УДК 535.5 + 621.658.011 : 620.1

***И. У. ПРИМАК**, канд. физ.-мат. наук, доц.*
***А. В. ХОМЧЕНКО**, доктор физ.-мат. наук, доц.*
Е. М. КОЗЛОВ,
В.Э. КЛЮС
Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ СВЕТА В СТЕКЛЕ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИКИ ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Аннотация

Выполнено моделирование динамики рассеяния света на неоднородностях, обусловленных термоупругими напряжениями в стекле. Проанализировано влияние процессов теплоотдачи на вид пространственного распределения интенсивности рассеянного света.

Ключевые слова: рассеяние света, термоупругие напряжения.

Одной из важных задач при производстве и эксплуатации стекла является анал---из и контроль механических напряжений, обусловленных изменением температурного режима. В этой связи представляет практический интерес адаптация известных методов измерения остаточных напряжений к диагностике термонапряжений. Данная работа посвящена анализу возможностей метода регистрации рассеянного света [1-2] для контроля такого рода напряжений.

Рассмотрена задача моделирования динамики пространственного распределения интенсивности рассеяния света на неоднородностях, обусловленных термоупругими напряжениями в пластине стекла длиной L, шириной b и толщиной d (рис. 1).

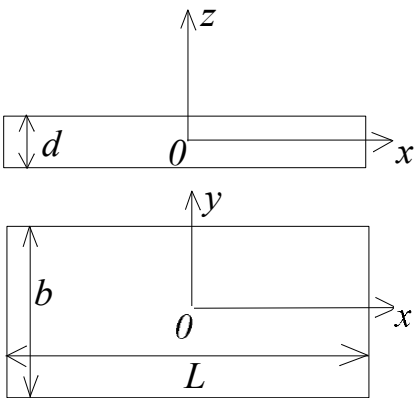

Рис. 1. Исследуемая пластина стекла

Как известно, интенсивность рассеянного света определяется [1-2]

$$I = I_0 \sin^2 \Delta / 2,$$

где $I_0 -$ коэффициент учитывающий отражение падающего нормально света на пластину стекла, Δ - разность фаз между обыкновенной и необыкновенной волнами, которые возникают при распространении света в стекле, в условиях термоупругих напряжений.

Используя полученное в [3] приближенное решение термоупругой задачи для остывающей тонкой пластины (*d<<b<L),* а также взаимосвязь между главными значениями напряжений и разностью фаз [4], была рассчитана Δ в случае нормального падения света на поверхность стекла параллельной плоскости *0YZ*

$$\Delta \simeq \frac{\alpha_T E(T_0 - T_C) k_0 LC}{1-\nu} \cos(2\varepsilon_1 z') e^{-4at\frac{\varepsilon_1^2}{d^2}} \times$$
$$\times \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty} A_i B_j e^{-4at\left(\frac{\mu_i^2}{L^2}+\frac{p_j^2}{b^2}\right)} \left[\cos\left(p_j\right) - \cos\left(2p_j y'\right)\right] \left(\frac{\sin\left(2\mu_i x'\right) + \sin\left(\mu_i\right)}{2\mu_i}\right), \quad (1)$$

где $\Delta = \Delta(x', y', z') -$ функция характеризующая разность фаз в точке (x', y', z'), $x' = x / L$, $y' = y / b$, $z' = z / d$ – нормированные координаты, t – время остывания;

$$C_к = \frac{2\sin\left(\varepsilon_k\right)}{\varepsilon_k + 0.5\sin\left(2\varepsilon_k\right)},\ A_i = \frac{2\sin\left(\mu_i\right)}{\mu_i + 0.5\sin\left(2\mu_i\right)},\ B_j = \frac{2\sin\left(p_j\right)}{p_j + 0.5\sin\left(2p_j\right)}\ (k,i,j \in N)$$

- коэффициенты, в которых значения параметров ε_k, μ_i и p_j находятся при решении уравнений: $\mathrm{ctg}\left(\varepsilon_k\right) = 2\varepsilon_k \lambda / \alpha_z d$, $\mathrm{ctg}\left(\mu_i\right) = 2\mu_i \lambda / \alpha_x L$, $\mathrm{ctg}\left(p_j\right) = 2p_j \lambda / \alpha_y b$ $(k,i,j \in N)$; $a -$ коэффициент температуропроводности, $\lambda -$ коэффициент теплопроводности, α_z, α_x, $\alpha_y -$ коэффициенты теплоотдачи, $T_C -$ температура окружающей среды, $T_0 -$ начальная температура стекла, $E -$ модуль упругости, $\nu -$ коэффициент Пуассона, $\alpha_T -$ коэффициент линейного теплового расширения, $C -$ коэффициент фотоупругости стекла, $k_0 = 2\pi / \lambda_0$, $\lambda_0 -$ длина волны в вакууме.

