

УДК 519.635.4, 630.181.614.842

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРЫ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ И СПОСОБОВ ПОДАЧИ ВОДЫ ПРИ ТУШЕНИИ ЛЕСНОГО ПОЖАРА.

Катаева Л.Ю.¹, Масленников Д. А.², Белоцерковская И.Е.³

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Россия, Нижний Новгород, miran_kaspir@mail.ru

²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Россия, Нижний Новгород, kataeval2010@mail.ru

³Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Россия, Нижний Новгород, dmitrymaslennikov@rambler.ru

THE RESEARCH OF FOREST CANOPY STRUCTURE PARAMETERS AND WATER SUPPLY APPROACHES DURING WILDFIRE SUPPRESSION.

Kataeva L.Y.¹, Maslennikov D.A.², Belotserkovskaya I.E.³

¹Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Russia, Nizhny Novgorod, miran_kaspir@mail.ru

² Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev., Russia, Nizhny Novgorod, kataeval2010@mail.ru

³ Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Russia, Nizhny Novgorod, dmitrymaslennikov@mail.ru

Аннотация. Исследована задача влияния характеристик структуры лесных горючих материалов и способов подачи воды на требуемую ее интенсивность при тушении лесного пожара. Проводится моделирование влияния критической температуры точки прицела на эффективность тушения лесного пожара в случае однородной структуры лесной растительности. В основе алгоритма автоматического управления источником подачи воды положено лексикографическое упорядочивание критериев. Показано, то алгоритм подачи воды, основанный на постепенном вытеснении зоны пиролиза снизу-вверх ведет себя хорошо, в случае одиночного фронта пожара. Однако, при наличии нескольких фронтов горения, данный алгоритм не производит выбор фронта горения, который рациональнее тушить.

Ключевые слова: численное моделирование, тушение пожаров, подача воды.

Abstract. The study deals with influence of forest canopy structure and water supply approaches on intensity of forest fire during suppression activities. The influence critical temperature of water supply aiming point was modelled for homogenous forest canopy. Water supply automation algorithm is based on lexicographic criteria ranging. It is illustrated that stable effective algorithm based on step-by-step shifting pyrolysis zone in vertical direction is suitable only for local fire front, not for multiple fire seats.

Key words: numerical simulation, water supply, wildfire suppression activities.

Численному моделированию распространения горения по лесной растительности и его тушению посвящено много работ, включая [1-3]. Моделирование процессов, происходящих при тушении горения, распространяющегося в слое растительности включает решение сопряженных нестационарных задач механики активных сред, и требует включения в модель физических и химических свойств растительности. [4], [9]. Аналитические решения в виде распространяющейся волны горения лесных горючих материалов являются актуальной темой исследований на настоящий момент. Но при этом исследователи отмечают проблематику значительного времени моделирования полных физических моделей, которое на порядки может превышать длительность протекания самого процесса горения. [6-7].

Несмотря на постоянное внимание исследователей к определению подходов к аналитическому решению задачи, непосредственно процессам тушения, с включением их в аналитическое решение распространения волны горения, уделено недостаточное внимание.

Очевидным способом борьбы с огнем при пожаротушении в лесу является использование воды [8]. При тушении лесного пожара преимущественным фактором эффекта воды является поглощение энергии пожара и ограничением доступа кислорода [5]. Эффективность тушения посредством указанных выше эффектов определяется зоной фронта пожара, куда направляется водяная завеса. Построение комплексных моделей динамики тушения лесных пожаров, принимающих во внимание рельеф местности, искусственные преграды и структуру растительности является актуальной задачей.

В предлагаемой работе исследуются влияния характеристик структуры лесных горючих материалов (ЛГМ) и способов подачи воды на требуемую её интенсивность при тушении лесного пожара.

Предполагается, что высота леса составляет 4 м, высота нижнего слоя – 0,4 м, верхнего – 3,6 м. Парциальная плотность сухого органического вещества в верхнем слое составляет 2 кг/м³, в нижнем слое плотность составляет от 1 до 32 кг/м³ в различных сериях расчётов.

