

АГРОЭКОЛОГИЯ



УДК 635.37

С.Ю. Бондаренко
С.В. Макарычев
И.В. Гефке

АНАЛИЗ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОЧВЕННОГО ПРОФИЛЯ

Понятие «температурный режим» определяется как пространственное и временное распределение температуры в почвенном профиле. Первые данные о температуре почвы в общем, познавательном плане получены на гидрометеорологических станциях. Первые наблюдения были проведены в 1847 г. в Кишиневе, а начиная с 1873 г. они начали осуществляться в Петербурге. За более чем столетний период накоплен и обобщен обширный объем сведений о температуре, что нашло свое отражение в работах многих авторов [1, 2, 3]. Изучение температурного режима во многом связано с качеством термометрических данных, что в свою очередь определяется точностью аппаратуры, совершенством методики, правильностью выбора объекта исследований и др.

На кафедре физики АГАУ проводятся комплексные исследования теплофизического состояния черноземных, каштановых, серых лесных, дерново-подзолистых и засоленных почв Алтайского края с целью последующей разработки моделей теплопереноса, графического построения их термических полей во времени и пространстве.

В качестве примера рассмотрим возможность моделирования температурного поля в почвенном профиле. Это позволяет найти температуру на различной глубине почвенной толщи в любое время года с точностью до суток. Для

этого необходимо принять допущение, что толщина слоя мала по сравнению с размерами окружающего замкнутого пространства. Это позволит рассматривать процесс теплообмена поверхности почвы с окружающей средой как теплообмен в неограниченном пространстве.

Удельный тепловой поток вследствие теплопроводности по направлению одной из осей определяется из выражения:

$$q = -\lambda \left(\frac{dT}{dx} \right), \quad (1)$$

где q – удельный тепловой поток;

λ – коэффициент теплопроводности среды;

$\left(\frac{dT}{dx} \right)$ – изменение температуры на

единицу длины в направлении оси.

Полный тепловой поток, проходящий через слой за время t в конечном итоге можно определить по формуле:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} * \Delta T * F * t, \quad (2)$$

где $\frac{\lambda}{\delta}$ – тепловая проводимость слоя;

$\frac{\delta}{\lambda}$ – термическое сопротивление слоя;

ΔT – температурный напор;

F – площадь.

Характер теплового поля зависит, прежде всего, от температурного напора:

$$\Delta T = T_n - T_\theta,$$

где T_n – температура поверхности почвы;

T_θ – температура на значительном удалении от поверхности почвы.

Конвективный теплообмен при свободной конвекции определяется следующим произведением чисел подобия:

$$Nu = A(Gr_\theta * Pr_\theta)^m \left(\frac{Pr_\theta}{Pr_n} \right)^{0,25}, \quad (4)$$

где A и m – параметры;

Nu – число Нуссельта;

Gr – число Грасгофа;

Pr – число Прандтля;

n и θ – индексы, относящиеся, соответственно, к теплоносителю в контактном слое с поверхностью и теплоносителю, находящимся на значительном удалении от поверхности.

Коэффициент теплоотдачи можно выразить из числа Нуссельта:

$$\alpha = \frac{Nu * \lambda_n}{l}, \quad (5)$$

где α – коэффициент теплоотдачи;

λ_n – коэффициент теплопроводности;

l – определяющий геометрический размер модели.

Число Грасгофа:

$$Gr = g\beta\Delta T \frac{l^3}{\nu^2}, \quad (6)$$

где g – ускорение свободного падения;

β – температурный коэффициент объемного расширения;

ΔT – температурный напор;

ν – коэффициент кинематической вязкости.

Число Прандтля:

$$Pr = \frac{\nu}{a_g}, \quad (7)$$

где

$$a_g = \frac{\lambda}{c_p \rho},$$

где a – температуропроводность;

c_p и ρ – соответственно, теплоемкость и плотность.