На основе представленных формул выполнено численное моделирование рассеяния света, рассчитаны интенсивность $I(x', 0, z')$ и разность фаз $\Delta(x', 0, z')$ в различные моменты времени. При этом использовались следующие значения параметров: $d = 6 \cdot 10^{-3}$ м, $L = 0{,}4$ м, $b = 0{,}2$ м, $T_C = 293 K$, $T_0 = 493 K$, $a = 3{,}4 \cdot 10^{-7}$ м^{2}с$^{-1}$, $\lambda = 1$ Вт м$^{-1}$К$^{-1}$, $\alpha_z = \alpha_x = \alpha_y = 1$ Вт м$^{-2}$К$^{-1}$, $\nu = 0{,}22$

$\alpha_T = 11{,}2 \cdot 10^{-6} K^{-1}$, $E = 68000$ МПа, $\lambda_0 = 0{,}6328$ мкм. Результаты расчетов при t = 100, 2000, 8000 сек соответствующих $|\Delta(x', 0, z')|$ и $I(x', 0, z')$ представлены на рис.2 *а* и *2б*, рис.3*а* и 3*б*, рис. 4*а* и 4*б*.

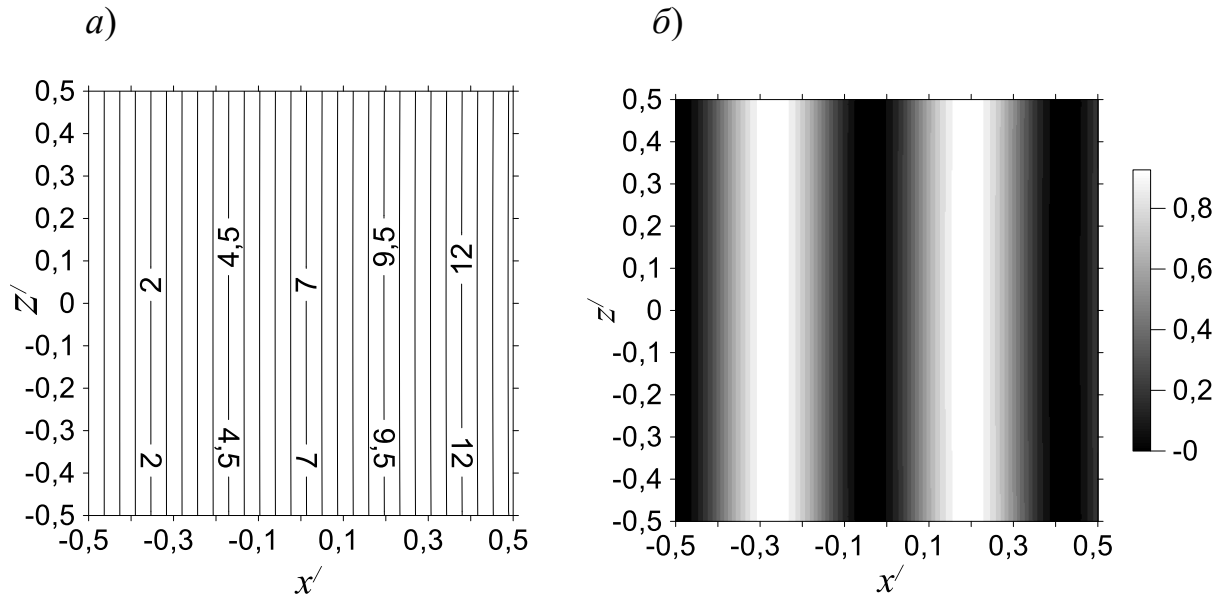

Рис. 2. Зависимости модуля разности фаз $|\Delta(x', 0, z')|$ (*а*) и интенсивности рассеянного света $I(x', 0, z')$ (*б*) в нагретом стекле от нормированных координат при t=100 с