Рассмотрим математическую модель распространения и тушения лесного пожара

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V W dV + \oint_{\Gamma} [\Phi - G] da = \int_V H dV \quad (1)$$

где V – контрольный объем (ячейка), Γ – граница контрольного объема.

$$W = \begin{bmatrix} \rho_5 \\ \rho_5 v \\ \rho_5 C_\alpha \\ \left(\sum_{i=1}^3 \rho_i \varphi_i + \rho_5 c_{p5} \right) T \\ 0 \end{bmatrix} \quad \Phi = \begin{bmatrix} \rho_5 v \\ \rho_5 v \otimes v + pI \\ \rho_5 C_\alpha v \\ \rho_5 c_{p5} T v \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ \mu_t \nabla U \\ \rho_5 D_t \nabla C_\alpha \\ \lambda_t \nabla T \\ \frac{c}{3k_\Sigma} \nabla U_R \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} Q \\ -\rho_5 S c_d v |v| + g \\ R_{5\alpha} \\ E_s \\ k_s (c U_R - 4\sigma T^4) \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -R_1 \\ -R_2 \\ \alpha_c R_1 - \frac{M_c}{M_1} R_3 \end{pmatrix}; \quad (4)$$

$$E_s = q_1 R_1 - q_2 R_2 + q_3 R_3 - q_4 R_4 + q_5 R_5 + k_s (c U_R - 4\sigma T^4) + f(x, z, t) T_e c_{p4}; \quad (5)$$

$$q_1 = (6,85 \cdot 10^5 \operatorname{sign}(T - 593K) + 3,15 \cdot 10^5) \text{ Дж/кг}; \quad (6)$$

$$Q = (1 - \alpha_c) R_1 + R_2 + R_4 + \frac{M_c}{M_1} R_3; \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1 \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) \\ k_2 \rho_2 \varphi_2 T^{-0.5} \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) \\ k_3 S_\sigma \rho_5 \varphi_3 C_1 \exp\left(-\frac{E_3}{RT}\right) \\ \begin{cases} \frac{1}{q_4} T \left(\sum_{i=1}^4 \rho_i \varphi_i c_{pi} + \rho_5 c_{p5} \right), \text{ при } \varphi_4 > 0 \text{ и } T = T_b \\ f(x, z, t), \text{ при } \varphi_4 = 0 \text{ и } T > T_b \\ 0, \text{ иначе} \end{cases} \\ \begin{cases} k_5 M_2 T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right) x_1^{0.25} x_2, x_1 \geq 0.05, \\ k_5 M_2 T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right) x_1 x_2, x_1 < 0.05, \end{cases} \end{pmatrix}; \quad (8)$$

$$x_\alpha = M \frac{C_\alpha}{M_\alpha}; \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} R_{51} \\ R_{52} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_3 - \frac{R_5 M_1}{2M_2} \\ (1 - \alpha_c) \nu_{\Gamma} R_1 - R_5 \end{pmatrix}; \quad (10)$$

$$P = \frac{\rho_5 RT}{M}, \quad \frac{1}{M} = \sum_{\alpha=1}^3 \frac{C_{\alpha}}{M_{\alpha}}, \quad \sum_{\alpha=1}^3 C_{\alpha} = 1, \quad \sum_{i=1}^5 \varphi_i = 1; \quad (11)$$

