

НОВЫЙ МЕТОД ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ФИТОМАССЫ ДРЕВОСТОЕВ ПРОБНЫХ ПЛОЩАДЕЙ НА ЛЕСОПОКРЫТУЮ ПЛОЩАДЬ ЛЕСХОЗА И СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ

Оценка углеродного пула в лесных экосистемах представляет собой прежде всего оценку фитомассы древостоев. Если первые попытки таких обобщений выполнялись путем простой экстраполяции данных фитомассы отдельных пробных площадей на крупные лесные регионы или на биомы, обычно с существенным завышением результата (Родин, Базилевич, 1965; Базилевич, 1993; Olson et al., 1983; Kolchugina, Vinson, 1993 а,б), то сегодня единственно приемлемым признается метод совмещения переводных коэффициентов (отношений фитомассы к запасу стволовой древесины) с банками лесостроительных данных (Макаревский, 1991; Исаев и др., 1993; Алексеев, Бердси, 1994). При этом можно выделить несколько уровней приближения к реальности.

Первый уровень приближения. Метод основан на расчете среднего значения переводного коэффициента для той или иной породы или группы пород. Умножением названного коэффициента на значения запаса стволовой древесины, полученного при лесоинвентаризации того или иного региона, определяют значения фитомассы на всей или какой-то части его лесопокрытой площади (Armentano, Ralston, 1980; Delcourt et al., 1981; Birdsey, 1992; Sampson, 1992; Kolchugina, Vinson, 1993).

Второй уровень приближения. Метод включает расчет среднестатистического переводного коэффициента, дифференцированного по породам и возрастным группам (Макаревский, 1991; Исаев и др., 1993; Алексеев, Бердси, 1994), а если деление по породам и возрастным группам невозможно (например, в тропических лесах), то переводной коэффициент дифференцируется по величине среднего диаметра древостоя (Brown et al., 1989). Значения фитомассы для того или иного региона получают путем взвешивания среднестатистического переводного коэффициента по породам, лесопокрытым площадям и запасам стволовой древесины в соответствии с распределением последних по возрастным группам или ступеням среднего диаметра.

Третий уровень приближения. По этому методу в настоящее время проводится вторая инвентаризация фитомассы лесов Канады (методику и результаты первой инвентаризации см.: Воллог, 1985). Итогом первой фазы проекта являются матрицы переводных коэффициентов, рассчитывае-

мых как отношение надземной фитомассы к запасу балансовой древесины. С помощью переводных коэффициентов значения запасов балансовой древесины, распределенных по провинциям, породам, классам возраста и бонитета, переводятся на показатели надземной фитомассы (Penner, 1997). Метод предполагает более точную оценку общей фитомассы по сравнению с предыдущим, поскольку переводной коэффициент взвешивается по удельной площади и запасам балансовой древесины, распределенным не по одному, как в предыдущем варианте, а по двум определяющим факторам одновременно - возрасту и классу бонитета.

Четвертый уровень приближения. Поскольку вклад непокрытых лесом и несельскохозяйственных площадей в общее депонирование фитомассы составляет всего 10% (Исаев и др., 1993), то совершенствование методики учета фитомассы по этим площадям практически не изменяет конечного результата, и, напротив, дальнейшие усилия по совершенствованию методики оценки фитомассы на покрытых лесом площадях могут быть вполне оправданными. Цель предлагаемой работы - разработка четвертого уровня приближения, включающего алгоритм и программу совмещения переводных коэффициентов фитомассы с поведельным банком данных лесостроительства, а также анализ систематических ошибок оценки фитомассы древостоев при использовании вышеупомянутых методов первого, второго и третьего уровней приближения.

Методический подход. Мы придерживаемся мнения М.Ф. Макаревского (1991), что оценку запасов фитомассы древостоев и содержащегося в ней углерода следует начинать не с глобального или национального уровней, а с уровня региона, для чего на основе экспериментальных работ должны быть выведены для всех лесообразующих пород региональные переводные коэффициенты фитомассы. Эти коэффициенты оцениваются с помощью регрессионных моделей, включающих основные массообразующие показатели древостоя в качестве объясняющих переменных. Для березняков такие модели, дифференцированные по трем регионам (Северный Казахстан, Южный и Средний Урал), приведены в статье "Ход роста надземной фитомассы березняков Среднего Урала" настоящего сборника.

