

**ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ
ГЕОСИСТЕМНЫХ ФУНКЦИЙ НАКОПЛЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО ЗАПАСА
ГОРНО-ТАЕЖНЫМИ ЛЕСАМИ ПРИБАЙКАЛЬЯ
В ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЕ**

На основе ландшафтной ГИС Прибайкалья и цифровой модели рельефа оценивается потенциальный запас углерода в растительном покрове и прогнозируется его изменение при потеплении климата. Предложена математическая модель зависимости значений геосистемных функций от высотного градиента для экстраполяции данных с использованием ГИС. Разработан алгоритм автоматизированного картографирования пространственного распределения запаса углерода и его изменения.

Ключевые слова: геосистемная функция, ландшафтная ГИС, моделирование запаса углерода.

Для решения задачи регулирования концентрации углекислого газа в атмосфере необходимо выяснить тенденции и скорости изменения углеродного баланса Земли с учетом влияния региональных и местных природных и антропогенных факторов. Требуется определить составляющие углеродного запаса. Для этого используются методы экспериментальных и натуральных исследований, а также различные методы моделирования. Наиболее значимыми параметрами воздействия, которые необходимо учитывать в прогнозных моделях баланса углерода – климатические характеристики, изменяющиеся от места к месту и во времени. По этой причине для математического описания подобных процессов и связей необходима модель с распределенными параметрами, в которой главные характеристики геосистем являются функциями пространственных координат и зависят от влияния окружающих элементов исследуемой системы. В сбалансированных со средой геосистемах климатические, вертикальные и латеральные влияния комплексно отражаются в ландшафтно-типологической структуре фаций и геомов, в которых формирование местных структур и функций определено свойственными им природными режимами. Это, в частности, относится к реализации внутрисистемного и внешнего круговорота углерода как одного из проявлений геосистемного метаболизма вещества, энергии и информации.

Важное место в долговременной фиксации атмосферного углерода занимает лесная растительность, в частности бореальные экосистемы, представляющие различные проявления зональных (равнинных) и азональных (горных) таежных геосистем Северной Азии и Америки. Высотно-поясная дифференциация ландшафтов определяет специфическую структуру баланса углерода каждого местоположения, зависящую от высоты местности, экспозиции, геологических пород и зонально-фоновых климатических условий, постепенно изменяющихся в соответствии с глобальными тенденциями потепления. Необходимо с использованием ландшафтных ГИС, цифровых карт рельефа и дополнительной фактологической информации рассчитать пространственное распределение компонентов углеродного баланса, основываясь на географических закономерностях, отраженных в моделях изменчивости геосистемных функций.

Геосистемная функция обеспечивает взаимодействие компонентов географического комплекса друг с другом и со средой. Геосистемные функции определяют функциональную роль и показатели интенсивности процессов функционирования геосистем определенного типа и иерархического уровня на территории. Геосистемные, или свойственные, функции в разном проявлении характерны каждой геосистеме и отражают закономерности воздействия факторов среды на реакцию геосистемы и ее частей, которое изучается различными моделями и

методами. К геосистемным функциям относятся, например, средоформирующая, водорегулирующая, воспроизводственная, утилизирующая, ассимилирующая и т. д.

Модели и методы

Для математического моделирования функций ассимиляции и выделения углерода в углеродных циклах используются различные методы и модели. Предлагаемые модели углеродного баланса разделяются на планетарные [1–4], материковые [5], региональные [6–8], локальные [9], экосистемные [10–12], отдельных компонентов экосистемы [13]. Большинство из существующих моделей относятся к классу имитационных, т. е. отражающих концептуальные представления авторов с помощью алгебраических и дифференциальных уравнений балансов и потоков [14].

Хорошо известна модель углеродного бюджета CBM-CFS, разработанная Лесной службой Канады [15–17]. В частности, она применялась для оценки и прогноза углеродного бюджета лесов штата Альберта в Канаде [18] и Вологодской области [7]. Для модельной оценки запасов наземной биомассы, лесной подстилки и почвенного углерода в переходной зоне бореальных лесов на западе Альберты использовались данные лесоустройства, полевых наблюдений на постоянных площадях и почвенном полигоне. В работе О. Г. Чертова с соавт. [19] на основе модели динамики органического вещества почвы (SOMM) с использованием данных по почвенному углероду, материалов лесоустройства и метеорологической информации дан долговременный прогноз накопления углерода в почве с учетом изменения возрастной структуры лесов и климата для подзоны южной тайги в границах Ленинградской области. Для европейской территории России предложена модель в обобщенных показателях, описывающая источники и стоки углерода в процессах биологической и физической природы [20]. В модели Sim-CYCLE [21] принимается во внимание подразделение биомассы на части, их взаимодействие и процессы, определяющие потоки углерода. Модель достаточно универсальна: описывает динамику как тропических, так и бореальных лесов, а также других биомов.

Универсализация подходов, синтез знаний позволяет перейти от моделей объектов к моделям территорий с распределенными параметрами с картографированием результатов расчетов, в том числе с использованием ГИС-технологий. В качестве первого приближения используются простые балансовые соотношения потоков углерода и азота в растительных экосистемах и биомах, находящихся в квазистационарном состоянии [22]. По карте растительности СССР М 1 : 2 500 000 выделено 10 типов биомов, карта разделена на сеть ячеек-трапеций (1 × 1 градус²), для которой создана база пространственных данных по характеристикам биомов на территорию России. Количество углерода чистой первичной продукции фитомассы $C_{НРР}$, например, рассчитали и картографировали, используя данные NASA по приходу и поглощению фотосинтетически активной радиации (ФАР) растительным покровом [23]. Остальные компоненты углеродного баланса определялись по картографической информации и отчетным данным.

Модели и методы, использованные разными авторами при картографировании составляющих углеродного баланса, основываясь на типизации моделей при полисистемном моделировании [24], можно разделить на несколько групп (рис. 1), применяющихся при решении соответствующих задач.



