



ЛОГИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ ТЕМПОВ ВОСПРОИЗВОДСТВА МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ ЗОЛОТА В РОССИИ

М. Ю. Харитонов¹, Н. А. Мацко²

¹Институт химии и химической технологии ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия, ²ФИЦ «Информатика и управление» РАН Институт системного анализа РАН, Москва, Россия

Предлагается модель для экспресс-прогнозирования динамики добываемых объемов и прироста запасов золота. Модель позволяет определять необходимый темп ввода запасов в освоение, сроки достижения максимальных объемов добычи золота, уровень воспроизводства запасов, обеспечивающий рост добываемых объемов с заданным темпом при необходимой обеспеченности запасами, а также параметры, характеризующие различные сценарии развития золотодобывающей отрасли. Установлено, что разведанные в настоящее время запасы обеспечат эксплуатацию сырьевой базы с сохранением достигнутых темпов роста годовой мощности (3 % в год) в течение примерно 6 лет. Далее, если не произойдет существенного увеличения запасов, начнется снижение годовых объемов. Для сохранения достигнутых темпов роста объемов добычи золота на протяжении 15 лет и поддержания обеспеченности запасами на уровне не менее 20 лет необходимо, чтобы коэффициент компенсации накопленной добычи открываемыми запасами в течение 10 лет превышал 1.

Ключевые слова: минерально-сырьевая база, золотодобыча, темп воспроизводства, геологические запасы, экспресс-прогнозирование.

LOGISTIC MODEL FOR EXPRESS EVALUATION OF REPLACEMENT RATES OF GOLD RESOURCE BASE IN RUSSIA

M. Yu. Kharitonova¹, N. A. Matsko²

¹Institute of Chemistry and Chemical Technology FRC KRC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia; ²FRC "Computer Science and Control" Russian Academy of Sciences Institute for Systems Analysis of RAS, Moscow, Russia

The article suggests a model for express forecasting of the dynamics of extracted gold volumes and mining gain. The model makes it possible to determine the necessary rate of input of reserves for development, the timing of achieving maximum gold production, the level of replacement of reserves ensuring the growth of produced volumes at a given rate with the required supply of reserves and other parameters characterizing various scenarios for the development of the gold mining industry. It is established that the reserves that have been discovered so far will ensure the exploitation of the raw material base while maintaining the achieved annual growth rate (3% per year) for about 6 years. Further, if there is no significant increase in reserves, annual volumes will begin to decline. In order to maintain the achieved growth rates of gold production for 15 years and provision of reserves at a level of not less than 20 years, it is necessary that the compensation factor of accumulated production by discoverable reserves during 10 years exceeds 1.

Keywords: mineral resource base, gold production, rate of replacement, geological reserves, express-forecasting.

DOI 10.20403/2078-0575-2018-3-81-85

В 2014 г. в РФ добыча золота превысила 300 т в год. Согласно прогнозам пик добычи еще не пройден. Такое масштабное освоение золотосодержащих месторождений ставит серьезные задачи по обеспечению отрасли разведанными запасами и ресурсами. Проблемой отечественной геологоразведки с 1990-х гг. являлись низкие, а порой и отрицательные темпы прироста запасов. Подобная ситуация была характерна практически для всего минерально-сырьевого комплекса России. Однако с начала 2000-х гг. положение в золотодобывающей отрасли резко изменилось: количество разведанных геологических запасов растет, и эта тенденция сохраняется до настоящего времени (рис. 1). В 2006 г. началось расширенное воспроизводство минерально-сырьевой базы (МСБ) золота. Произошло это за счет постановки на баланс запасов двух новых круп-

ных месторождений – Благодатное (Красноярский край) и Купол (Чукотский АО). До этого основную долю прироста запасов золота составлял прирост за счет переоценки ранее подсчитанных запасов и изучения на стадии освоения месторождений, прироста же за счет открытия новых объектов долгое время практически не было.