где T' - скорость изменения температуры, которое бы имело место в случае отсутствия процесса кипения свободной воды, К; $c_{pi}, \rho_i, \varphi_i$ - удельная теплоемкость, истинная плотность и объемная доля, Дж/(кг·К), кг/м³ ($i=1$ - сухое органическое вещество, $i=2$ - связанная вода, $i=3$ - конденсированные продукты пиролиза, $i=5$ - газовая фаза); T - температура среды, К; C_{α} - массовые концентрации компонентов газовой фазы ($i=1$ - кислород, $i=2$ - горючие компоненты продукта пиролиза, $i=3$ - инертные компоненты газовой фазы, не реагирующие компоненты продукта пиролиза и водяного пара); ν - вектор скорости газовой фазы, м/с; P - давление, Па; U_R - плотность потока излучения, Дж/м⁴; k_{Σ} - коэффициент ослабления, с⁻²; k_s - спектральный коэффициент поглощения; c - скорость света, м/с; σ - постоянная Стефана-Больцмана, кг·с⁻³·К⁻⁴; R_1, R_2, R_3, R_5 - массовые скорости реакции пиролиза сухого органического вещества, испарения влаги, горения конденсированных и летучих продуктов пиролиза соответственно, кг/(с·м³); $q_1(T), q_2, q_3, q_5$ - тепловые эффекты реакций пиролиза, испарения, горения кокса и окисления летучих продуктов пиролиза, Дж/кг; Q - массовая скорость образования газовой фазы, кг/(с·м³); M_{α}, M_c, M - молярные массы индивидуальных компонентов, углерода и смеси в целом, кг/моль; S - удельная поверхность фитомассы полога, 1/м, c_d - эмпирический коэффициент аэродинамического сопротивления; α_c, ν_{Γ} - коксовое число РГМ и массовая доля горючего газа в общей массе летучих продуктов пиролиза соответственно; μ_i, λ_i, D_i - коэффициенты динамической вязкости, турбулентной теплопроводности и турбулентной диффузии соответственно, Па·с, Вт/(м·К), м²/с; E_i и k_i - энергия активации и предэкспонента химической реакции соответственно пиролиза сухого органического вещества РГМ, испарения влаги, горения конденсированных продуктов пиролиза, горения летучих продуктов пиролиза; $E_1 = 9400 \cdot RK$; $E_2 = 6000 \cdot RK$; $E_3 = 10000 \cdot RK$; $E_5 = 11500 \cdot R$ К; $k_1 = 36300 \text{ с}^{-1}$; $k_2 = 600000 \text{ К}^{0.5} \cdot \text{с}^{-1}$; $k_3 = 1000 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1} / \text{м}^2$; $k_5 = 3 \cdot 10^{13} \text{ К}^{2.25} \cdot \text{моль} \cdot \text{с}^{-1} / \text{м}^3$; g - величина силы тяжести, м/с²; универсальная газовая постоянная $R = 8,3145 \text{ м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{Моль}^{-1}$. R_4 - массовая скорость процесса кипения свободной воды, кг/(с·м³); ρ_4 - истинная плотность, кг/м³; φ_4 - объемная доля свободной воды; $f(x, z, t)$ - массовая скорость подачи свободной воды, кг/(с·м³).

Оценка эффективности мероприятий по тушению лесного пожара в части определения критической температуры для точки направления воды в очаг

пожара является предметом данного исследования. В основе алгоритма автоматического управления источником подачи воды положено лексикографическое упорядочивание критериев, приведенных ниже:

- 1) $(x, z) \in F_\gamma \wedge x_p - d_p \leq x \leq x_p \wedge T > T_{cr, \min}$,
- 2) $z(1 - P[T(x, z) \leq T_{cr}]) + z_{\max} P[T(x, z) \leq T_{cr}] \rightarrow \min$,
- 3) $x(1 - P[T(x, z) \leq T_{cr}]) - x_{\max} P[T(x, z) \leq T_{cr}] \rightarrow \max$,
- 4) $T(x, z) \rightarrow \max$,

Необходимым условием в данном случае является именно первый критерий, которому должна удовлетворять точка, для того чтобы она была выбрана. Критерий второй и третий созданы таким способом, чтобы реализовывать прежде всего ликвидацию нижней части зоны горения, уменьшая его температуру ниже T_{cr} . Критерий третий внедрен для увеличения надежности работы алгоритма при высоких значениях T_{cr} . Вместе с тем T_{cr} является параметром данного алгоритма и может принимать любое значение, но следует отметить, что максимально точное значение зависит от типа пожара, структуры и типа ЛГМ.

