исследуемых факторов, полученную при интерполяции исходных данных, со значениями интерполированной величины в каждой ячейке матрицы.

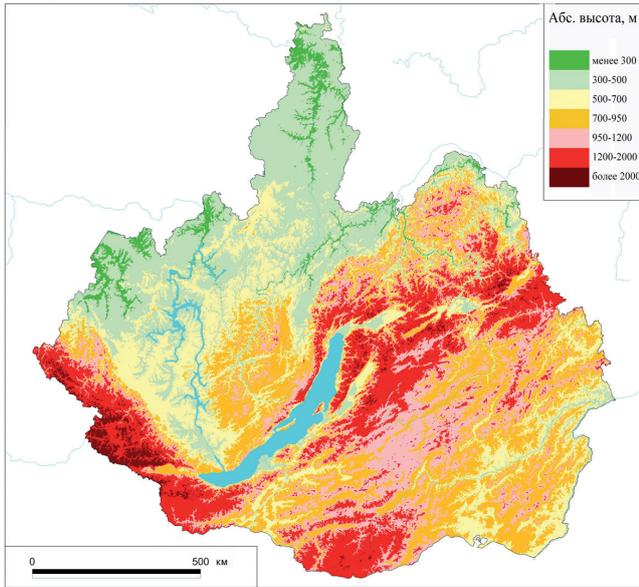
К основным возможностям и особенностям *GRID*-моделирования относятся [13]:

- получение географических данных из различных картографических источников, их обновление,
- оперативность создания баз тематических данных,
- анализ территории в результате объективного совмещения пространственных единиц компонентов геосистем,
- создание новых электронных тематических карт.

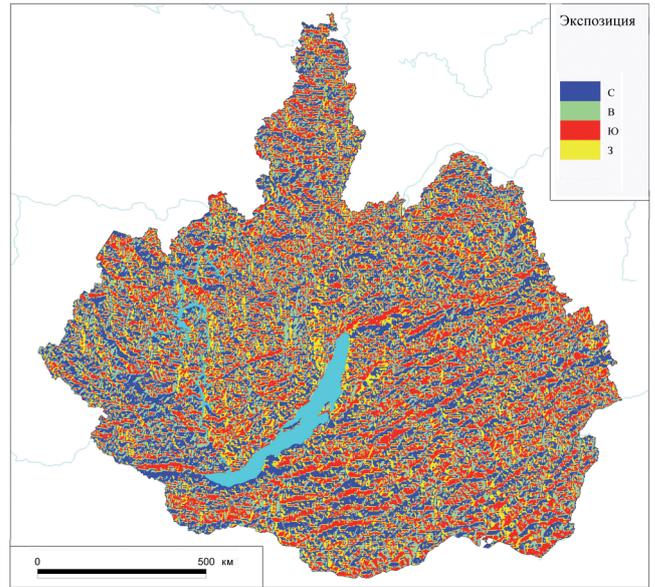
На основе полученной *GRID*-модели по абсолютной высоте произведен расчет крутизны и экспозиции склонов. Все полученные данные в виде регулярных сетей (абсолютная высота, крутизна и экспозиция склонов, среднегодовые осадки, средняя температура января, средняя температура июля, значения вегетационных индексов *NDVI* и *EVI*, первичной биологической продуктивности *NPP*) (рис. 1) были конвертированы в векторный вид и представляют собой массив регулярно распространенных точек. *GRID*-модель Байкальской Сибири содержит $672\,048$ точечных объектов.

Для оценки экологического потенциала произведен перевод всех показателей к безразмерным величинам – проранжированы на 5 категорий: минимальные, низкие, средние, высокие, очень высокие значения.