Отсюда можно выразить:

$$\alpha = A \left(\frac{g\beta_\theta \Delta T l^3 c_{p_\theta} \rho}{\nu_\theta \lambda_\theta} \right)^m * \left(\frac{\nu_\theta c_{p_\theta} \rho_\theta * \lambda_n}{\nu_n c_{p_n} \rho_n \lambda_\theta} \right)^{0,25}. \quad (8)$$

Для решения задачи представим условия теплопередачи с помощью электро моделирования тепловых процессов на основе аналогий. Из сравнения обобщенных зависимостей нестационарного теплового процесса с соответствующими зависимостями переходного электрического процесса можно установить, что если соблюдены условия подобия, то каждой тепловой величине соответствует аналогичная ей величина в электрической цепи, составленной из сопротивлений и емкостей [4, 5]. Здесь теплопроводности соответствует электрическое сопротивление, теплоемкости – электроемкость, температурному напору – напряжение.

Рассмотрим неустановившийся электрический процесс, проходящий во времени t в электрической решетке, состоящей из активных сопротивлений R и емкостей C (рис. 1). Будем считать, что такая электрическая решетка является элементом замещения элементарного объема слоя почвы. При этом переменные координат X, Y, Z являются независимыми и рассматриваются только в определенных равноотстоящих узловых точках решетки. Расстояние между узловыми точками примем равными X, Y, Z .

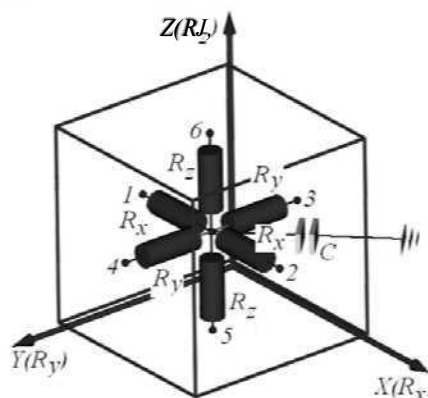


Рис. 1. Элемент замещения элементарного объема слоя почвы

Пусть распределение напряжений U в узлах электрической решетки описывается некоторой функцией координат сплошной проводящей среды, которую электрическая решетка замещает. Напряжения в узлах 0-6 можно записать в следующем виде:

Узел 0 (центр решетки): $U(X; Y; Z)$.

Узлы 1: $U(X - \Delta X; Y; Z)$,

2: $U(X + \Delta X; Y; Z)$,

- 3: $U(X; Y - \Delta Y; Z)$,
- 4: $U(X; Y + \Delta Y; Z)$,
- 5: $U(X; Y; Z - \Delta Z)$,
- 6: $U(X; Y; Z + \Delta Z)$.

Проводимости элементов $g_{k\theta}$ ($k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$), включенных между узлом θ и смежными узлами сетки, выразим следующим образом:

$$g_x = g_{10} = g_{20} = \gamma_x \frac{\Delta Y \Delta Z}{\Delta X};$$

$$g_y = g_{30} = g_{40} = \gamma_y \frac{\Delta X \Delta Z}{\Delta Y}; \quad (9)$$

$$g_z = g_{50} = g_{60} = \gamma_z \frac{\Delta X \Delta Y}{\Delta Z},$$

где γ – удельная проводимость среды;
 $\Delta X; \Delta Y; \Delta Z$ – расстояние между узловыми точками (шаг разбиения).

Токи в узле θ для соответствующих координатных осей будут равны:

$$\begin{cases} \Delta i_{10} = [U(X - \Delta X; Y; Z) - U(X; Y; Z)] g_{10}; \\ \Delta i_{20} = [U(X + \Delta X; Y; Z) - U(X; Y; Z)] g_{20}; \\ \Delta i_{30} = [U(X; Y - \Delta Y; Z) - U(X; Y; Z)] g_{30}; \\ \Delta i_{40} = [U(X; Y + \Delta Y; Z) - U(X; Y; Z)] g_{40}; \\ \Delta i_{50} = [U(X; Y; Z - \Delta Z) - U(X; Y; Z)] g_{50}; \\ \Delta i_{60} = [U(X; Y; Z + \Delta Z) - U(X; Y; Z)] g_{60}. \end{cases} \quad (10)$$