В настоящей работе анализируется задача о действии критической температуры точки прицела на продуктивность погашение лесного пожара в однородном слое ЛГМ с $\rho_1 = 2 \text{ кг/м}^3$. Динамика тушения лесного пожара при $T_{cr}=400 \text{ К}$ и интенсивности подачи воды ниже критической представлена на рис.1 в различные моменты времени. Низкая критическая температура способствует тому, что даже при небольшом нагреве приземного слоя растительности, в случаи подаче воды в зону горения, легко производится тушение (8 с). Однако, пламя пожара нагревает приземный слой растительности, превышая пороговую температуру 400 К, потому источник именно туда подает воду большую часть времени (15 с), приводя к непродуктивному тушению пожара. Тем не менее, как показали результаты численного моделирования, в случае если $w_{\text{int}}=0,528 \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$ пожар прогрессивно выталкивается вверх до его полного погашения.

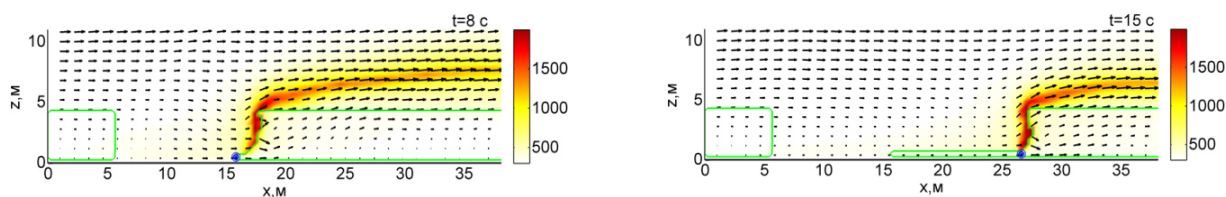


Рис. 1 Динамика тушения лесного пожара при $T_{cr}=400 \text{ К}$, $w_{\text{int}}=0,527 \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$

Динамика тушения пожара при $T_{cr}=700 \text{ К}$ и интенсивности подачи воды ниже критической показана на рис. 2. В начале тушения (7,4 с) вода попадает в нижнюю часть слоя леса, что приводит к существенному снижению температуры около прицела источника подачи воды (7,6 с). Однако, подача воды препятствует пожару только в нижней части слоя ЛГМ, большая часть фронта пожара двигается вперед, точка прицела источника подачи воды тоже перемещается вперед в соответствии с созданным алгоритмом. В конечном

счете пламя загорается позади основной части фронта пожара (8 с). При последующем тушении пламени, фронт пожара растягивается по горизонтали, что повышает приток энергии в нижнюю часть слоя ЛГМ, задерживая ликвидацию пожара.