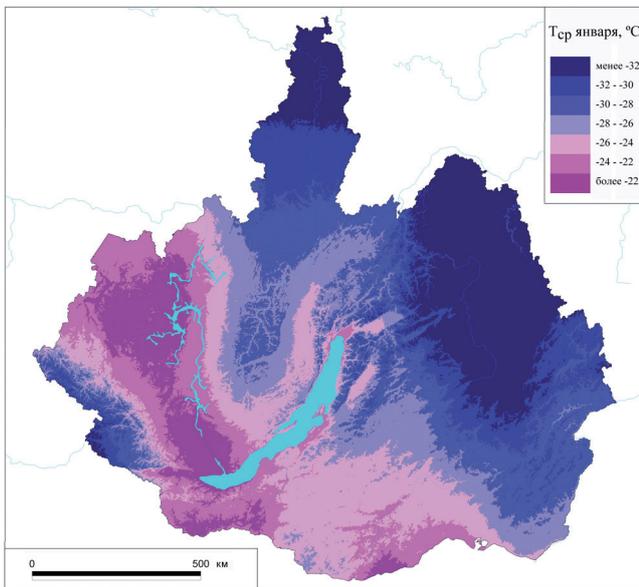
Исчерпывающий охват всех возможных природных экологических факторов, определяющих



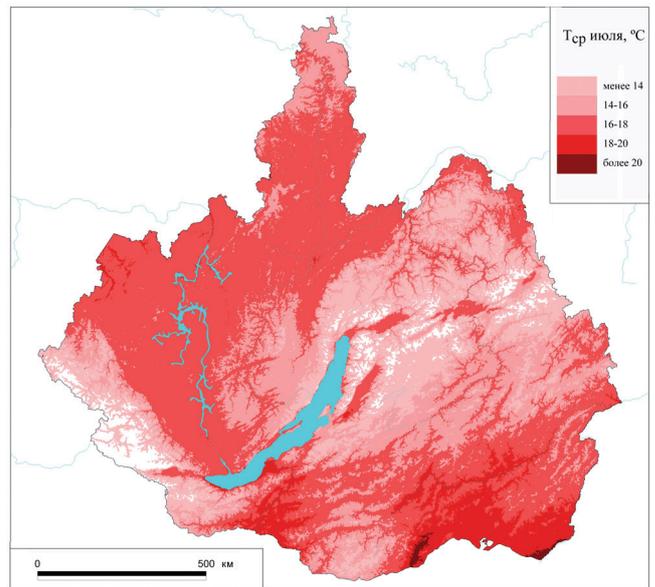
а)



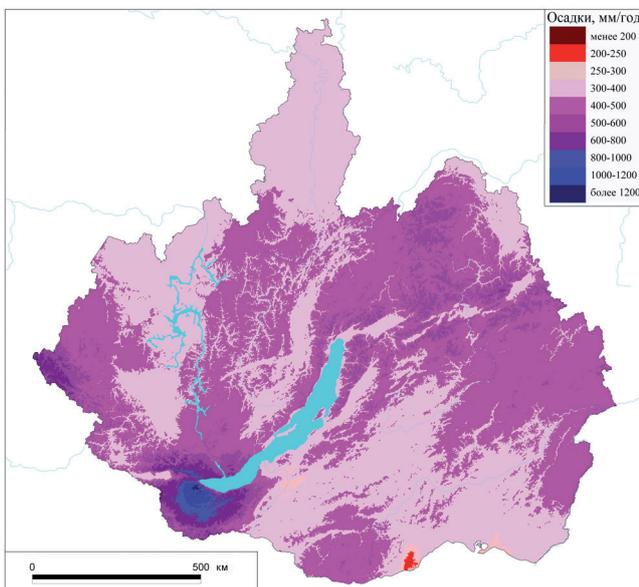
б)



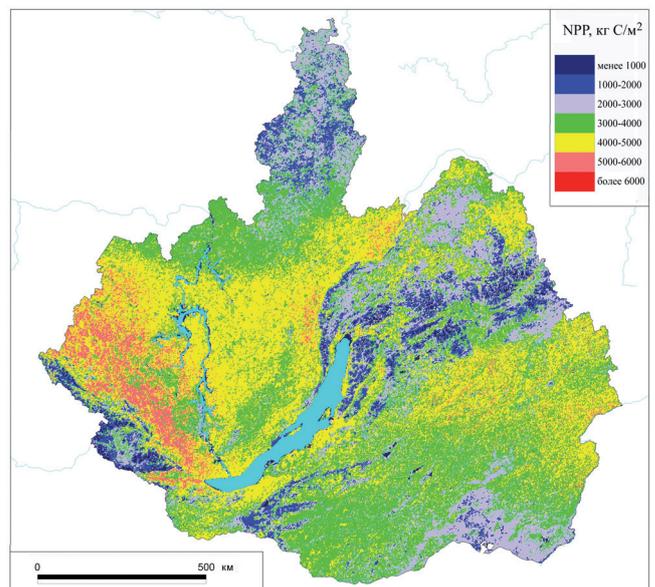
в)