В результате периодически проводимой лесинвентаризации лесных площадей вся территория гослесфонда России обеспечена поведельными банками лесостроительных данных, которые для значительной части лесхозов (в Свердловской области - для половины) записаны на магнитных носителях. При этом каждый выдел в пределах квартала характеризуется величиной площади и запаса стволовой древесины на ней, а также основными массообразующими показателями. Такая ситуация предполагает создание баз данных о фитомассе (и запасе углерода) лесов

по принципу “от частного к общему”, с иерархией от уровня лесничества и лесхоза до общенационального.

Результаты и обсуждение. Реализация нашего подхода показана на примере березовой хозсекции Невьянского лесхоза Свердловской области. Общая площадь 33,4 тыс. га, общий запас - 5940 тыс. м³, средняя площадь выдела - 2 га, средний запас на выделе - 160 м³/га.

Для экстраполяции экспериментальных данных фитомассы древостоев, полученных на пробных площадях в широком диапазоне варьирования массообразующих таксационных показателей, необходимо:

1) рассчитать регрессионные модели зависимости переводных коэффициентов фитомассы от основных массообразующих факторов (таксационных показателей);

2) структурировать повыведельный банк данных лесоустройства таким образом, чтобы получить матрицу распределения запасов стволовой древесины по тем же массообразующим факторам (показателям);

3) протабулировать регрессионные модели по цифровым значениям матрицы распределения запасов и получить взвешенные по этим значениям запасы фитомассы для всей лесопокрытой площади.

Очевидно, что массообразующие факторы по позициям 1 и 2 должны быть одни и те же. Ранее (Усольцев и др., 1995) было показано, что при одной и той же полноте, но диаметрально противоположных сочетаниях среднего диаметра D и густоты N масса кроны различается в 2,5 раза. Отсюда следует, что в регрессионную модель для переводного коэффициента фитомассы вместо полноты следует вводить в качестве определяющих показателей средний диаметр и густоту древостоя. Однако густота выдела не учитывается в процессе лесоустроительных работ. Поэтому в наш алгоритм был заложен вспомогательный блок (рис.1), позволяющий рассчитать густоту выдела по известным значениям полноты и средних высоты и диаметра с использованием в качестве промежуточного показателя абсолютной полноты нормального древостоя G_n .

Структурированный повыведельный банк данных лесоустройства дает возможность также рассчитать смещения (систематические ошибки) оценочной фитомассы на лесопокрытой площади как общие, так и дифференцированные по площадям. Для расчета смещений, обусловленных применением переводного коэффициента первого, второго и третьего уровней приближения, по отношению к предлагаемому нами подходу (четвертый уровень приближения), по массиву данных 62 пробных площадей рассчитаны переводные коэффициенты фитомассы P_i/M , дифференцированные по трем регионам (см. нашу статью в этом сборнике) по вариантам:

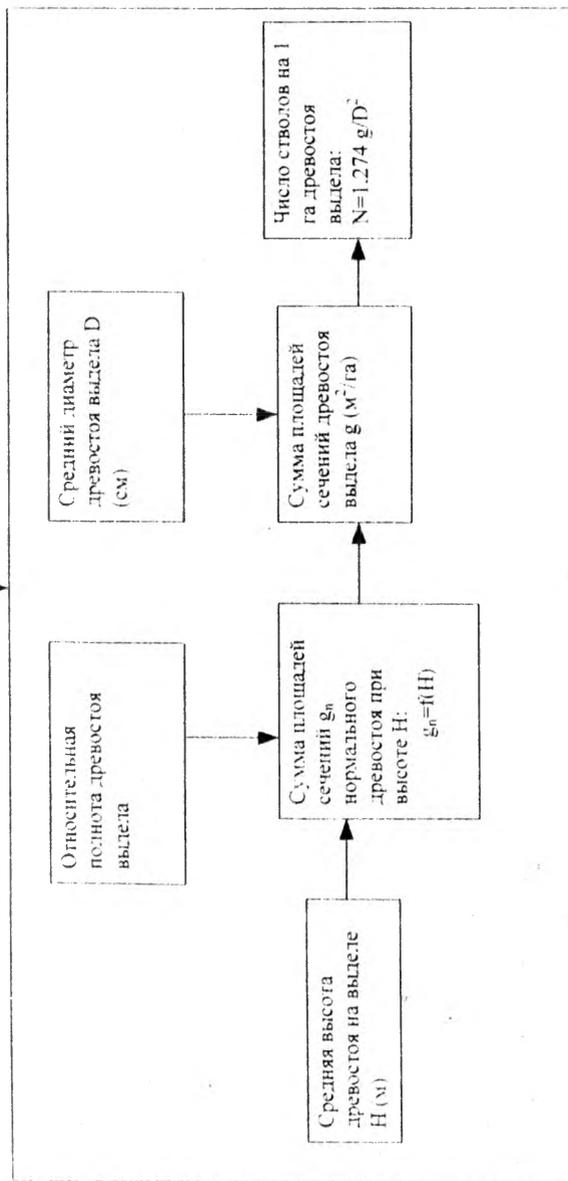


Рис.1 Вспомогательный блок для расчета древостоя на выделе по средней высоте, относительной полноте и среднему диаметру древостоя.

$$P_i/M = \text{const} \text{ (первый уровень приближения);}$$

$$\ln(P_i/M) = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 \ln A + a_4 \ln^2 A + a_5 \ln^3 A + a_6 \ln(P_{sk}/M)$$

(второй уровень приближения); (1)

$$\ln(P_i/M) = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 \ln A + a_4 \ln^2 A + a_5 \ln A + a_6 \ln H_{50} + a_7 \ln H_{50} + a_8 \ln A \ln H_{50} + a_9 \ln A \ln^2 H_{50} + a_{10} \ln(P_{sk}/M) \text{ (третий уровень приближения). (2)}$$

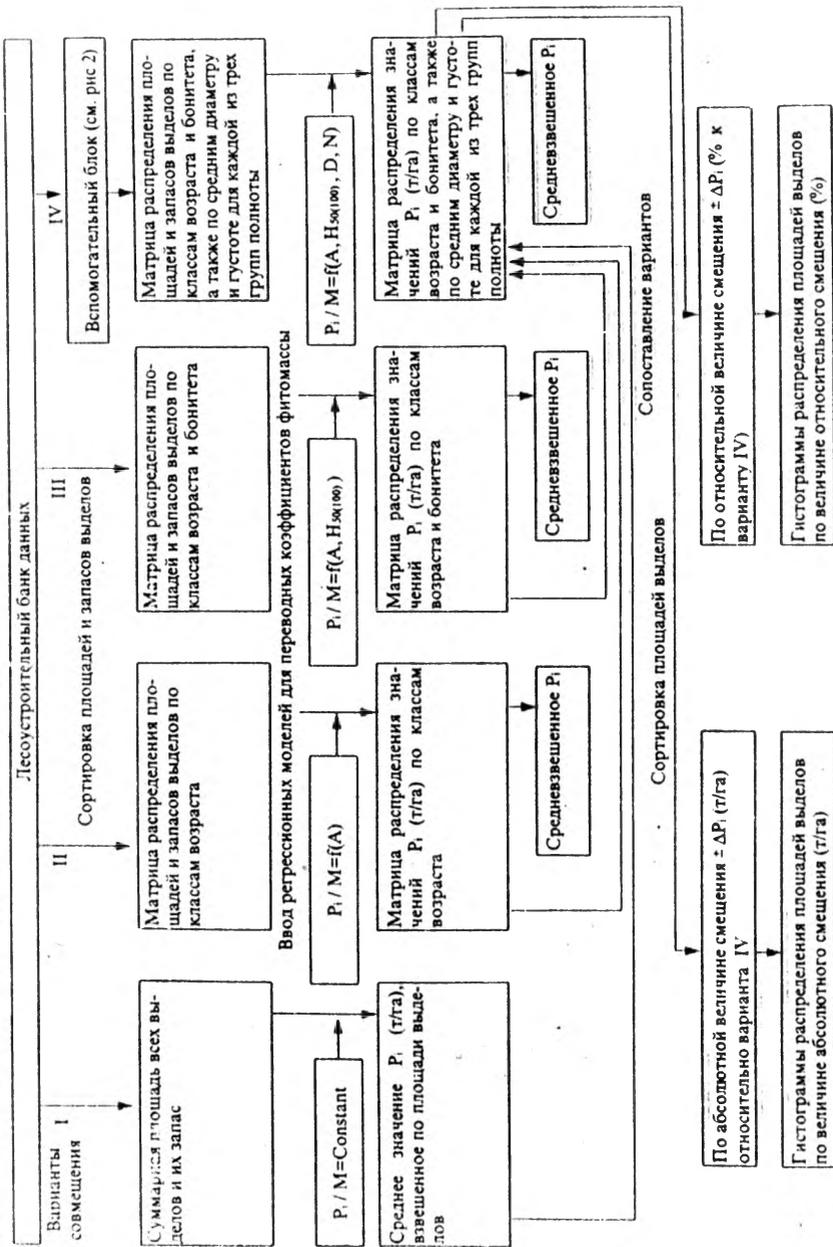
На первом уровне приближения переводные коэффициенты для массы листвы и скелета кроны достоверно различаются по всем трем регионам и составляют соответственно для Среднего Урала 18,3 и 70,8 кг/м³, для Южного Урала 19,5 и 75,1 кг/м³ и для Казахстана 27,3 и 102,6 кг/м³. Для массы стволов переводные коэффициенты для Среднего Урала и Казахстана достоверно не различаются и обобщенный по двум регионам показатель составил 507,6 кг/м³, а для Южного Урала - 545,0 кг/м³.