Разложим систему уравнений 10 в ряд Тейлора. С учетом системы уравнений 9 получим выражения для токов решетки в виде:

$$\begin{cases} i_{10} = \gamma_x \frac{\Delta Y \Delta Z}{\Delta X} \left(-\Delta X \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\Delta X^2}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} - \frac{\Delta X^3}{6} \frac{\partial^3 U}{\partial X^3} + \frac{\Delta X^4}{24} \frac{\partial^4 U}{\partial X^4}(\xi_1, \eta_1) \right); \\ i_{20} = \gamma_x \frac{\Delta Y \Delta Z}{\Delta X} \left(\Delta X \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\Delta X^2}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\Delta X^3}{6} \frac{\partial^3 U}{\partial X^3} + \frac{\Delta X^4}{24} \frac{\partial^4 U}{\partial X^4}(\xi_2, \eta_2) \right); \\ i_{30} = \gamma_y \frac{\Delta X \Delta Z}{\Delta Y} \left(-\Delta Y \frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\Delta Y^2}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} - \frac{\Delta Y^3}{6} \frac{\partial^3 U}{\partial Y^3} + \frac{\Delta Y^4}{24} \frac{\partial^4 U}{\partial Y^4}(\xi_3, \eta_3) \right); \\ i_{40} = \gamma_y \frac{\Delta X \Delta Z}{\Delta Y} \left(\Delta Y \frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\Delta Y^2}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + \frac{\Delta Y^3}{6} \frac{\partial^3 U}{\partial Y^3} + \frac{\Delta Y^4}{24} \frac{\partial^4 U}{\partial Y^4}(\xi_4, \eta_4) \right); \\ i_{50} = \gamma_z \frac{\Delta X \Delta Y}{\Delta Z} \left(-\Delta Z \frac{\partial U}{\partial Z} + \frac{\Delta Z^2}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} - \frac{\Delta Z^3}{6} \frac{\partial^3 U}{\partial Z^3} + \frac{\Delta Z^4}{24} \frac{\partial^4 U}{\partial Z^4}(\xi_5, \eta_5) \right); \\ i_{60} = \gamma_z \frac{\Delta X \Delta Y}{\Delta Z} \left(\Delta Z \frac{\partial U}{\partial Z} + \frac{\Delta Z^2}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} + \frac{\Delta Z^3}{6} \frac{\partial^3 U}{\partial Z^3} + \frac{\Delta Z^4}{24} \frac{\partial^4 U}{\partial Z^4}(\xi_6, \eta_6) \right); \end{cases} \quad (11)$$

где ξ_k, η_k – координаты некоторых точек в интервале между k -тым узлом решетки и узлом θ .

Ток, протекающий в емкости, равен:

$$i_c = C \frac{\partial u}{\partial t} = \Delta X \Delta Y \Delta Z \left[C_0(X; Y; Z) \frac{\partial U}{\partial t} \right], \quad (12)$$

где C_0 – емкость единицы объема с координатами (X, Y, Z) .

Согласно первому закону Кирхгофа для узла θ

$$\sum_{k=1}^6 i_k = \Delta X \Delta Y \Delta Z \left[\frac{\partial}{\partial X} \left(\gamma_x \frac{\partial U}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\gamma_y \frac{\partial U}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\gamma_z \frac{\partial U}{\partial Z} \right) - C_0 \frac{\partial U}{\partial t} \right] = 0, \quad (13)$$

Так как условия теплоотдачи будут разными, т.е. $R_1 \neq R_2 \neq \dots \neq R_{k-1} \neq R_k$, но взаимосвязанными, то $R_k = f(R_{k-1})$. Учитывая симметричность модели, поместим θ в ее геометрическом центре и будем считать, что проводимости в направлении координатных осей равны между собой. Тогда можно представить:

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right) = \frac{C_0}{f(\gamma_y)} \frac{\partial U}{\partial t}. \quad (14)$$

Для точного определения параметров этой функции были проведены экспериментальные исследования температурного поля на почвенном слое с конкретными теплофизическими характеристиками. На опытных участках в разрезах отбирались образцы, в которых определяли механические и водно-физические свойства почвы.

Для обработки полученных экспериментальных данных по температуре нами была создана компьютерная программа, написанная на языке CISP на графической платформе AutoCAD. Программа позволяет визуально наблюдать форму температурных и влажностных полей в 3D-режиме и получать данные о любой точке поля.