На сегодняшний день при прогнозируемом росте объемов добычи золота до 350 т в год обеспеченность России запасами составляет 20 лет, а с учетом прогнозных ресурсов – 27 лет. При этом, по мнению специалистов, существует большая вероятность открытия новых крупных рудных месторождений [3]. Вместе с тем процессу воспроизводства запасов присущ ряд особенностей, игнорирование которых создает проблемы для поступательного развития отрасли [1, 4, 5].

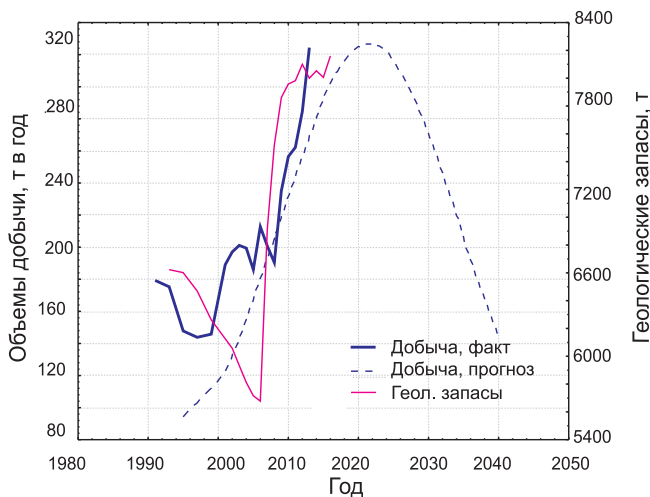


Рис. 1. Динамика объемов добычи и геологических запасов золота в РФ

Поиски и разведка запасов требуют значительных средств. В советский период геолого-разведочные работы носили планомерный характер и обеспечивались регулярным государственным финансированием, что создавало возможность расширенного воспроизводства МСБ. В рыночных условиях финансирование прироста запасов осуществляется в основном за счет инвесторов и не имеет регулярного характера. И если золоторудные гиганты (девять предприятий, обеспечивающих почти половину добычи) справляются с проблемами воспроизводства запасов, то огромное число мелких частных золотодобывающих компаний вкладывают лишь четверть от необходимого объема финансирования [3]. Отечественные золотодобывающие компании, ограниченные в свободных денежных средствах в период низких цен на золото, не направляют инвестиции не только в поиск новых объектов, но и в доразведку эксплуатируемых месторождений. Такая тенденция наблюдается не только в России, но и в мире в целом. Циклический характер инвестиций в геолого-разведочные работы (ГРР) во многом определяется рентабельностью сырьевых компаний. Низкие цены на металлы вынуждают компании ограничивать инвестиции в разведку, несмотря на то что предприятия непосредственно заинтересованы в развитии собственной МСБ. Общий бюджет на геологоразведку компаний мира, занимающихся добычей цветных металлов, к 2016 г. сокращался четыре года подряд.

Кроме того, что поиски и разведка месторождений связаны с большими затратами, отдача от инвестиций в разведку постоянно снижается. Связано это с низкой вероятностью открытия новых крупных месторождений в районах с высокой степенью геологической изученности, с перемещением ГРР на территории со сложными климатическими и инфраструктурными условиями, с усложнением и удорожанием технологии разведки, ухудшением горно-геологических условий, с ростом затрат на энергоносители, на использование земель и др.

Результатом снижения эффективности ГРР становится сокращение компаниями соответствующего бюджета. Для уменьшения рисков частных инвесторов задачу финансирования поиска и оценки прогнозных ресурсов берет на себя государство. Государству, как собственнику недр, интересно выявление крупных месторождений. Для того чтобы открыть и подтвердить запасы, нужен не один сезон разведки. Если такие крупные объекты будут установлены (вероятность для рудного золота большая), то необходимо принимать во внимание, что существует лаг времени между открытием месторождения и выводом его на проектные уровни добычи, который в мировой практике золотодобычи может достигать 20 лет. Как правило, столько времени занимают процессы доизучения месторождения, постановки запасов на учет, поиска инвесторов, подготовки необходимых технико-экономических обоснований и проектов, создания инфраструктуры и разработки новых технологий, если это необходимо. Подобные лаги необходимо учитывать при планировании процессов воспроизводства МСБ.