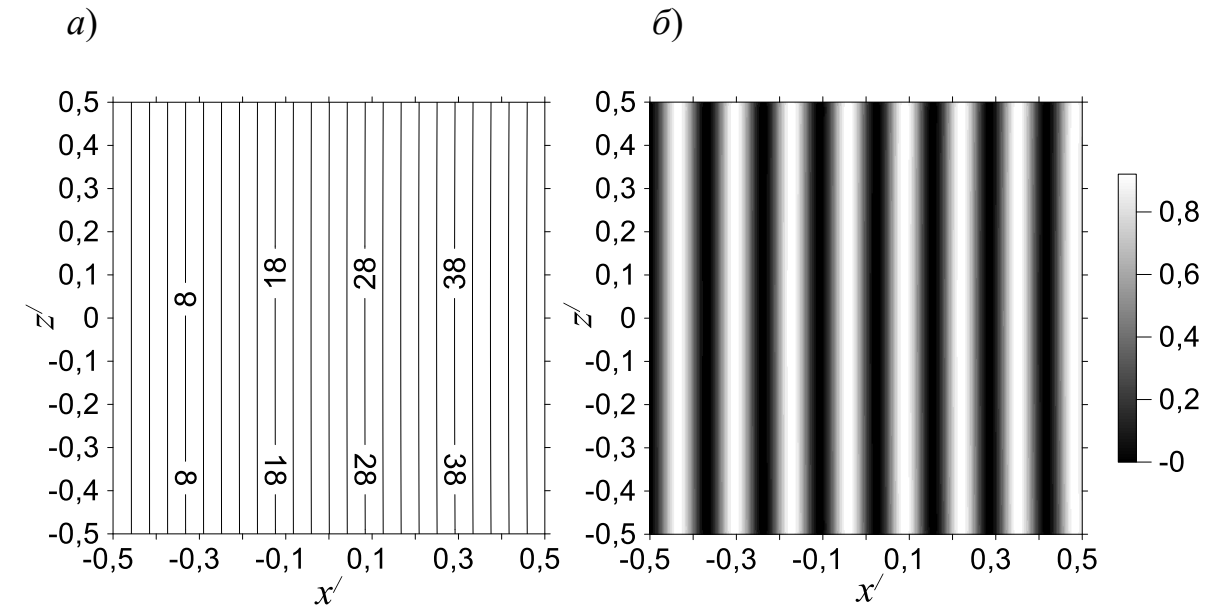

Рис. 3. Зависимости модуля разности фаз $|\Delta(x', 0, z')|$ (*а*) и интенсивности рассеянного света $I(x', 0, z')$ (*б*) в нагретом стекле от нормированных координат при t = 2000 с