Для построения температурного поля программа использует метод математического планирования эксперимента (МПЭ). При этом экспериментатор должен четко определить объем и содержание информации, которую необходимо извлечь из экспериментальных данных, а также целесообразность и возможность применения МПЭ для конкретных условий.

Используемые программой методы МПЭ позволяют одновременно, варьируя несколькими значениями независимых переменных (глубина, время, температура), на основании опытных и расчетных данных получить данные для математической модели исследуемых зависимостей температуры от времени и глубины.

Описанный выше метод расчета позволяет рассчитать температуру в конкретном почвенном профиле исходя из температуры воздуха за определенный период времени. Однако истинный характер исследуемой зависимости не всегда может быть точно определен ввиду дискретности и неравномерности проведения измерений. Поэтому для нахождения промежуточных значений программа использует количественную зависимость в виде полинома второго порядка. При расчете кривой построения программа выбирает оптимальные значения факторов в пределах области варьирования, что позволяет получить наиболее вероятные значения определяемых параметров. Для построения промежуточных точек поля программа интегрирует температуру или влажность по полусфере, окружающей точку, ес-

ли она лежит на поверхности, или по сфере, если находится на глубине более дискретности вычислений. Для построения интегралов температур используются функции, описывающие три основных компоненты, формирующих температуру, - теплопроводности, конвекции и лучевой составляющей. Однако точное аналитическое решение таких интегралов во многих точках невозможно. В таком случае программа использует численные методы, аналогичные методу Монте-Карло, который позволяет вычислить значение интеграла как сумму небольшого количества значений подинтегральных функций, выбранных случайным образом.

Изменение некоторых факторов, от которых зависит искомая величина между двумя точками с точно определенными в результате эксперимента данными, носит случайный характер, что, в свою очередь, не позволяет точно предсказать ее значение. Поэтому какое именно событие произойдет (увеличение или уменьшение величины) в точке, ближайшей к «известной», в случае невозможности ее определения зависит от генератора случайных чисел, использующего сумму коэффициентов трех основных компонент, формирующих температуру. Поскольку вероятность всегда нормирована к единице, сумма этих коэффициентов не должна превышать единицы. Поэтому коэффициент варьирования соответствует диапазону 0-1. Чем больше значение того или иного коэффициента, тем больше вероятность, что произойдет соответствующее ему событие, которое приведет к увеличению или уменьшению этого параметра.

Корректная работа программы обеспечивается большим количеством экспериментальных данных, от числа которых зависит точность построения.

На рисунках 2 и 3 представлен результат работы программы по построению трехмерного температурного поля и сечения по изотермам. Несмотря на то, что измерения температур проводились 2 раза в месяц, программа с помощью МПЭ просчитывает промежуточные точки и строит непрерывные поля и изолинии. При этом можно построить классические термохроноизоплеты (рис. 2) или температурное поле, развернутое во времени и пространстве (рис. 3).

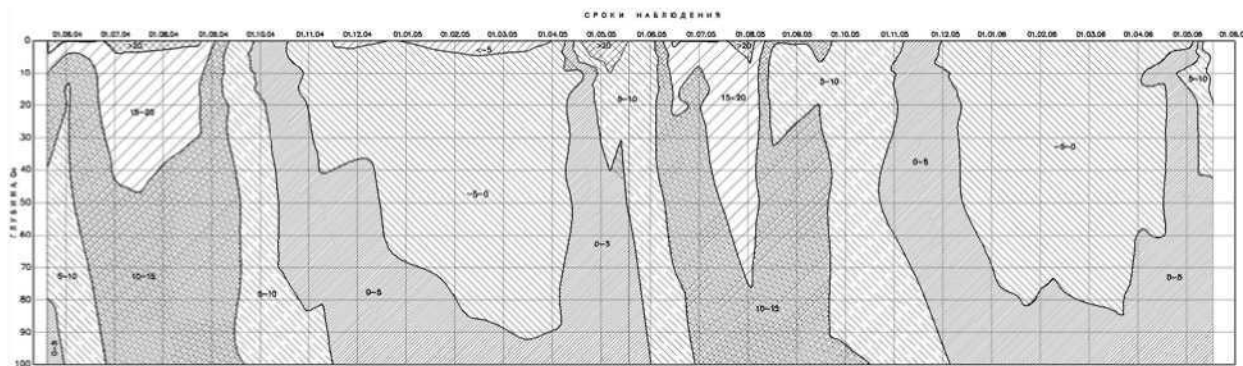


Рис. 2. Термохроноизоплеты в черноземе выщелоченном в 2004-2006 гг.