Разработка стратегии развития отрасли – достаточно трудоемкий процесс, требующий серьезных материальных затрат и времени, необходимости учета большого количества влияющих факторов, в том числе указанных ранее. Кроме того, показатели, заложенные в планах и прогнозах, подсчитанные для определенных условий, со временем нуждаются в уточнении и корректировке, что, в свою очередь, приводит к изменению целевых показателей стратегии. В связи с этим крайне желательно наличие инструментов для оперативного моделирования сценариев развития золотодобывающей отрасли.

Поэтому разработка модели для экспресс-прогнозирования динамики добываемых объемов и прироста запасов золота, чему посвящена данная статья, является весьма актуальной задачей.

Теоретическая модель

Исследование проводилось с использованием логистической модели, адаптированной для описания процесса добычи полезных ископаемых в регионе (стране). Достаточно широкое использование подобных моделей для прогноза динамики добычи запасов полезных ископаемых определяется неприменимостью экспоненциальных или линейных зависимостей для описания процессов освоения ограниченных ресурсов, а также логической непротиворечивостью характеру фактического изменения добываемых объемов сырья. Рассматриваемый метод ранее был использован авторами для прогнозирования объемов добычи золота в России и в регионах Сибири и Дальнего Востока [2].

Согласно модели график изменения годовых объемов добычи имеет колоколообразную форму.

Общий объем добытых запасов как функция времени $P(t)$ описывается уравнением



$$P(t) = \frac{SP_0 e^{rt}}{S + P_0(e^{rt} - 1)}, \quad (1)$$

где S – суммарные обрабатываемые запасы; P_0 – объем накопленной добычи в момент времени t_0 ; r – параметр, характеризующий скорость роста добычи.

Годовой объем добычи – это скорость изменения накопленной добычи, производная от $P(t)$ по t :

$$P'(t) = \frac{dP(t)}{dt} = \frac{SP_0 r e^{rt} (S - P_0)}{(S + P_0(e^{rt} - 1))^2} = P(t) \frac{r(S - P_0)}{S + P_0(e^{rt} - 1)}. \quad (2)$$

Функция (2) описывает в виде S -образной кривой изменение объемов накопленной добычи, сопровождающееся изменением скорости роста. Логистическая кривая (1) отражает кумулятивные (накопленные) объемы добычи к моменту времени t . По мере освоения сырьевой базы и кумулятивного накопления извлекаемых объемов логистическая кривая приближается к моменту насыщения, что соответствует полному исчерпанию запасов. Конечно, такая траектория развития объемов накопленной добычи отражает лишь направление, вектор, логику развития процесса. В действительности увеличение запасов в процессе геологоразведки позволит отодвинуть момент насыщения, сдвинет верхний предел (S) логистической кривой.

График изменения годовых объемов добычи во времени (2) имеет колоколообразную форму. Максимум можно определить, приравняв к нулю вторую производную. Пик (\max) годовых объемов добычи достигается в год t_{\max} :

$$t_{\max} = \frac{1}{r} \ln \frac{S - P_0}{P_0}. \quad (3)$$

Параметр r не зависит от времени и целиком определяет положение пика годовой добычи на графике добыча – время (см. рис. 1):

$$P'_{\max}(t_{\max}) = \frac{Sr}{4}; t_{\max} = \frac{1}{r} \ln \frac{P_0 - S}{-P_0}. \quad (4)$$

От параметра r зависит срок отработки запасов

$$T = \frac{1}{r} \ln \left[\frac{1}{P_0} \left(\frac{S^2 + SP_0}{\Delta} - S + P_0 \right) \right], \quad (5)$$

где T – срок, в течение которого запасы S будут отработаны более чем на 95 %; $\Delta = 0,05S$.