Рис. 1. Применение разных типов моделей для решения различных исследовательских задач

Классификационные модели используются для типизации ситуаций, синтеза информации методами многомерной статистики для построения легенды карты и картографирова-

ния. Например, оценка (с 69 % точностью) географического распределения углерода почвенной органики проводилась [25] на основе дистанционных космических данных, базы данных ГИС и моделирования дерева принятия решений – классификационных деревьев, построенных по 17 ландшафтным и геоморфологическим признакам с применением цифровой карты рельефа. Пространственная дифференциация экологических ситуаций задается классами бонитета (*site index*), которые картографируются с использованием данных дистанционного зондирования Земли [26].

Модели клеточных автоматов полезны при анализе пространственных конкурентных отношений и смещении границ геосистем при колебаниях климата [27; 28]. Модели механизмов регулирования хорошо описывают восстановительно-возрастную динамику лесных экосистем как переход из возмущенного состояния к равновесному. В этом процессе происходит серьезное перераспределение первичной продукции и запасов углерода по компонентам лесного сообщества. Модели динамики (*process-based growth model*) описывают процессы метаболизма в экосистемах, распределение потоков углерода по пулам в зависимости от местных условий [29; 30]. Пространственная распределенность переменных таких моделей может быть оперативно обеспечена космическими снимками, по которым определяется значение поглощенной фотосинтетически активной радиации [31].

Факторальные (функциональные) модели описывают реакцию экосистем на воздействие различных факторов. Обычно это функции прямого градиентного анализа [32], часто представляющие собой эмпирико-статистические уравнения. Такие уравнения, в частности, предлагаются для прогнозных оценок изменения компонентов углеродного баланса и влияния лесных экосистем на обмен углерода земной поверхности с атмосферой [8]. Такого рода модели используются для описания коэффициентов динамических моделей как функций влияния различных факторов среды и в целом отображения закономерностей взаимодействия в экосистеме.

Модели комплексов отображают организмы, растительные сообщества и ландшафты как системы информационного баланса между структурами и функциями разных компонентов, обеспечивающие их целостность. Они устанавливают подобие между ними, позволяя по одному образу восстанавливать другие. В частности, растения моделируются как сложные адаптивные системы, контролируемые внутренним статусом и внешней средой [33].

Один из аспектов модели комплексов предполагает существование структурного и функционального подобия компонентов геосистем, позволяющего извлекать информацию из наличных знаний о строении и развитии этих компонентов. Принцип подобия проявляется в моделях разного типа, что дает возможность переводить модели одного компонента в расчетные модели других. Например, пусть $P_i(x)$ – распределение площади района исследования по геомам i и по высоте x . Необходимо найти функцию $F_i(x)$ распределения фитомассы и запасов углерода в растительности разных геомов i с учетом высоты местоположения x . При этом предполагается, что встречаемость и продуктивность определенным образом взаимосвязаны так, что более продуктивные в условиях x сообщества и соответствующие геомы чаще встречаются на высоте x . Такой подход, в частности, отражается в классификации геомов, в которой выделяются высотные пояса горной тайги оптимального, ограниченного и редуцированного развития по производительности биоты.

Удобным во всех отношениях методом изучения связи показателей продуктивности является степенное (аллометрическое) соотношение [34] $y = ax^b$, представляющие модель функционального типа, устанавливающую связь причины x (фактора) и следствия y (реакции). В основе получения этого соотношения лежит общая схема теории подобия и биологического подобия в частности [35; 36].

Подобие функций $P_i(x)$ и $F_i(x)$ может быть задано отношением сравнения $F_i/F_{mi} = (P_i/P_{mi})^b$, где P_{mi} – наибольшая встречаемость высоты для данного геома (мода распределения); F_{mi} – запас фитомассы растительности геома (см. в таблице); b – коэффициент изменения формы зависимости. Значения F_{mi} и P_{mi} выступают в данном случае в качестве единиц измерения. Предполагается, что положение $x = x_{mi}$ максимумов двух кривых совпадает. При различии положения мод для сравнения кривых модальные значения смещаются на соответствующую величину Δx и уравнения связи

$$F_i(x)/F_{mi} = a [P_i(x + \Delta x)/P_{mi}]^b. \quad (1)$$

В итоге использование подобия функций требует знания как минимум значений $P_i(x)$, P_{mi} , F_{mi} , a , b .

Результаты исследования

Ключевой участок исследования находится на стыке Южно-Сибирской горной и Байкало-Джугджурской горно-таежной физико-географических областей – крупных подразделений физико-географического пояса с единством геологического строения и устройства подстилающей поверхности, влияющих на формирование климата [37]. Области делятся на провинции со своеобразной структурой вертикальной поясности. Ландшафты Южно-Сибирской горной области находятся в сфере проникновения центрально-азиатских влияний в среду сибирской горной тайги, и для них характерно сочетание гумидных и полуаридных геосистем.