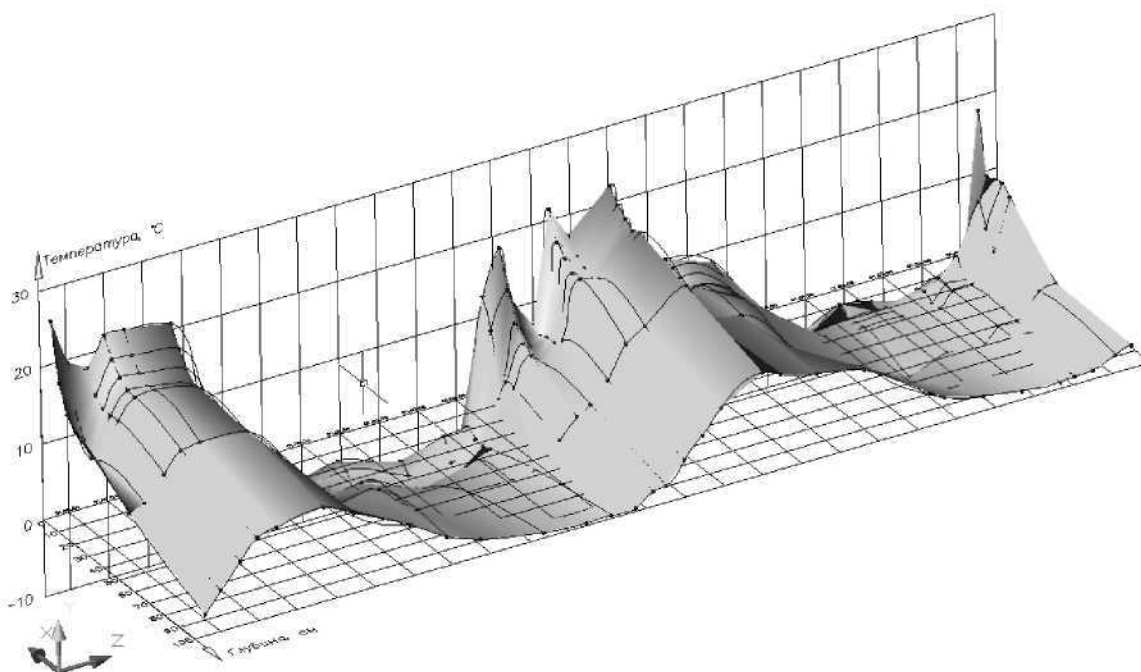


Рис. 3. Температурное поле в черноземе выщелоченном в 2004-2006 гг.

Данный способ «целостного» построения температурных полей позволил проанализировать их и найти закономерности распределения тепла в почве.

Работа программы апробирована в рамках кандидатской диссертации И.В. Гефке «Теплофизическое состояние выщелоченных черноземов Алтайского Приобья в условиях плодового сада». Исследования были организованы в НИИ садоводства им. М.А. Лисавенко на участках сортоиспытания в грушевом саду в период 2004-2006 гг. Объектом исследований явился чернозем выщелоченный, среднемощный, малогумусный, среднесуглинистый. Температура измерялась зимой и летом в 13 часов.

Термохроноизоплеты (рис. 2) показывают, что в ряду груш летом 2004 г. температура более 20^о проникает в поч-

ву лишь на 5 см с конца июня по середину августа. К началу июня почвенный профиль прогревается до 5^о, хотя ниже 100 см отмечается нулевая температура. Пятнадцатиградусная изотерма распространяется до 50 см с середины июня и до конца августа.