Как видно из формулы (5), срок отработки обратно пропорционален параметру r . Чем больше r , тем выше максимальная добыча, тем быстрее она достигается и тем больше сокращается срок разработки запасов T . Применительно к сырьевой базе, представленной фиксированным числом месторождений с фиксированными запасами: чем быстрее будут введены в разработку месторождения, тем выше будет пик (за счет того, что перекроются во

времени сроки их разработки) и короче срок отработки суммарных запасов.

Суммарные обрабатываемые запасы включают в себя уже добытые запасы $P(t)$ плюс разведанные геологические запасы $S_g(t)$ на начало прогнозного периода:

$$S = S_g(t) + P(t). \quad (6)$$

Для того чтобы компенсировать выбывающие в прогнозируемом периоде запасы и обеспечить рост годовой мощности, в предыдущем периоде должны быть разведаны запасы соответствующего объема. Этот объем геологических запасов может быть определен из уравнения

$$S_g(t) = P'(t_0)(1 + \alpha)^t N, \quad (7)$$

где $P'(t_0)$ – фактические значения годовых объемов добычи на начало прогнозного периода; α – темп прироста годовых объемов добычи; N – обеспеченность запасами, лет; t – текущий год прогнозного периода.

С помощью следующего уравнения можно определить максимальный темп роста (a) годовых объемов добычи с начальным значением $P'(t_0)$ при известной величине геологических запасов и заданной обеспеченности запасами N :

$$a = \left[\frac{S_g(t)}{P'(t_0)N} \right]^{1/t} - 1. \quad (8)$$

Отношение объемов геологических запасов к накопленной добыче $P(t)$ представляет собой коэффициент компенсации накопленной добычи $K_k(t)$, который может в этом случае определяться из выражения

$$K_k(t) = \frac{P'(t_0)(1 + \alpha)^t N}{P(t)} = \frac{P'(t_0)(1 + \alpha)^t N}{\sum_{t=1}^T P'(t) + P_0}. \quad (9)$$

Таким образом, используя формулы (1–9), можно определять, например, необходимый темп ввода запасов в освоение, сроки достижения максимальных объемов добычи золота, уровень воспроизводства запасов, обеспечивающий рост добываемых объемов с заданным темпом при необходимой обеспеченности запасами, и другие параметры, характеризующие различные сценарии развития золотодобывающей отрасли.

Обсуждение результатов

Рассмотрим сырьевую базу золота России. За начало прогнозного периода принят 2015 г. Данные о количестве фактически добытого золота за годы, предшествующие прогнозируемому периоду, и суммарных разведанных запасов взяты из государственного доклада «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации». Используются фактические данные по РФ с 1991 по 2015 г.

За 1991–2014 гг. в РФ добыто 4042 т золота. На 1.01.2015 государственным балансом учитываются

запасы категорий А, В, С₁ 8006 т, прогнозные ресурсы Р₁ 5237 т. Динамика добычи золота с 2004 по 2015 г. с достаточно высокой точностью ($R^2 = 0,913$) описывается моделью

$$P'(t) = \frac{48708157e^{0,107t}}{(12049 + 4042(e^{0,107t} - 1))^2},$$

где t – время в годах от начала прогнозного периода (2016 г.).

В соответствии с моделью (2) рост объемов добычи золота, начиная с текущего (2015 г.) 287 т в год, при неизменных запасах возможен примерно до 2022 г. Максимальный уровень добычи при этом составит 322 т. Чтобы обеспечить непрерывный рост добываемых объемов и после 2022 г. с темпом роста 1 % в год, сохранив при этом уровень обеспеченности запасами 20 лет, необходимо, чтобы в течение 10 лет прирост запасов составил не менее 533 т. Коэффициент компенсации при этом должен превышать единицу в течение не менее 8 лет, а в дальнейшем должен поддерживаться на уровне 0,9–0,7.

Правительством РФ была утверждена «Стратегия развития геологической отрасли России до 2030 г.» (далее – Стратегия), согласно которой необходимо обеспечить воспроизводство запасов золота следующими темпами: к 2015 г. – до 210 т, к 2020 г. – до 220 т и 2030 г. – до 250 т.