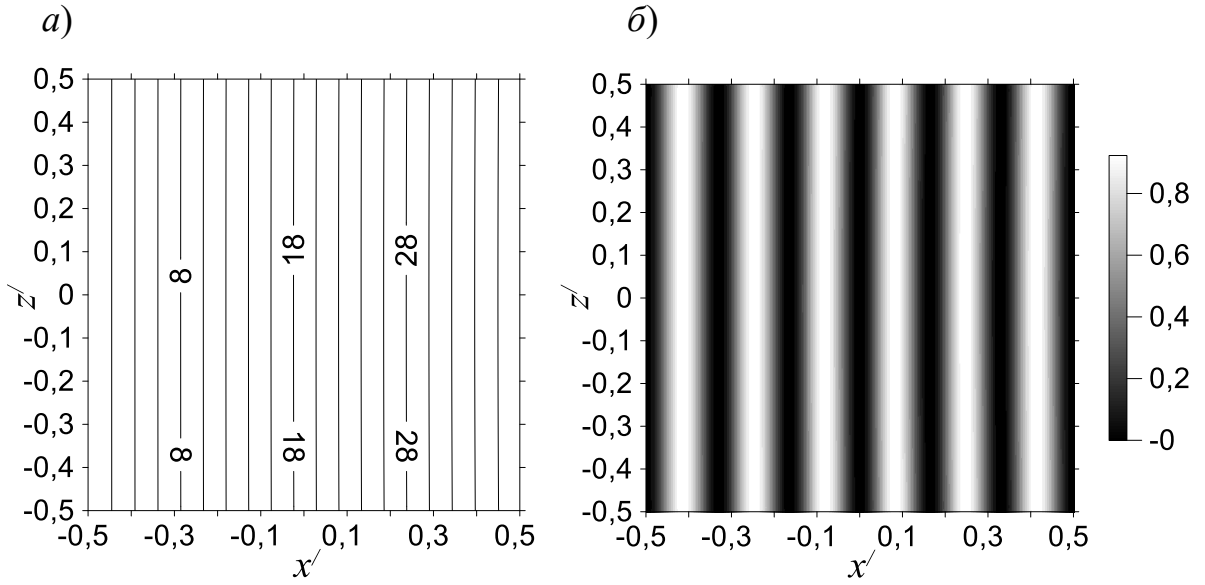

Рис. 4. Зависимости модуля разности фаз $|\Delta(x',0,z')|$ (*а*) и интенсивности рассеянного света $I(x',0,z')$ (*б*) в нагретом стекле от нормированных координат при t = 8000 с

Результаты расчетов подтверждают известную из экспериментов периодическую картину рассеяния света в стеклах с остаточными напряжениями [2]. Однако имеется отличие, состоящее в том, что в этих расчетах построенные линии уровня (рис. 1*а*, 2*а*, 3*а*) представляют собой прямые параллельные оси *0Z* (рис. 1), в тоже время в экспериментах [2] линии уровня это кривые. Это отличие можно объяснить механизмом возникновения остаточных напряжений, чаще всего это так называемые закалочные напряжения, которые также возникают при охлаждении стекла, однако рассматриваемые там коэффициенты теплоотдачи существенно больше, вследствие особенностей процессов закалки, по сравнению с теми значениями, что использовались в расчетах. Действительно, при низкой теплоотдаче, температура и напряжения распределены практически равномерно и как следствие имеем равномерное распределение разности фазы вдоль прямых параллельных оси *0Z*. Высокая теплоотдача приводит к неравномерным распределениям температуры и напряжений во всей пластине стекла и поэтому распределение разности фаз в этом случае является более сложным.

В связи выше сказанным были проведены расчеты $\Delta(x',0,z')$ и $I(x',0,z')$ существенно для более высоких значений коэффициентов теплоотдачи $\alpha_z = \alpha_x = \alpha_y = 100$ Вт м$^{-2}$K^{-1} при t = 20, 100, 400 с. Следует отметить, что такое повышение коэффициента теплоотдачи стекла может быть достигнуто за счет использования воздушного охлаждения или металлических радиаторов [5]. Результаты расчетов $|\Delta(x',0,z')|$ и $I(x',0,z')$ представлены соответственно на рис. 5*а* и 5*б*, рис. 6*а* и 6*б*, рис. 7*а* и *7б*.

Представленные на этих рисунках результаты, в общем, подтвердили наше предположение о влиянии процессов теплоотдачи на характер распределения разности фаз и интенсивности рассеянного света. Подобные распределения можно увидеть в [2].