С конца сентября наблюдается постепенное охлаждение почвы до 5^оС, а с середины октября температура переходит через ноль и оказывается отрицательной вплоть до 10 апреля 2005 г. Характерно в то же время, что термоизоплета ниже 5^о в течение всей зимы не проникает глубже 5 см. Причина этого заключается в значительном снегонакоплении, высота которого в декабре достигала 55 см, что препятствовало промерзанию почвы. Нулевая изотерма опускалась только на глубину 90 см.

На рисунке 2 видно, что во всей метровой толще почвы температура достигла 5 градусов выше нуля с глубины 30 см и ниже, такая температура установилась только к началу июня.

Зона температур 10-15°C на рассматриваемом агрофоне в летний период распространяется глубже 100 см, то есть практически все генетические горизонты чернозема прогреваются до активных и благоприятных в биологическом отношении температур.

К 1 августа температуры от 15 до 20° под грушами проникают только до 75 см, а выше 20°C — до 7 см и только во второй половине июля.

Особенностью зимы 2005/06 г. является отсутствие в саду во всем метровом слое почвы температур ниже -5°. Это обусловлено, прежде всего, ранним установлением снежного покрова еще до сильных морозов и его мощностью. Высота снега в январе составляет около 60 см на обоих вариантах.

Переход через нулевую изотерму в верхних слоях почвы под грушами происходит к концу апреля. Уже к 10 мая 5-градусная изотерма проникает в почву до 40 см.

Анализ ряда полученных температурных полей показывает (рис. 3), что на глубине 0-10 см распределение температур имеет вероятностный характер, следуя за температурой воздуха. При увеличении глубины распределение становится более упорядоченным и математически предсказуемым, постепенно формируясь в семейство парабол, соединенных наподобие синусоиды. Начиная с глубины 50 см и глубже распределение температуры носит ярко выраженный параболический характер.

Расстояние между двумя точками параболы с одинаковой амплитудой при увеличении глубины возрастает и на глубине около 1 м достигает 0,5 года. Одновременно с увеличением глубины происходит сдвиг фаз (вершин парабол).

Если рассматривать график зависимости сдвига фаз от глубины, то он, в

свою очередь, является квадратичной зависимостью вида $\Delta\varphi = kx^2 + bx + c$, графиком которой тоже является кривая, близкая к параболе. Функция $\Delta\varphi$, определяющая сдвиг фаз температурных колебаний, практически описывает процесс теплопередачи в почве.

свою очередь, является квадратичной зависимостью вида $Aq > = kx^2 + bx + c$, графиком которой тоже является кривая, близкая к параболе. Функция Aq , определяющая сдвиг фаз температурных колебаний, практически описывает процесс теплопередачи в почве.

Кроме того, сравнительный анализ результатов круглогодичных наблюдений в условиях плодового сада указывает на значительное влияние зимнего мерзлотного режима чернозема на характер изменений его теплового состояния в весенне-летний период. Особая роль в этом принадлежит снежному покрову, который препятствует проникновению в почву отрицательных температур, не давая им опуститься ниже -10°C уже в верхнем 20-сантиметровом слое.

В заключение следует отметить, что полученная база данных по температуре в почвенном профиле при использовании разработанной нами программы позволяет не только моделировать процессы теплообмена, но и дает возможность прогнозировать тепловое состояние почвенного профиля, используя температуру поверхности почвы.

Библиографический список

1. Димо В.Н. Тепловой режим почв СССР: дис. д.с.-х.н. / В.Н. Димо. М., 1970. 445 с.
2. Макарычев С.В. Теплофизические свойства почв Юго-Западной Сибири: дис. д.б.н. / С.В. Макарычев. М., 1993. 378 с.
3. Шульгин А.М. Температурный режим почвы / А.М. Шульгин. Л.: Гидрометиздат, 1957. 242 с.
4. Коздоба Л.А. Электрическое моделирование явлений тепло- и массопереноса / Л.А. Коздоба. М.: Энергия, 1972.
5. Кузьмин М.П. Электромоделирование некоторых нестационарных тепловых процессов / М.П. Кузьмин. М.; Л.: Энергия, 1964. 117 с.