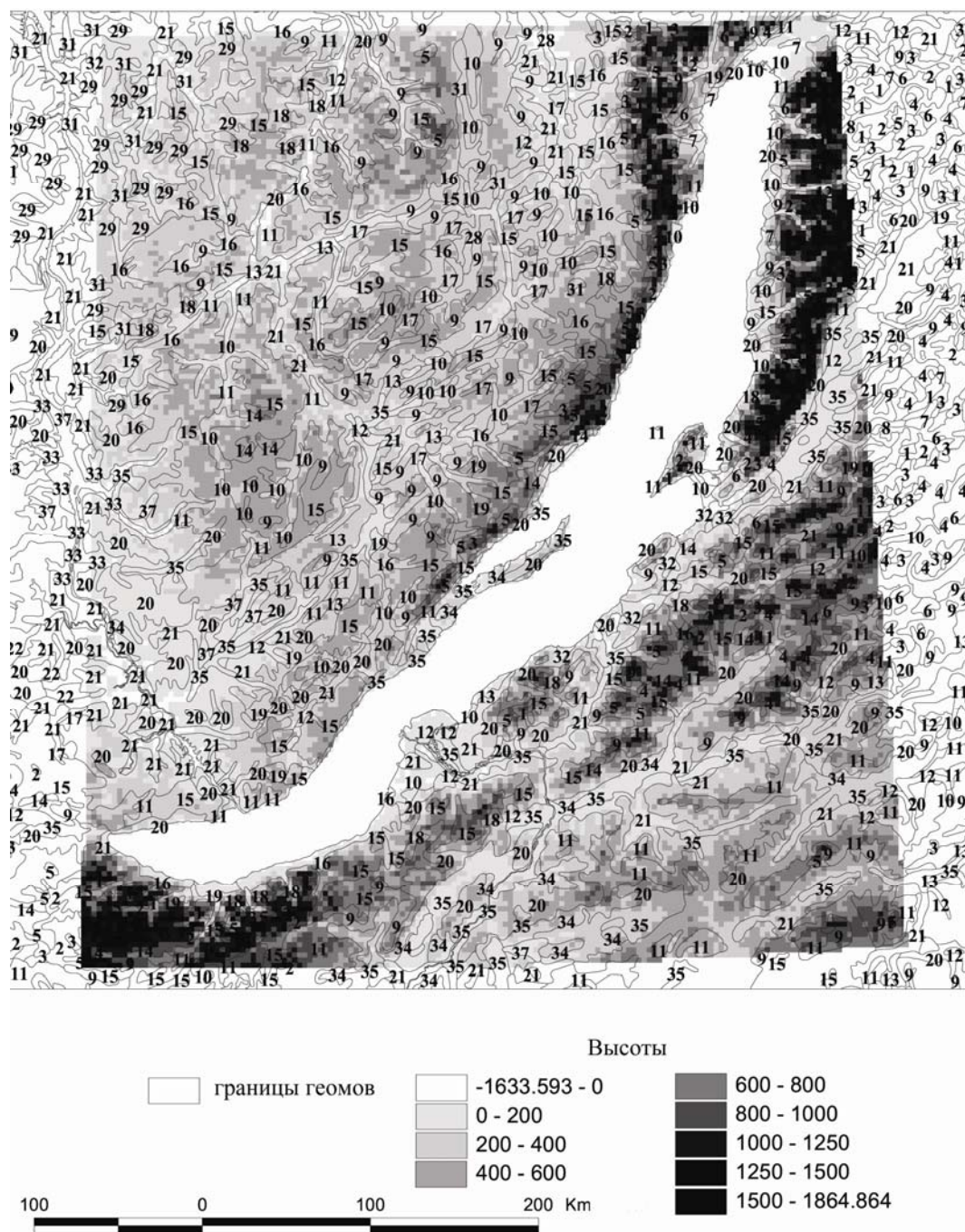


Рис. 2. Территория исследования с отображением ландшафтно-типологических данных и высотных отметок. Цифрами указаны геоморфы (см. таблицу)

Ландшафты Байкало-Джугджурской горнотаежной области находятся под удаленным воздействием муссонного климата Дальнего Востока [38]. Сочетание зональных, секторальных и высотно-поясных закономерностей влияния географических факторов создает на территории разнообразие геосистем разного типологического ранга, отраженных на известной карте ландшафтов юга Восточной Сибири [39].

Проверка гипотезы проводилась по материалам: 1) ГИС ландшафтной карты [40] на участке в окружении оз. Байкал (участок 464×558 кв. км, координаты левой верхней точки $56^{\circ}01'$ с.ш., $103^{\circ}51'$ в.д.); 2) цифровая карта рельефа – производная от SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) с разрешением по горизонтали 2 330 м (рис. 2). Анализировались частотные распределения встречаемости ареалов геомов по высотному градиенту. Средствами ГИС рассчитывалось распределение площади геомов по высоте с шагом 100 м. Высотные характеристики варьируют от 0 (урез воды оз. Байкал) до 2 246 м. Расчеты проводились по 19 градациям высоты, где встречается более одного геомы. На территории исследования отмечено 29 геомов (см. таблицу). По площади преобладают горнотаежные лиственничные (IX) и темнохвойные (XV) ограниченного развития и горнотаежные сосновые (XX) леса.

На рис. 3 показаны кривые распределения площади некоторых геомов по высотным градиентам, в таблице дан список геомов с указанием их количественных характеристик. С ростом высоты мода распределения P_{mi} снижается, оно становится более выположенным. Связь P_{mi} с положением моды x_{mi} отрицательная и нелинейная: $\ln P_{mi} = -0,55 \ln x_{mi} + 1,97$ ($R^2 = 0,80$).

Для проверки уравнения (1) сравнивались частотные распределения площади геомов $P_i(x)$, центрированные относительно положения моды и нормированные на ее значение $p_i(x) = P_i(x)/P_{mi}$. Величины $p_i(x)$ попарно сравнивались в порядке возрастания x_{mi} в логарифмическом масштабе $\ln p_j = b_{ij} \ln p_i + \ln a_{ij}$. Вычисленные коэффициенты регрессии b_{ij} ($R^2 > 0,8$) варьируют вокруг среднего значения $b = 1,006$, рассчитанного без «выскакивающих» (на уровне $p > 0,99$) показателей. Средняя величина $\ln a = -0,056$ и $a = 0,94$. Таким образом, между нормированными и центрированными значениями частоты распределения разных геомов по высотному градиенту имеет место простая зависимость, близкая к тождеству $p_j(x) = p_i(x)$. Это хорошо прослеживается на графике в полулогарифмическом масштабе (рис. 4). В исходной форме эта зависимость имеет вид $P_j(x)/P_{mj} = P_i(x + \Delta x)/P_{mi}$.