Характеристика уравнений (1) и (2) (см. таблицу) показывает, что на втором и третьем уровнях приближения переводные коэффициенты для массы скелета кроны являются общими для Казахстана и Южного Урала, а для массы стволов - общими для Казахстана и Среднего Урала. Переводные коэффициенты для массы листвы достоверно различаются по трем регионам (при условии равенства возраста и класса бонитета).

Схема совмещения переводных коэффициентов первого ($P_i/M = \text{const}$), второго, третьего и четвертого (уравнения см. в нашей статье настоящего сборника) уровней приближения для Среднего Урала, а также сопоставления первых трех уровней с предлагаемым (четвертым), показана на рис. 2.

Матрицы распределения площадей и запасов выделов по определяющим факторам четырех уровней приближения получены методом автоматической сортировки электронной базы данных поведельного таксационного описания, приведенным ранее (Усольцев и др., 1995). По названным уравнениям переводных коэффициентов четырех уровней приближения и матрицам распределения площадей и запасов выделов рассчитываются соответственно четыре матрицы распределения фитомассы. Для анализа точности трех первых уровней приближения относительно четвертого производится расчет смещений оценок фитомассы, взвешенных по площади. Данная процедура производится автоматически с использованием программного обеспечения, разработанного в среде СУБД PARADOX.

Рис. 2. Блок-схема четырех вариантов совмещения банка лесо-строительных данных с переводными коэффициентами надземной фитомассы