г)



д)



е)

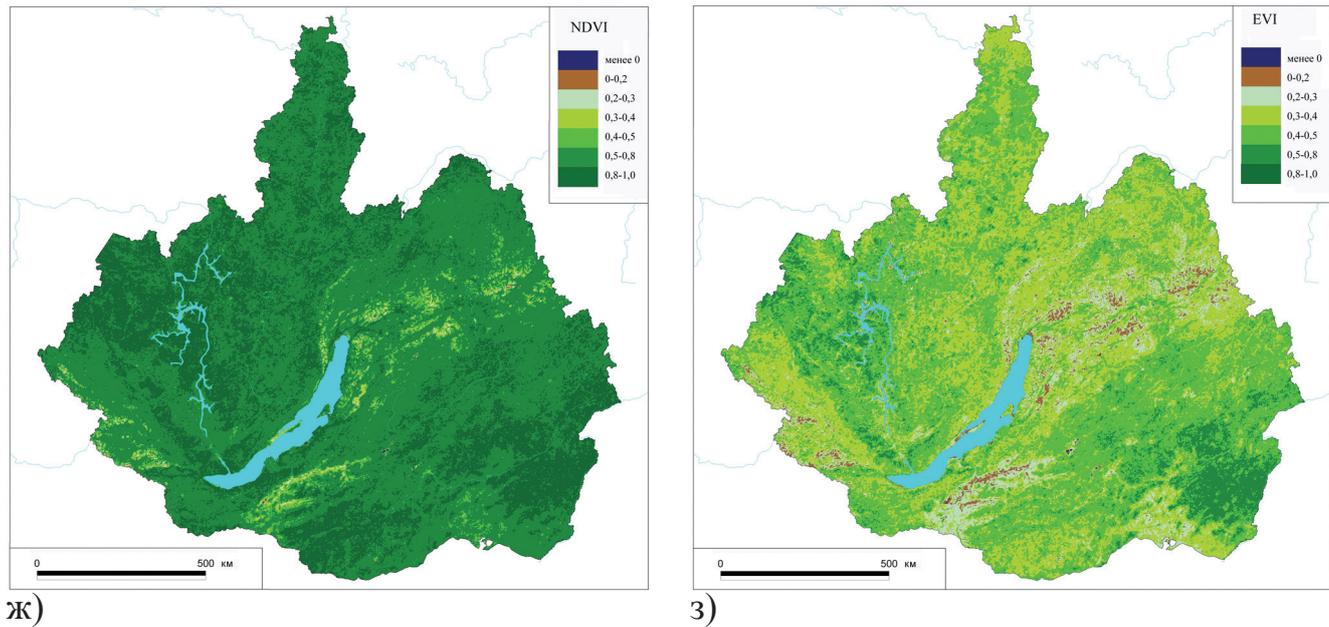


Рис. 1. а) – абсолютная высота, м; б) – экспозиция склонов, в) – средняя температура января, °С; г) – средняя температура июля, °С; д) – среднегодовые осадки, мм/год; е) – первичная биологическая продуктивность NPP , кг $C/m^2 \cdot год^{-1}$; ж) – значения вегетационного индекса $NDVI$, з) – значения вегетационного индекса EVI

экологический потенциал геосистем, практически невозможен. Необходимо выявить главные, определяющие факторы от второстепенных, т.е. учитывать их вклад (вес) в значение потенциала. Для определения весовых коэффициентов при расчете экологического потенциала использовался метод анализа иерархий МАИ (Analytic hierarchy process) – математический инструмент системного подхода к сложным проблемам принятия решений [28]. Иерархическая структура представлена на рис. 2.

Формула данной иерархической структуры выглядит следующим образом:

$$EP = (0,119H + 0,065A + 0,065S) + (0,129W + 0,129T_1 + 0,129T_7) + (0,232NPP + 0,067NDVI + 0,067EVI),$$

где H – высота (ранг), A – экспозиция (ранг), S – крутизна (ранг), W – среднегодовые осадки (ранг), T_1 – средняя температура января (ранг), T_7 – средняя температура июля (ранг), NPP – первичная биологическая продуктивность (ранг), $NDVI$ – вегетационный индекс $NDVI$ (ранг), EVI – вегетационный индекс EVI (ранг).