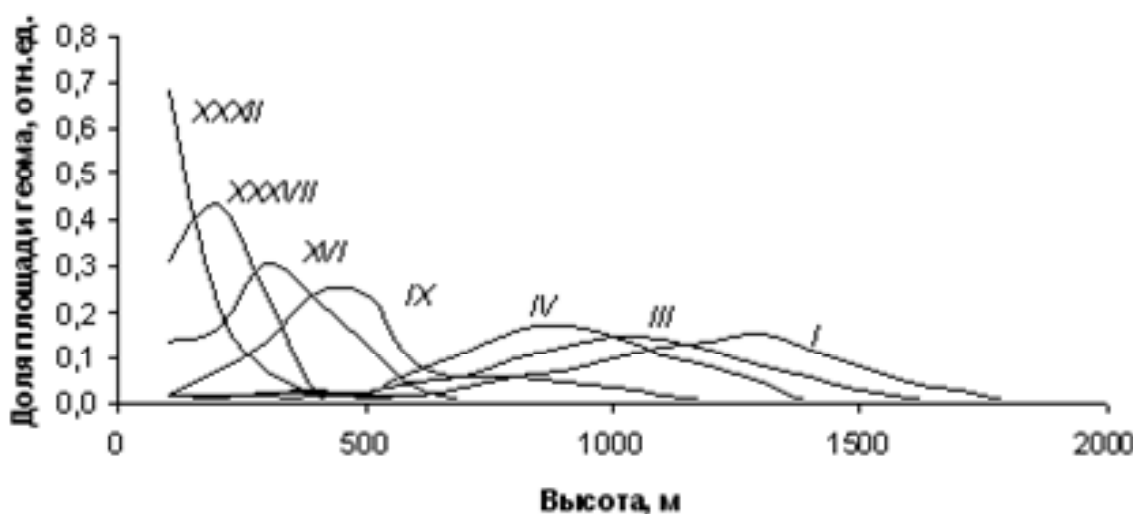


Рис. 3. Кривые распределения площади геомов по градиенту высоты (названия геомов I–XXXVII см. в таблице)

Характеристики геомов Прибайкалья и соответствующей им потенциальной растительности

| Геом | Геомы и их потенциальная растительность | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------|--|------|-------|------|-------|
| I | Гольцовые альпинотипные (альпийские формации) | 2,0 | 1 300 | 15,3 | 16,8 |
| II | Гольцовые тундровые (горно-тундровые формации растительности) | 2,4 | 1 200 | 13,6 | 12,8 |
| III | Подгольцовые кустарниковые (предтундровые заросли кустарника) | 1,8 | 1 000 | 14,9 | 26,5 |
| IV | Подгольцовые лиственнично-редколесные и каменноберезовые (лиственничные редколесья) | 1,0 | 900 | 17,1 | 39,1 |
| V | Подгольцовые темнохвойно-редколесные (темнохвойные редколесья) | 2,0 | 1 000 | 14,4 | 71,5 |
| VI | Горнотаежные лиственничные редуцированного развития (горнотаежные лиственничные и сосновые леса) | 0,4 | 800 | 17,1 | 156 |
| VII | Межгорных понижений и долин таежные лиственничные редуцированного развития (подгорно-котловинные лиственничные леса) | 0,1 | 500 | 14,2 | 111 |
| VIII | Межгорных понижений и долин таежные темнохвойные редуцированного развития (еловые редколесья) | 0,1 | 1100 | 22,6 | 66,7 |
| IX | Горнотаежные лиственничные ограниченного развития (горнотаежные лиственничные и сосновые леса) | 8,4 | 400 | 24,4 | 176 |
| X | Межгорных понижений и долин таежные лиственничные ограниченного развития (болотная растительность, ерники, луга, разреженные лиственничные леса) | 3,6 | 200 | 14,5 | 86,6 |
| XI | Горнотаежные лиственничные оптимального развития (горнотаежные лиственничные леса) | 9,7 | 500 | 14,2 | 197 |
| XII | Подгорные и межгорных понижений лиственнично-таежные оптимального развития (подгорно-котловинные лиственничные леса) | 1,7 | 100 | 57,2 | 152 |
| XIII | Подгорные подтаежные лиственничные (лиственничные леса) | 1,2 | 400 | 31,6 | 111,5 |
| XIV | Горнотаежные темнохвойные редуцированного развития (горнотаежные темнохвойные леса) | 1,1 | 800 | 23,5 | 98 |
| XV | Горнотаежные темнохвойные ограниченного развития (горнотаежные темнохвойные леса) | 19,0 | 500 | 25,4 | 131 |
| XVI | Подгорные и межгорных понижений таежные темнохвойные ограниченного развития (горнотаежные темнохвойные) | 4,6 | 400 | 21,8 | 66,7 |
| XVII | Подгорные и межгорных понижений таежные кедрово-лиственничные ограниченного развития (болотная растительность, ерники с кедром и лиственницей) | 3,0 | 300 | 30,6 | 73,9 |
| XVIII | Горнотаежные темнохвойные оптимального развития (горнотаежные темнохвойные леса) | 2,2 | 400 | 20,7 | 117,3 |
| XIX | Подгорные и межгорных понижений таежные темнохвойные оптимального развития (темнохвойные леса) | 1,1 | 300 | 24,8 | 107,5 |
| XX | Горнотаежные сосновые (сосновые и лиственнично-сосновые леса) | 16,0 | 400 | 20,9 | 149,2 |
| XXI | Подгорные подтаежные сосновые (сосновые и лиственнично-сосновые леса) | 6,8 | 100 | 38,3 | 159 |
| XXVIII | Среднетаежные лиственничные на равнинах (лиственничные леса) | 0,2 | 300 | 42,6 | 153 |
| XXIX | Южнотаежные темнохвойные возвышенностей (темнохвойные леса) | 2,3 | 200 | 44,7 | 102,1 |
| XXXI | Сосновые боровые равнин и долин олиготрофно-ксеро-мезофитного режима (подтаежные сосновые и лиственнично-сосновые леса) | 1,6 | 200 | 39,2 | 79 |
| XXXII | Подтаежные на приподнятых равнинах и плато лиственничные и сосновые (лиственничные и сосновые леса) | 0,4 | 100 | 68,4 | 173 |
| XXXIII | Подгорных равнин лугово-степные разнотравно-крупнозлаковые (лугово-степные разнотравно-крупнозлаковые) | 0,2 | 100 | 81,7 | 7,4 |
| XXXIV | Склоновые остепненно-луговые мелкозлаково-кобрезиевые (остепненно-луговые мелкозлаково-кобрезиевые) | 1,7 | 300 | 33,4 | 7,1 |
| XXXV | Днищ котловин (подгорные) крупнозлаковые ковыльно-житняковые (крупнозлаковые ковыльно-житняковые) | 5,0 | 200 | 29,6 | 6,3 |
| XXXVII | Плакорные разнотравно-тырсовые (разнотравно-тырсовые) | 0,4 | 200 | 43,2 | 5,8 |

Обозначения: 1 – доля площади геомов на территории исследования, %; 2 – модальная высота расположения геомов, м; 3 – модальная частота встречаемости геомов, %; 4 – фитомасса растительного покрова, т/га.