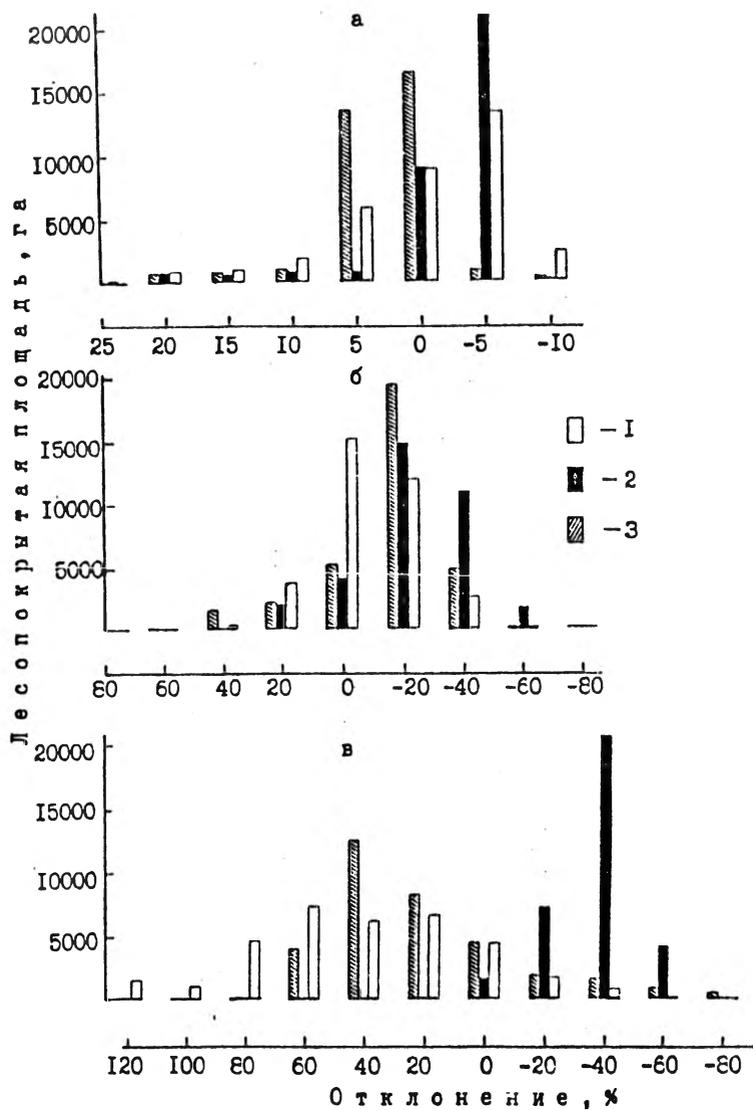


Рис. 3. Распределение лесопокрытой площади березовой хозсекции Невьянского лесхоза по величине систематической ошибки оценки фитомассы стволов (а), скелета кроны (б) и листвы (в), получаемой при использовании переводных коэффициентов различных уровней приближения; 1, 2 и 3 - соответственно первый, второй и третий уровни приближения.

Анализ смещений оценок фитомассы березы на площади 33,4 тыс. га (рис.3) показывает, что каждая фракция фитомассы характеризуется своей специфичной закономерностью распределения площадей по величине смещения на каждом уровне приближения. Так, первый уровень приближения завывает массу листвы (рис.3в) на величину 20, 40, 60 и 80% на площадях соответственно 6,4; 6,0; 7,1 и 4,5 тыс. га или соответственно на 20, 18, 21 и 13% площадей от общей лесопокрытой площади березовой хозсекции Невьянского лесхоза. Второй уровень приближения занижает массу листвы на величину 20, 40 и 60% на площадях соответственно 7,1; 20,6 и 4,1 тыс. га или соответственно на 21, 62 и 12% площадей от общей лесопокрытой. Третий уровень приближения завывает массу листвы на величину 20, 40 и 60% на площадях соответственно 8,0; 12,3 и 3,9 тыс. га или соответственно на 24, 37 и 12% площадей от общей лесопокрытой. По массе скелета кроны (рис.3б) каждый из трех уровней приближения также дает существенные систематические ошибки, хотя и меньшей величины в сравнении с листвой. По массе стволовой древесины (рис.3а) смещения на большей части площадей не выходят за пределы $\pm 5\%$.

Поскольку 60-70% надземной фитомассы сосредоточено в стволах, показанные смещения при расчетах наличного запаса углерода лесных экосистем, возможно, не дадут сколь-либо существенных искажений. Однако темпы прироста и отпада фитомассы идут наиболее интенсивно в кроне. Следовательно, по интенсивности связывания атмосферного углерода доля кроны в общей надземной фитомассе довольно высокая и игнорирование показанных смещений может повлечь за собой существенные искажения расчетных показателей депонируемого углерода на больших площадях.