Заключение

Оценка экологического потенциала сложна из-за многообразия признаков (критериев) этой оценки и отсутствия для них общей единицы измерения. А.Г. Исаченко [8] для первичной сравнительной оценки и ранжирования экологического потенциала ландшафтов РФ качестве общего критерия принял тепло-

и влагообеспеченность. Следует заметить, что оценка экологического потенциала на основе климатических показателей возможна только на глобальном и отчасти на региональном уровне, поскольку главные черты климата сохраняют общность лишь на значительном пространстве. На наш взгляд, одним из главных в системе критериев оценки экологического потенциала на региональном и локальном уровне может выступать биота (а конкретно – растительность), рассматривая ее как сложную, целостную, эволюционно самостоятельно развивающуюся автотрофную систему, и как важный, часто критический, компонент геосистем [7, 8, 16, 17]. Такой геосистемный подход к растительности как одному из важнейших компонентов геосистем разного уровня географической размерности, эволюционно сформировавшей свою структурно-функциональную организацию, обладающую определенной устойчивостью к внешним, в том числе и антропогенным воздействиям и способностью к самовосстановлению, обеспечивает ей действительно высокую экологическую значимость в природопользовании [1].

Используя основные принципы $GRID$ -моделирования, метод анализа иерархий, был рассчитан экологический потенциал Байкальской Сибири (рис. 3), позволяющий отобразить совокупность природных условий, необходимых для обеспечения потребностей населения во всех необходимых первичных средствах (собственно экологических, не связанных с производством). Полученные значения об экологическом

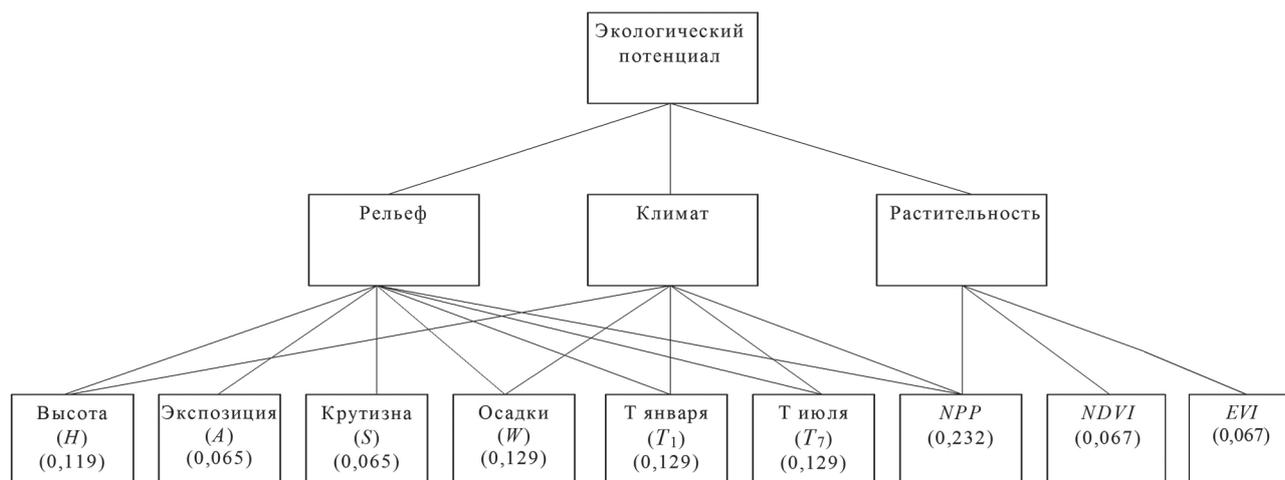


Рис. 2. Иерархическая структура МАИ для расчета экологического потенциала

потенциале создают естественнонаучную основу для разумной региональной экологической политики, совершенствования системы расселения и социальной сферы, рациональной организации труда и отдыха, охраны здоровья населения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-07-12080 офи_м, РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта 14-45-04097 р_сибирь_а, гранта Русского географического общества № 11/2015-Р.