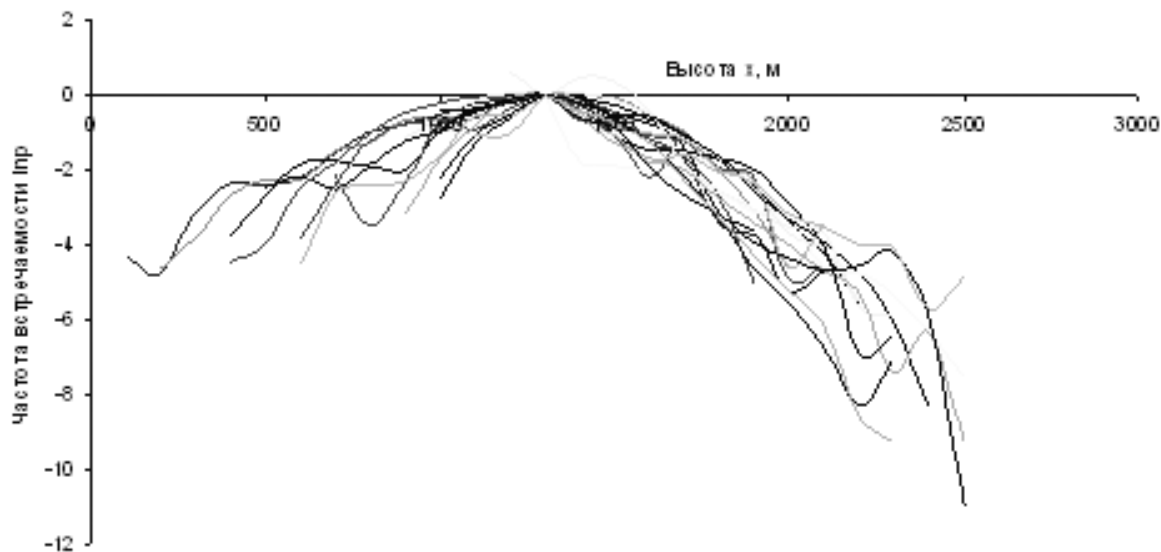


Рис. 4. Нормированные и центрированные относительно геоба I кривые. Распределение площади разных геобов по градиенту высоты

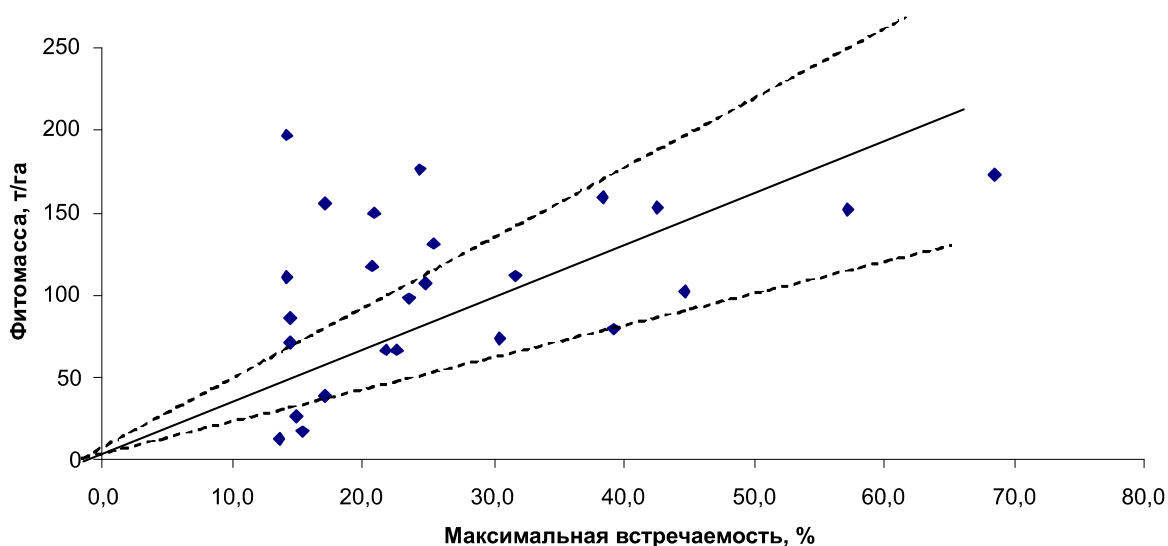


Рис. 5. Зависимость суммарной фитомассы разных геобов F_{mi} (т/га) от модальной встречаемости P_{mi} (% на 100 м) геобов североазиатских гольцовых и таежных геосистем на территории. Линиями показана основная тенденция связи и доверительные интервалы (пунктир)

Распространяя этот результат на подобие разных функциональных связей $F_i(x)/F_{mi} = P_i(x + \Delta x)/P_{mi}$, можно решать различные задачи экстраполяции $F_i(x) = F_{mi} \cdot P_i(x + \Delta x)/P_{mi}$, для чего требуется знать модальные величины оцениваемых переменных F_{mi} , например, запас фитомассы по каждому геому. Для растительности геобов (см. таблицу) на основе литературных данных [41–46] определялась характерная суммарная фитомасса F_{mi} , которая сравнивалась с модальными значениями частотных распределений P_{mi} (рис. 5). Имеется разброс значений фитомассы, особенно по высокогорным ландшафтам. Ее наименьшие значения линейно возрастают с увеличением P_{mi} . Приняв эту тенденцию за основную и закономерно полагая, что при $P_{mi} = 0$ будет $F_{mi} = 0$, ищем зависимость $F_{mi}(P_{mi})$ в виде пропорциональной связи $F_{mi} = kP_{mi}$. Сначала определим коэффициент k для геобов со значениями $P_{mi} > 30\%$: $k = 2,9 \pm 0,8$. Затем рассчитаем остальные величины k и отберем те, которые достоверно ($p > 0,99$) попадают в указанный доверительный интервал [2,1; 3,7]. С

учетом этих данных $k = 2,98 \pm 0,26$. Следовательно, можем принять $F_i(x) = kP_i(x + \Delta x)$ и рассчитать высотное распределение фитомассы по распределениям площадей геомов по формуле $F_i(x) = 2,98P_i(x)$. С учетом коэффициента 0,45 содержание углерода в фитомассе $f_i(x) = 1,34P_i(x)$. Для степных геосистем со сходными значениями P_{mi} между фитомассой степей и лесов имеется зависимость $F_{mi}(\text{степи}) = (0,05 \pm 0,02)F_{mi}(\text{леса})$. Тогда содержание углерода рассчитывается по формуле $f_i(x)_{cm} = 0,067P_i(x)$.