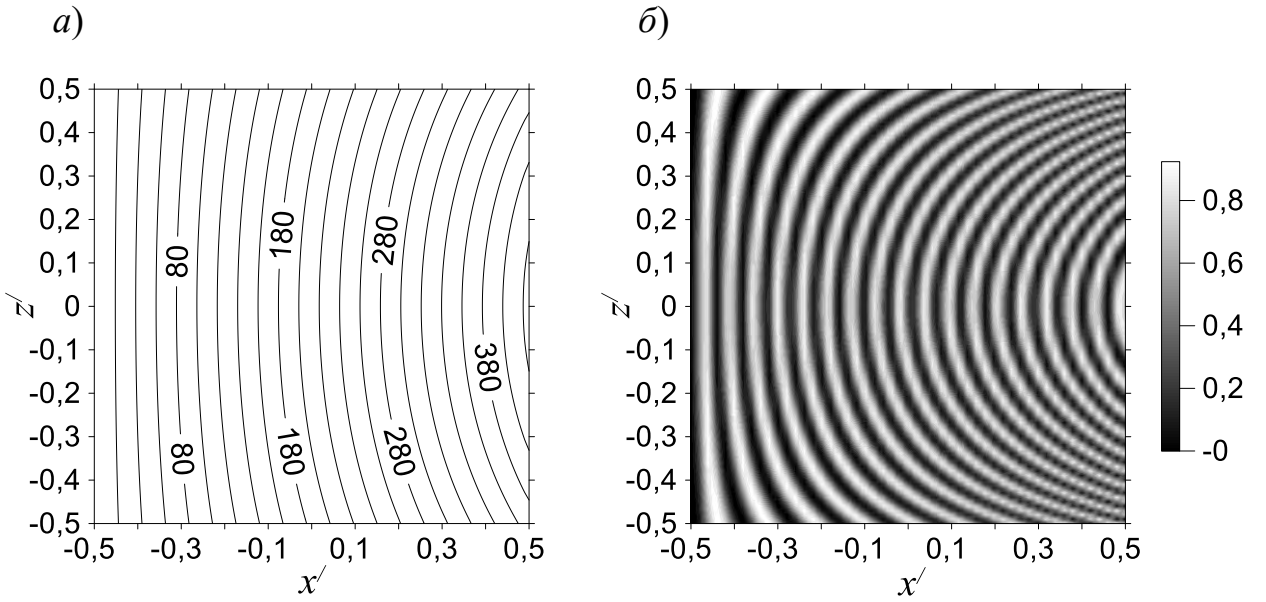

Рис. 5. Зависимости модуля разности фаз $|\Delta(x',0,z')|$ (*а*) и интенсивности рассеянного света $I(x',0,z')$ (*б*) в нагретом стекле от нормированных координат при *t*=20 с

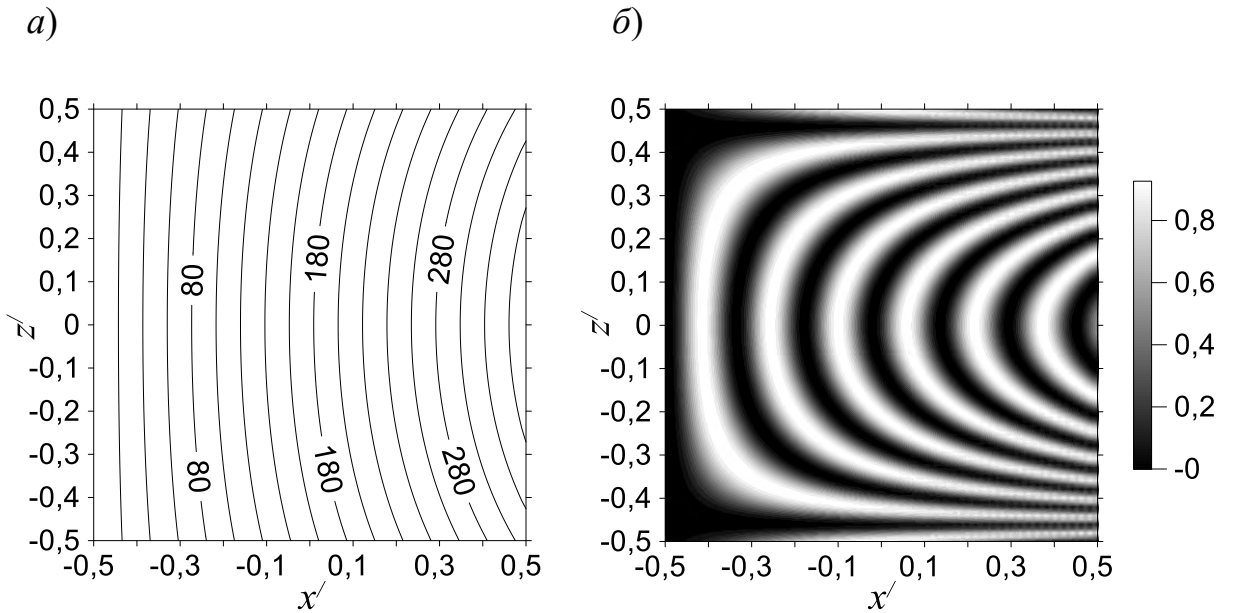

Рис. 6. Зависимости модуля разности фаз $|\Delta(x',0,z')|$ (*а*) и интенсивности рассеянного света $I(x',0,z')$ (*б*) в нагретом стекле от нормированных координат при *t*=100 с