Ключевые слова: геоинформационное моделирование, экологический потенциал, Байкальская Сибирь, SRTM, NDVI, EVI.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов А.В., Соколова Л.П. Экологический потенциал растительности как фактор природопользования в Байкальской Сибири // География и природные ресурсы. – 2014. – № 3. – С. 53-60.
2. Владимиров И.Н. Геоинформационное моделирование лесной растительности Северо-Западного Прибайкалья (опыт применения алгоритмов классификации геоизображений) // Геодезия и картография. – 2012. – № 9. – С. 30-35.
3. Владимиров И.Н. Динамика верхней границы леса на Байкальском хребте // Известия Иркутского государственного университета. Сер. Науки о Земле. – 2014. – Т. 10, № 4. – С. 46-57.
4. Владимиров И.Н., Софронов А.П., Сороковой А.А., Кобылкин Д.В., Фролов А.А. Структура растительного покрова Западной части Верхнеангарской котловины // География и природные ресурсы. – 2014. – № 2. – С. 44-53
5. Голубець М.А. Экосистемологія / М.А. Голубець. – Львів : Поллі, 2000. – 316 с.
6. Гавриленко О.П. Екогеографія України: навчальний посібник. – К. : Знання, 2008. – 646 с.

7. Исаченко А.Г. Экологическая география России. – СПб. : Изд-во Санкт-Петербург. ун-та, 2001. – 326 с.
8. Исаченко А.Г. Введение в экологическую географию : учебное пособие. – СПб. : Изд-во Санкт-Петербург. ун-та, 2003. – 192 с.
9. Кравцова В.И., Лошкарева А.Р. Динамика растительности экотона тундра-тайга на Кольском полуострове в связи с климатическими колебаниями // Экология. – 2013. – № 4. – С. 275-283.
10. Кузьменко Е.И., Максютов Ш., Владимиров И.Н. Использование ландшафтной карты для оценки продуктивности геосистем южной тайги Западной Сибири // География и природные ресурсы. – 2013. – № 3. – 143-151.
11. Малышев Л.И., Пешкова Г.А. Особенности и генезис флоры Сибири (Предбайкалье и Забайкалье). – Новосибирск : Наука, 1984. – 264 с.
12. Пешкова Г.А. Растительность Сибири (Предбайкалье и Забайкалье). – Новосибирск : Наука, 1985. – 145 с.
13. Плюснин В.М., Сороковой А.А. Геоинформационный анализ ландшафтной структуры Байкальской природной территории / В.М. Плюснин, А.А. Сороковой ; отв. ред. В.А. Снытко. – Новосибирск : Гео, 2013. – 187 с.
14. Продовольственная безопасность: термины и понятия: энцикл. справочник, термины и понятия / В.Г. Гусаков [и др.]. – Минск : Белорус. наука, 2008. – 535 с.
15. Реймерс Н.Ф. Природопользование : словарь-справочник. – М. : Мысль, 1990. – 637 с.
16. Сочава В.Б. Растительный покров на тематических картах. – Новосибирск : Наука, 1979. – 190 с.
17. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. – Новосибирск : Наука, 1978. – 320 с.
18. Об охране озера Байкал : федеральный закон Рос. Федерации от 01.05.1999 № 94-ФЗ (ред. от