Таким образом, для вычисления углеродного запаса в конкретном местоположении необходимо для гольцовых и горнотаежных геосистем использовать ландшафтную карту с ареалами геомов (переменная i) и цифровую карту рельефа (переменная x). По этим параметрам и имеющимся распределениям определяется величина $P_i(x)$ (в процентах) и вычисляется содержание углерода в расчете на 1 га по формулам $f_i(x) = 1,34P_i(x)$ для гольцовых и горнотаежных геосистем и $f_i(x)_{cm} = 0,067P_i(x)$ для степных геосистем.

На рис. 6 представлена карта распределения углеродного запаса по части территории исследования. Она отражает значения запаса, близкого к минимальному, для потенциальной растительности разных геомов. Наибольший запас характерен условиям геома подгорных и межгорных понижений лиственничной тайги оптимального развития (XII) на высотах 100–200 м.



Рис. 6. Распределение запаса углерода на территории южного Прибайкалья

Разработанная модель позволяет проводить оценку изменения запаса углерода в условиях смены климатических характеристик. В качестве примера воспроизведено возможное изменение запаса углерода при потеплении среднегодовой температуры на 1°C . По данным [29] рассчитана высота смещения (равная 166 м) положения снеговой линии $\Delta h/\Delta t$ относительно ее современного уровня для хр. Хамар-Дабан – $h = 1\,630$ м при повышении средней температуры на 1°C . Степень влияния повышения температуры увеличивается с высотой, поэтому значение высоты умножается на коэффициент 1,1. Данный коэффициент рассчитан с учетом

смещения высоты снеговой линии $(1630+166)/1630=1,1$. На основании преобразованных значений высоты вычисляется изменение запаса углерода на ключевом участке по приведенной методике (рис. 7).

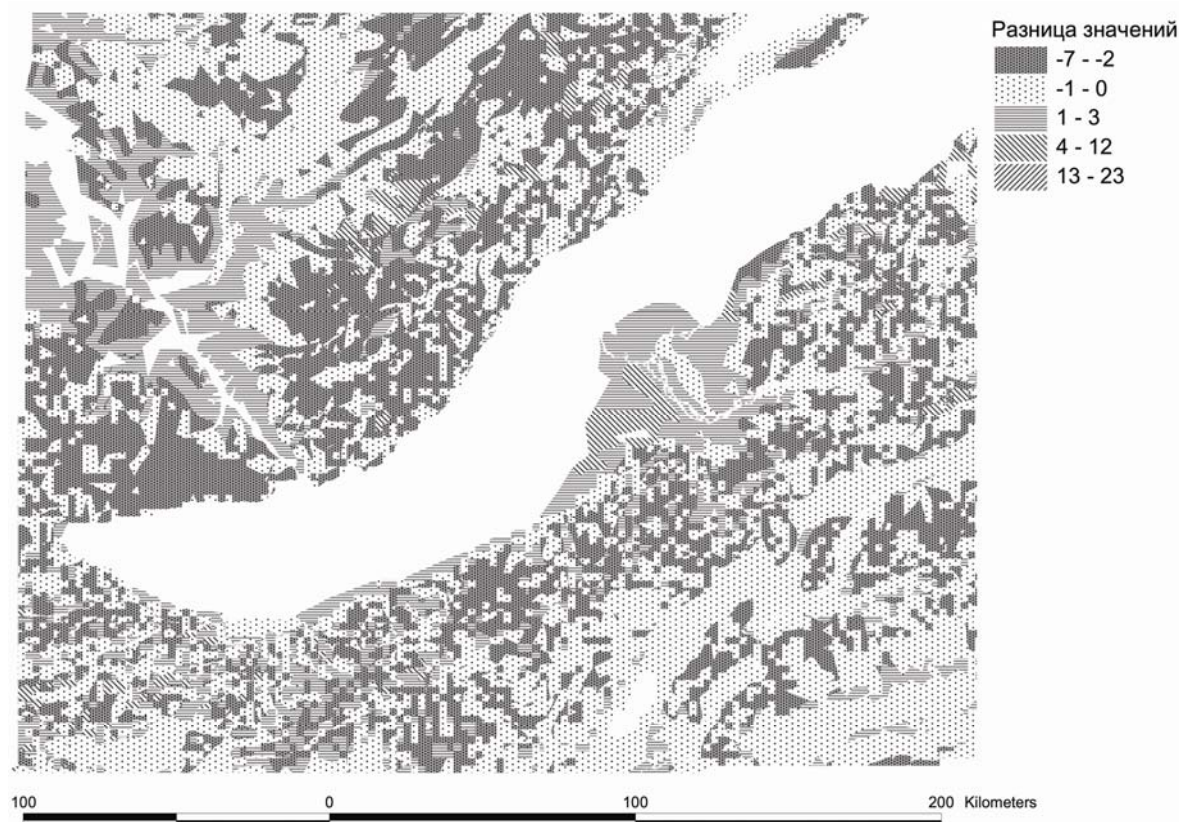


Рис. 7. Изменение запаса углерода (т/га) на территории южного Прибайкалья при потеплении среднегодовой температуры на 1°C

Положительный прирост фитомассы (на 16,7 % площади) ожидается в экосистемах речных долин, что соответствует их ведущей функции в ландшафте, связанной с воспроизводством и накоплением органики и сохранением биологического разнообразия. Области с отрицательным приростом фитомассы (от -2 до -7 т/га, 39 % площади) в основном соответствуют горно-таежным лесам, преимущественно из светлохвойных пород. Снижение запасов следует рассматривать как показатель дополнительного риска нормального функционирования в ландшафте геомов данного вида и их возможной смены на другие геомы, более приспособленные к новым климатическим условиям и более продуктивные в таких условиях.