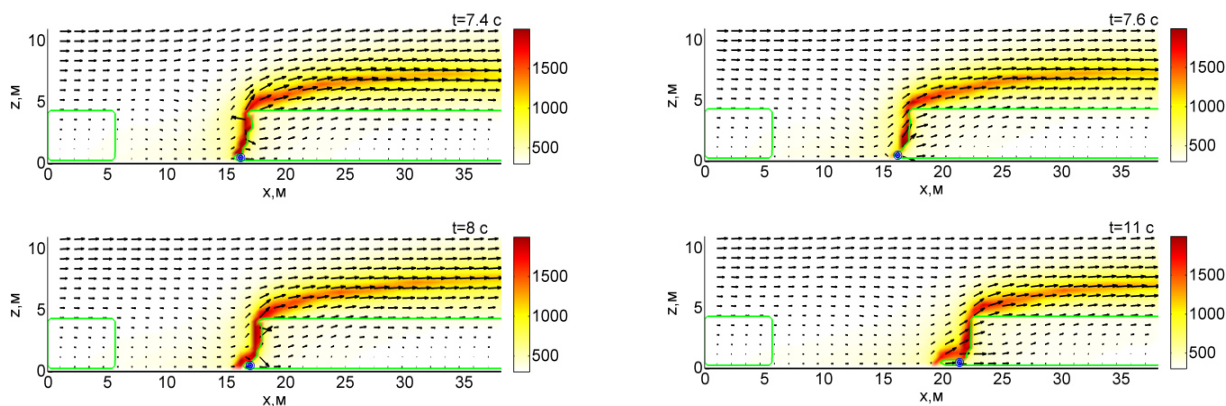


Рис. 2 Динамика тушения лесного пожара при $T_{cr}=700$ К, $w_{int}=0,248$ кг/(м·с)

При интенсивности подачи воды ниже критической и $T_{cr}=1000$ К тушение безуспешно в связи со вспышкой позади основного фронта пожара.

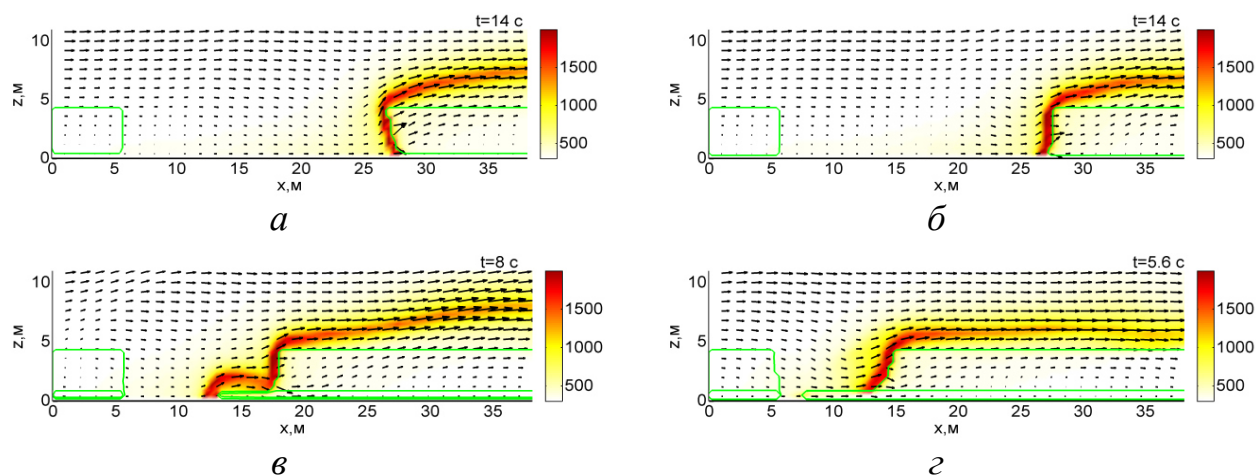


Рис. 3. Конфигурация фронта лесного пожара при различных значениях парциальной плотности сухого органического вещества в нижнем слое
а – 1 кг/м³, б – 2 кг/м³, в – 4 кг/м³, г – 16 кг/м³

При различных значениях плотности нижнего слоя ЛГМ на рис. 3 представлена типичная конфигурация фронта пожара. Быстрое сгорание происходит при плотности нижнего слоя 1 кг/м³, что приводит к изгибанию всего фронта пожара. При увеличении плотности нижнего слоя ЛГМ (4-8 кг/м³), движение горения в нем происходит замедленно, наряду с этим вероятно возникновение вспышек. При плотности нижнего слоя 16-32 кг/м³, процесс горения в нем не поддерживается.

В данной работе исследуется влияние плотности нижнего слоя ЛГМ на эффективность тушения лесного пожара при критической температуре T_{cr}

=800 К. Зависимость критической интенсивности подачи воды от плотности нижнего слоя ЛГМ приведена в таблице 1.

Таблица 1.