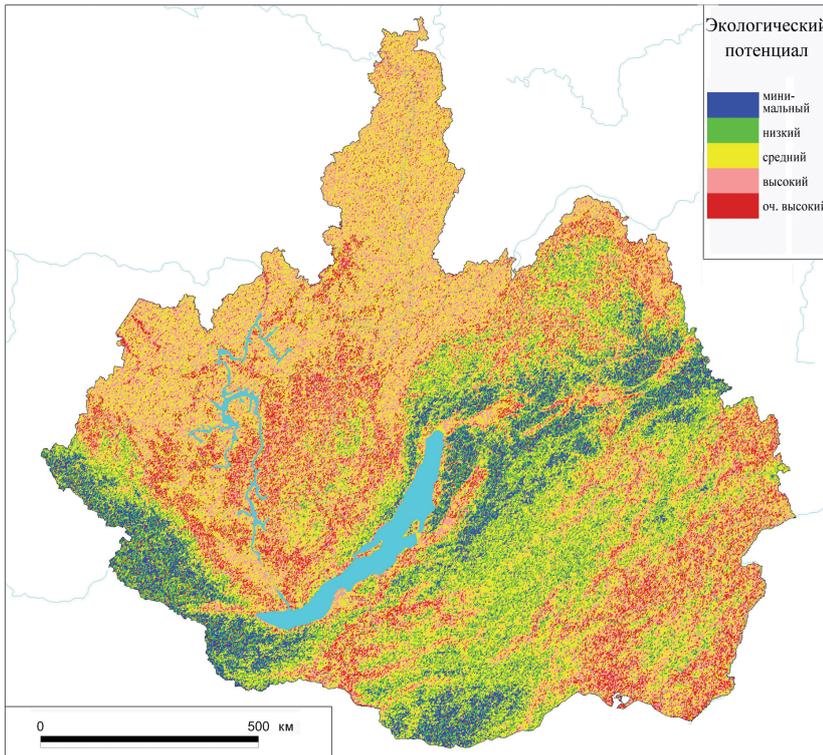


Рис. 3. Экологический потенциал Байкальской Сибири

28.06.2014 с изменениями, вступившими в силу с 11.07.2014) : принят Гос. Думой Федер. Собр. Рос. Федерации 02 апр. 1999 г. : одобр. Советом Федерации Федер. Собр. Рос. Федерации 22 апр. 1999 г. – URL: <http://grn.gov.ru/node/4145> (дата обращения: 12.03.2015).

19. Черепанов А.С. Вегетационные индексы // Геомастика. – 2011. – №2. – С. 5.

20. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геомастика. – 2009. – № 3. – С. 5.

21. Heinsch F.A., Reeves M., Votava P., Kang S., Milesi C., Zhao M., Glassy J., Jolly W.M., Loehman R., Bowker C.F., Kimball J.S., Nemani R.S., Running S.W. User's Guide. GPP and NPP (MOD17A2/A3) Products NASA MODIS Land Algorithm. – MT : Missoula : University of Montana, 2003. – 57 p. – URL: <http://www.ntsg.umt.edu/sites/ntsg.umt.edu/files/modis/MOD17UsersGuide.pdf> (дата обращения: 18.03.2015).

22. Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.G., Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // International Journal of Climatology. – 2005. – Vol. 25, Issue 15. – P. 1965-1978.

23. Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X., Ferreira L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices // Remote Sensing of Environment. – 2002 – Vol. 83, Issues 1. – P. 195-213.

24. Luedeling E., Buerkert A. Typology of oases in northern Oman based on Landsat and SRTM imagery

and geological survey data // Remote Sensing of Environment. – 2008. – Vol. 112, Issue 3. – P. 1181-1195.

25. Myneni R.B., Hall F.G., Sellers P.J., and Marshak A.L. The interpretation of spectral vegetation indexes // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1995. – Vol. 33, Issue 2. – P. 481-486.

26. Richardson A.J., Wiegand C.L. Distinguishing vegetation from soil background information // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1977. – Vol. 43, Issue 12. – P. 1541-1552.

27. Running S.W., Thornton P.E., Nemani R.R., Glassy J. Global terrestrial gross and net primary productivity from the Earth Observing System // Methods in Ecosystem Science. – NY : Springer-Verlag, 2000. – P. 44-57.

28. Saaty T.L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. – New York ; London : McGraw-Hill International Book Co, 1980. – 287 p.

29. Tucker C.J., Sellers P.J. Satellite remote-sensing of primary production // International Journal of Remote Sensing. – 1986. – Vol. 7, Issue 11. – P. 1395-1416.

30. White M.A., Thornton P.E., Running S.W., Nemani R.R. Parameterization and sensitivity analysis of the Biome-BGC terrestrial ecosystem model: Net primary production controls // Earth Interactions. – 2000. – Vol. 4, Issue 3. – P. 1-85.

31. Vladimirov I.N. Predictive mapping of the restoration-age dynamics of taiga forests on the basis of remote sensing data and geographical knowledge // Applied Ecology and Environmental Research. – 2014. – Vol. 12(4). – P. 807-824.