Обсуждение результатов

Геоинформационные технологии позволяют быстро и в разных вариантах рассчитывать распределения показателей по встречаемости в разрезе различных пространственных характеристик, например, по высотному градиенту. Это дает новую информацию для развития интересного направления – функциональной географии, в основе которой лежат известные методы прямого и косвенного градиентного анализа факториальной экологии и представления о факториально-динамических рядах геосистем. Кроме методов многомерной статистики, для решения задач типизации и идентификации геосистем появляется возможность создавать и проверять на конкретном материале модели геосистемных функций связи различных географических характеристик. Если эти связи регламентируются общими закономерностями, то на основе принципов подобия (гомологии) имеется возможность одни кривые трансформировать в другие с учетом специфики местоположения. Географические особенности места задаются размещением объекта в распределении географических явлений на территории по

влияющему признаку, в частности кривой встречаемости ареалов геомов по градиенту высоты. Нормированные по отношению к моде и центрированные относительно некоторой высоты, кривые распределений оказываются близки по форме, а нормированные значения функций распределений – пропорциональны. Это говорит об общности действия законов географического варьирования признаков, когда основная площадь геомов данного вида концентрируется на высоте, соответствующей положению моды, а все отклонения связаны с различием экспозиции, составом материнских пород, влажностью почвы и т. д. Здесь проявляется информационная сущность показателей P_{mi} и x_{mi} , в логарифмическом масштабе линейно связанных между собой ($\ln P_{mi} = -0,55 \ln x_{mi} + 1,97$). Понятно, что при изменении фоновых климатических условий значение x_{mi} как индикатор природы геома не будет изменяться, а изменится условное положение конкретного места, например, при потеплении климата верхняя граница леса поднимется вверх.

При наличии подобных закономерностей нет необходимости знать закон формирования кривых распределений, создавать математические модели явлений, а требуется одну из этих кривых принять в качестве базы сравнения (инварианта), а остальные восстановить с применением гомотопических индексов P_{mi} или x_{mi} . В этом заключается сущность сравнительно-географического моделирования, применимого не только при сравнении распределений, но и в более сложных исследовательских ситуациях. Это одно из направлений развития комплексной географии, основанной на подобии и индикации геосистем, их компонентов и характеристик.

В данном случае результатом исследования являются карты запасов углерода в фитомассе растительности Прибайкалья и изменение запаса в условиях смены климатических характеристик, являющиеся производными от ландшафтной карты территории и цифровой карты рельефа и составленные при помощи средств ГИС, воплощающих логику перехода от одних географических характеристик и закономерностей к другим. Реализуется алгоритм экстраполяции данных и знаний на территорию, с основой на информационной комплексности географических систем.

Список литературы

1. Костицын В. А. Эволюция атмосферы, биосферы и климата. М.: Наука, 1984. 96 с.
2. Тарко А. М. Система моделей глобальных биогеохимических циклов в биосфере, 2002. URL: http://www.ccas.ru/tarko/co2_r.htm/.
3. Lenihan J., Daly C., Bachelet D., Neilson R. Simulating broad-scale fire severity in a dynamic global vegetation model // Northwest Science. 1998. Vol. 72. P. 91–103.
4. Daly C., Bachelet D., Lenihan J., Neilson R., Parton W., Ojima D. Dynamic simulation of tree-grass interactions for global change studies // Ecological Applications. 2000. Vol. 10(2). P. 449–469.
5. Mingkui Cao, Woodward F. Ian Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change // Nature. 1998. Vol. 393. P. 249–252.
6. Чебакова Н. М., Монсеруд Р. А., Денисенко О. В. и др. Приложения модели сибирской растительности к пространственно-временным исследованиям взаимосвязей растительности и климат // Лесоведение. 1999. № 2. С. 3–12.
7. Замолодчиков Д. Г., Грабовский В. И., Коровин Г. Н. и др. Оценка и прогноз углеродного бюджета лесов Вологодской области по канадской модели СВМ-CFS // Лесоведение. 2008. № 6. С. 3–14.
8. Коломыц Э. Г., Шарая Л. С., Сурова Н. А. Прогнозное моделирование углеродного баланса лесных экосистем Волжского бассейна при глобальном потеплении // География и природные ресурсы. 2010. № 1. С. 3–10.
9. Zolbrod A. N., Peterson D. L. Response of high-elevation forests in the Olympic mountains to climatic change // Can. J. For. Res. 1999. Vol. 29. P. 1966–1978.
10. Parton W. J., Scurlock J. M. O., Ojima D. S., et al. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide // Global Biogeochemical Cycles. 1993. Vol. 7. P. 785–809.