Характеристика уравнений (1) и (2) для переводных коэффициентов P/M различных фракций надземной фитомассы березняков трех регионов в зависимости от определяющих факторов

Константы, факторы и показатели адекватности	Переводные коэффициенты надземной фитомассы в абсолютно сухом состоянии, кг/м ³		
	Ствол	Скелет кроны	Листва
Уравнение (1) (второй уровень приближения)			
a_0	1,333	2,552	2,182
$a_1 X_1$	0,063	—	0,223
$a_2 X_2$	—	-0,531	-0,525
$a_3 \ln A$	-2,088	-2,805	-2,209

Константы, факторы и показатели адекватности	Переводные коэффициенты надземной фитомассы в абсолютно сухом состоянии, кг/м ³		
	$a_4 \ln^2 A$	0,681	0,390
$a_5 \ln^3 A$	-0,071	—	—
$a_6 \ln(P_{sk}/M)$	—	—	0,414
R^2	0,293	0,514	0,852
l	1	1	1
SE	0,073	0,343	0,300
Уравнение (2) (третий уровень приближения)			
a_0	-8,900	3,342	-50,395
$a_1 X_1$	0,062	—	0,405
$a_2 X_2$	—	-0,455	—
$a_3 \ln A$	—	-2,757	4,146
$a_4 \ln^2 A$	0,749	0,380	—
$a_5 \ln^3 A$	-0,078	—	—
$a_6 \ln H_{50}$	7,400	—	29,689
$a_7 \ln^2 H_{50}$	-1,311	-0,101	-4,267
$a_8 \ln A \ln H_{50}$	-1,631	—	-1,680
$a_9 \ln A \ln^2 H_{50}$	0,291	—	—
$a_{10} \ln(P_{sk}/M)$	—	—	0,422
R^2	0,307	0,551	0,871
SE	0,075	0,332	0,282

Литература

Алексеев В.А., Бердси Р.А. Углерод в экосистемах лесов и болот России. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н.Сукачева, 1994. 224с.

Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.

Исаев А.С., и др. Оценка запасов и годичного депонирования углерода в фитомассе лесных экосистем России / Исаев А.С., Коровин Г.Н., Уткин А.И., Пряжников А.А., Замолотчиков Д.Г. // Лесоведение. 1993. №5. С. 3-10.

Макаревский М.Ф. Запасы и баланс органического углерода в лесных и болотных биогеоценозах Карелии // Экология. 1991. №3. С. 3-10.

Родин Л.Е., Базилевич Н.И. Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности земного шара. М.:Л.: Наука, 1965. 253 с.

Усольцев В.А., и др. Принципы формирования баз данных по фитомассе лесов России и Швейцарии / Усольцев В.А., Сальников А.А., Гор-

бунова С.А., Нагимов З.Я. // Леса Урала и хоз-во в них. 1995. вып. 18. С. 198-227.

Armentano T.V., Ralston C.W. The role of temperate zone forests in the global carbon cycle // *Can. J. For. Res.* 1990. Vol. 10. P. 53-60.

Birdsey R.A. Changes in forest carbon storage from increasing forest area and timber growth // Sampson R.N. and Hair D. (eds.). *Forests and global warming*. Washington, DC: Amer. For. Association, 1992. P.151-162.

Bonnor G.M. Inventory of forest biomass in Canada. *Can. For. Serv., Petawawa Nat. Forestry Institute*, 1985. 63 p.

Brown S., Gilespeie A.J.R., Lugo A. Biomass estimation methods to tropical forests with applications to forest inventory data // *Forest Sci.* 1989. Vol. 35. P. 881-902.

Delcourt H.R., West D.C., Delcourt P.A. Forests of the south eastern United States: quantitative maps for aboveground woody biomass, carbon and dominance of major tree taxa // *Ecology*. 1981. Vol. 62. - P. 879-887.

Kolchugina T.P., Vinson T.S. Equilibrium analysis of carbon: pools and fluxes of forest biomass in the former Soviet Union // *Can. J. For. Res.* 1993a. Vol. 23. P. 81-88.

Kolchugina T.P., Vinson T.S. Comparison of two methods to assess the carbon budget of forest biomes in the former Soviet Union // *Water, Air and Soil Pollution*. 1993b. Vol. 70. P. 207-221.

Olson J.S., Watts J.A., Allison L.J. Carbon in live vegetation of major world ecosystems // ORNL - 5862. Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge Tennessee, 1983. 152 p.

Penner M. Canada's biomass inventory: deriving biomass from volume // *Petawawa National Forestry Institute. IBFRA paper 1997*(in press).

Sampson R.N. Forestry opportunities in the United States to mitigate the effects of global warming // *Water, Air and Soil Pollution*. 1992. Vol. 64. P. 157-180.