Зависимость критической интенсивности подачи воды от плотности нижнего слоя ЛГМ

Плотность нижнего слоя, кг/м ³	1	2	4	8	16	32
w_{int} , кг/(м·с)	0,2225	0,2665	0,2835	0,6385	0,2435	0,2295

Максимальное препятствия тушению лесного пожара, как видно, из таблицы 1 происходит при плотности нижнего слоя ЛГМ 8 кг/м³. В связи с этим, максимальный интерес представляет исследование влияния критической температуры T_{cr} на требуемую интенсивность подачи воды при плотности нижнего слоя ЛГМ, равной 8 кг/м³.

Таблица 2.

Влияние критической температуры на требуемую интенсивность подачи воды при различных значениях плотности нижнего слоя растительности

T_{cr} , К	w_{int} , кг/(м·с)	
	Плотность нижнего слоя 2 кг/м ³	Плотность нижнего слоя 8 кг/м ³
500	0,3965	1,4725
600	0,3225	0,9915
700	0,2485	0,8905
800	0,2665	0,6385
900	0,3125	1,0155
1000	0,3955	1,4595

Необходимо также заметить, что более плотный нижний слой ЛГМ поддерживает изменение потоков нагретой газовой фазы, при котором вероятно возгорание верхней части слоя ЛГМ впереди фронта пожара, вне области досягаемости источника подачи воды, что приводит к развитию пожара в этой области. Такое поведения огня наиболее опасна для пожарных, так как может заградить им пути к отступлению.

Таким образом алгоритм подачи воды, основанный на постепенном вытеснении зоны пиролиза снизу-вверх показал себя хорошо, в случае одиночного фронта пожара. Это объясняется тем, что нижний фронт пожара поддерживает верхний, тогда как обратный эффект намного слабее, что поддерживает продуктивность подачи воды в нижнюю часть фронта горения. Однако, при наличии нескольких фронтов горения, данный алгоритм не производит выбор фронта горения, который рациональнее тушить. Примером такого пожара является пятнистый верховой пожар. При таком пожаре возможен перенос веточек и других горящих частиц за фронт пожара.

Литература

1. Катаева Л. Ю., Постнов А. Д., Лоцилов С. А., Масленников Д. А. О влиянии водного барьера на динамику развития лесного пожара в зависимости от рельефа местности // Пожаровзрывобезопасность. 2014. Т. 23. № 1.
2. Масленников Д.А., Катаева Л. Ю., Галина Н. В. Влияние холмов на динамику лесного пожара // Успехи современного естествознания. 2012. № 6.
3. Белоцерковская И. Е., Катаева Л. Ю., Масленников Д. А., Лоцилов С. А. Влияние водного барьера на динамику ландшафтных лесных пожаров // Естественные и технические науки. 2013. № 3 (65).
4. Катаева Л. Ю., Карпухин В. Б. О методе Гира численного моделирования динамических систем, описываемых жесткими обыкновенными дифференциальными уравнениями // Наука и техника транспорта. 2008. № 1.
5. Романова Н. А., Масленников Д. А., Белоцерковская И. Е., Катаева Л. Ю. Влияние водного барьера на эффективность тушения лесного пожара // Инновации в науке. 2013. № 27.
6. Катаева Л. Ю., Крайзлер М. Б., Савченко А. В. Методы решения задач естествознания // учебное пособие для студентов технических специальностей // Федеральное агентство по образованию, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева. Нижний Новгород, 2007.
7. Масленников Д. А., Анучин И. Е., Тумасов А. В., Катаева Л. Ю., Котова Ю. В. Влияние числа Рейнольдса на аэродинамическое сопротивление моделей // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6.
8. Лоцилов С. А., Масленников Д. А., Постнов А. Д., Катаева Л. Ю. Исследование влияния интенсивности сброса воды на динамику лесного пожара // Естественные и технические науки. 2013. № 6 (68).
9. Lobkovsky L. I., Baranov B. V., Mazova R. Kh., Kataeva L. Yu. Generation and propagation of catastrophic tsunamis in the sea of Okhotsk basin: possible scenarios // Doklady Earth Sciences. 2006. Т. 410. № 7.