11. *Тутлянова А. А.* Режимы биологического круговорота углерода, 2001. URL: <http://www.ict.nsc.ru/ws/Lyap2001/2074/>.
12. *Tesarova M.* Organic matter distribution in some grassland ecosystems // *Ecologia (CSSR)*. 1983. № 2. P. 155–172.
13. *Недорезов Л. В., Макарова Т. Л., Макаров П. Н.* Сукцессионная модель Forska-mod динамики лесов бореальной зоны // *Сибирский экологический журнал*. 2001. № 5. С. 529–539.
14. *Кративин В. Ф., Свирежнев Ю. М., Тарко А. М.* Математическое моделирование глобальных биосферных процессов. М.: Наука, 1982. 268 с.
15. *Kurz W. A., Beukema S. J., Apps M. J.* Estimation of root biomass and dynamics for the carbon budget model of the Canadian forest sector // *Can. J. For. Res.* 1996. Vol. 26. P. 1973–1979.
16. *Kurz W. A., Apps M. J.* A 70-year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canadian forest sector // *Ecological Applications*. 1999. Vol. 9, № 2. P. 526–547.
17. *Kurz W. A., Apps M., Banfield E., Stinson G.* Forest carbon accounting at the operational scale // *The Forestry Chronicle*. 2002. Vol. 78. P. 672–679.
18. *Banfield G. E., Bhatti J. S., Jiang H. et al.* Variability in regional scale estimates of carbon stocks in boreal forest ecosystems: results from west-central Alberta // *Forest Ecology and Management*. 2002. Vol. 169. P. 15–27.
19. *Chertov O. G., Komarov A. S., Bykhovets S. S. et al.* Simulated soil organic matter dynamics in forests of the Leningrad administrative area // *Forest Ecology and Management*. 2002. Vol. 169. P. 29–44.
20. *Golubyatnikov L. L., Denisenko E. A., Svirezhev Y. M.* Model of the total exchange carbon flux for terrestrial ecosystems // *Ecological Modelling*. 1998. Vol. 108. P. 265–276.
21. *Ito A., Oikawa T.* A simulation model of the carbon cycle in land ecosystems (Sim-CYCLE): a description based on dry-matter production theory and plot-scale validation // *Ecological Modelling*. 2002. Vol. 151. P. 143–176.
22. *Моисеев Б. Н., Алябина И. О.* Оценка и картографирование составляющих углеродного и азотного балансов в основных биомах России // *Изв. РАН. Серия География*. 2007. № 2. С. 116–127; URL: <http://www.biodat.ru/doc/lib/moiseev1.htm>.
23. *Моисеев Б. Н., Алябина И. О.* Оценка потоков и баланс органического углерода в основных биомах России // *Использование и охрана природных ресурсов в России*. 2004. № 1. С. 61–69.
24. *Черкашин А. К.* Полисистемное моделирование. Новосибирск: Наука, 2005. 280 с.
25. *Kheir R. B., Greve M. H., Bocher P. K. et al.* Predictive mapping of soil organic carbon in wet cultivated lands using classification-tree based models: The case study of Denmark // *Journal of Environmental Management*. 2010. Vol. 91, № 5. P. 1150–1160.
26. *Vega C., St-Onge B.* Mapping site index and age by linking a time series of canopy height models with growth curves // *Forest Ecology and Management*. 2009. Vol. 257, № 3. P. 951–959.
27. *Silvertown J., Holtier S., Johnson J. et al.* Cellular Automaton Models of Interspecific Competition for Space--The Effect of Pattern on Process // *The Journal of Ecology*. 1992. Vol. 80, № 3. P. 527–533.
28. *Фролов А. А., Черкашин А. К.* Эволюционное геоинформационное моделирование и картографирование // *Геодезия и картография*. 2009. № 6. С. 39–45.
29. *Landsberg J. J., Waring R. H.* A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning // *Forest Ecology and Management*. 1997. Vol. 95, № 3. P. 209–228.
30. *Ito A.* The regional carbon budget of East Asia simulated with a terrestrial ecosystem model and validated using AsiaFlux data // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2008. Vol. 148, № 5, P. 738–747.
31. *Veroustraete F., Patyn J., Myneni R. B.* Estimating net ecosystem exchange of carbon using the normalized difference vegetation index and an ecosystem model // *Remote Sensing of Environment*. 1996. Vol. 58, № 1. P. 115–130.
32. *Austin M. P.* On non-linear species response models in ordination // *Vegetatio*. 1976. Vol. 33, № 1. P. 33–41.
33. *Qu H., Zhu Q., Guo M., Lu Z.* Simulation of carbon-based model for virtual plants as complex adaptive system // *Simulation Modeling Practice and Theory*. 2010. Vol. 18, № 6. P. 677–695.

34. *Кофман Г. Б.* Рост и форма деревьев. Новосибирск: Наука, 1986. 211 с.
35. *Guenther B.* On theories of biological similarity. *Fortschritte der experimentellen und theoretischen Biophysik*, 1975. Bd 19, 107 s.
36. *McMahon T.* Size and shape in biology // *Science*. 1973. Vol. 179, № 4079. P. 1201–1204.
37. *Сочава В. Б.* Определение некоторых понятий и терминов физической географии // Доклады Института географии Сибири и Дальнего Востока. 1963. Вып. 3. С. 50–59.
38. *Сочава В. Б., Ряшин В. А., Белов А. В.* Главнейшие природные рубежи в Южной части Восточной Сибири // Докл. Ин-та географии Сибири и Д. Востока. 1963. Вып. 4, С. 19–24.
39. Ландшафты юга Восточной Сибири (карта М 1 : 1 500 000) / В. С. Михеев, В. А. Ряшин. М.: ГУГК, 1977. 4 л.
40. *Сороковой А. А.* Ландшафтная структура Байкальской природной территории (геоинформационный анализ): Дис. ... канд. геогр. наук. Иркутск, 2008. 196 с.
41. *Усольцев В. А.* Фитомасса лесов Северной Евразии: база данных и география. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 708 с.
42. *Тулохонов А. К., Пунцукова С. Д., Скулкина Н. А. и др.* Вклад лесов Бурятии в баланс стока и эмиссии углерода // География и природные ресурсы. 2006. № 2. С. 41–48.
43. *Кузьменко Е. И.* Оценка процессов накопления ассимилируемого углерода в пихтовых и сосновых лесах Ангаро-Енисейского района // География и природные ресурсы. 2004. № 3. С. 102–108.
44. *Кошурникова Н. Н.* Бюджет углерода в темнохвойных лесах южной тайги: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Иркутск: Изд-во УОП ИЛ СО РАН, 2007. 20 с.
45. *Плешиков Ф. И., Ведрова Э. Ф., Каплунов В. Я. и др.* Цикл углерода в лиственничниках Северной тайги // Докл. Акад. наук. 2003. Т. 388, № 2. С. 246–248.
46. *Рамад Ф.* Основы прикладной экологии. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 544 с.

Материал поступил в редколлегию 17.02.2011

A. K. Cherkashin, S. V. Solodyankina

**GEOINFORMATION ANALYSIS AND MODELLING OF GEOSYSTEM FUNCTIONS
OF CARBON STOCK ACCUMULATION IN MOUNTAIN FOREST
IN BAIKAL REGION AT CHANGING ENVIRONMENT**

The potential carbon stock in vegetation and its alteration in case of climate changes are estimated on the base of Baikal region landscapes GIS and digital elevation model. The mathematical model of the dependence of geosystem functions values on the elevation gradient for data extrapolation is proposed. An algorithm of geoinformation mapping spatial distribution of carbon stock and its alteration is developed.

Keywords: geosystem functions, landscape GIS, modeling of carbon stock.