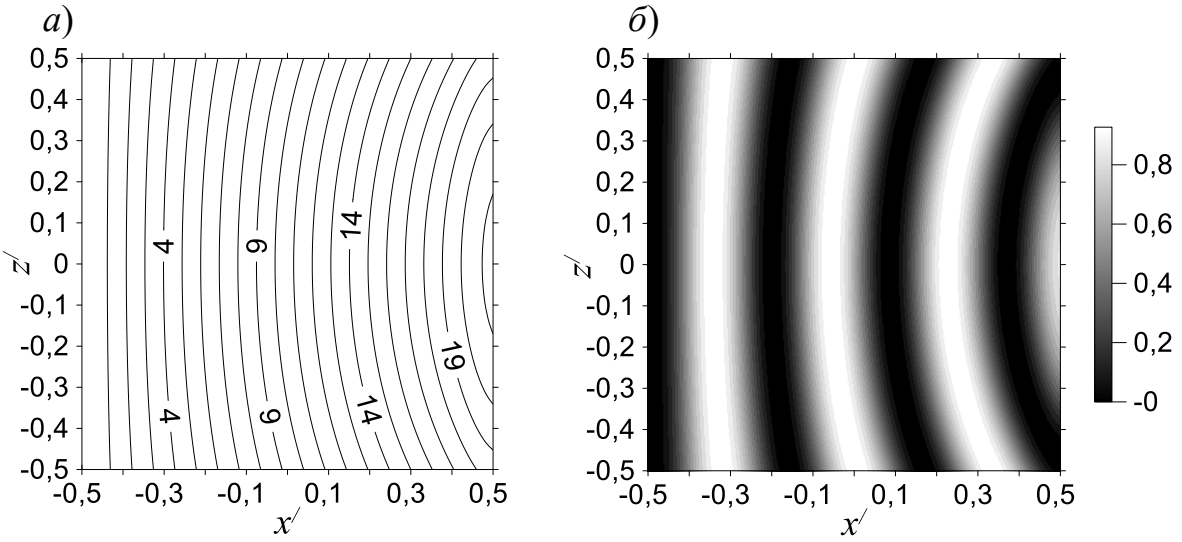

Рис. 7. Зависимости модуля разности фаз $\left|\Delta(x',0,z')\right|$ (*а*) и интенсивности рассеянного света $I(x',0,z')$ (*б*) в нагретом стекле от нормированных координат при *t*=400 с

В заключении отметим, что анализ предложенной модели, а также представленных распределений показал, что из измерений динамики рассеяния света можно получить оценки коэффициента температурапроводности стекла. Определение остальных температурных коэффициентов стекла также возможно при больших значениях коэффициентов теплоотдачи и строиться на обработке пространственного распределения рассеяния света.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров, А.Я. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела/ А. Александров, М. Ахметзянов − М: Наука, 1973.−575с.
2. Castellini, P. Laser sheet scattered light method for industrial measurement of thickness residual stress distribution in flat tempered glass / P. Castellini, L. Stroppa, N. Paone // Optics and Lasers in Engineering –2012. –Vol.50. – P. 787-795.
3. Примак, И.У. К проблеме решения термоупругой задачи в безопасном стекле для наземного транспорта / И.У. Примак, А.В. Хомченко // Матер., оборуд. и ресурсосбер. техн.: материалы Межд. научн.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020. –С. 504−506.
4. Примак, И.У. Моделирование пропускания света стеклом при наличии термоупругих напряжений / И.У. Примак, А.В. Хомченко // Матер. оборуд. и ресурсосбер. техн.: матер. Межд. научн.-техн. конф. – Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2021. – С. 396−399.
5. Sinha, N.K. Stress State in Tempered Glass Plate and Determination of Heat-transfer rate // Experimental mechanics. –1978. –Vol.18. № 1. – P. 15–34.

Контакты:
primak_igor@mail.ru (Примак Игорь Ульянович)
avkh@mogilev.by (Хомченко Александр Васильевич)