При сравнении полученных в результате моделирования объемов прироста запасов с аналогичными данными, заложенным в Стратегии, следует отметить, что предусмотренный уровень воспроизводства запасов несколько выше и позволит поддерживать рост объемов добычи золота в течение 10 лет, сохраняя при этом более высокую обеспеченность запасами (от 27 лет в начале прогноза до 20 лет к 2030 г.).

Если предположить, что достигнутые к настоящему времени темпы роста добычи золота (3 % в год) сохранятся и в будущем, то к 2022 г. в России будет добываться 350 т золота. Темпы воспроизводства запасов, предусмотренные Стратегией, позволят поддерживать такой рост только до 2020 г., не снижая при этом уровня обеспеченности запасами (26–27 лет). Далее, чтобы сохранить указанный темп роста и уровень обеспеченности запасами, потребуется прирост запасов больший, чем это предусмотрено в Стратегии.

В целом результаты моделирования показали, что темпы прироста запасов, заложенные в Стратегии, позволят поддерживать рост добываемых объемов золота, сохраняя при этом обеспеченность запасами на приемлемом уровне. Однако уже в 2015 г. объемы фактически разведанных запасов были меньше запланированных примерно на 160 т. Учитывая снижающуюся эффективность и уменьшение финансирования ГРП, отмечаемые в последнее время, можно полагать, что отклонение от запланированных объемов прироста запасов со временем будет нарастать.

Для рассмотренного варианта роста годовых объемов добычи золота в России были рассчитаны коэффициенты компенсации накопленной добычи. Уровень обеспеченности запасами при применении экспресс-метода был принят 20 лет.

На рис. 2 показан график изменения коэффициента компенсации во времени, из которого видно, что в последние 5–7 лет фактический коэффициент компенсации снизился почти в 2 раза. Это говорит о том, что накопленная добыча растет быстрее, чем геологические запасы. Как показали расчеты по экспресс-методу, чтобы годовая добыча с начальным значением 287 т в год (фактическое значение на 2015 г.) росла в течение 15 лет при обеспеченности запасами 20 лет, необходимо, чтобы коэффициент компенсации превышал 1 в течение 10 лет. Чтобы достичь показателей, предусмотренных в Стратегии, в ближайшие 10 лет необходимо поддерживать более высокие значения коэффициента компенсации накопленной добычи и обеспеченности запасами.

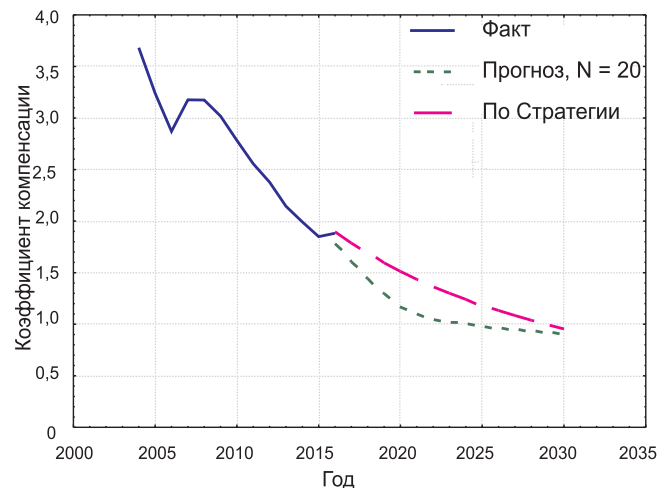


Рис. 2. Коэффициент компенсации накопленной добычи открываемыми запасами, обеспечивающий рост мощности с темпом 1,03 в год, по экспресс-методу ($N = 20$) и по Стратегии ($N = 20-27$)

Необходимо отметить, что приведенные результаты были получены в рамках указанных допущений о приемлемом уровне обеспеченности запасами и сроках непрерывного наращивания объемов добычи золота с заданным темпом роста. В действительности же кривая динамики добываемых объемов золота не имеет монотонно возрастающего характера. Однако важно понимать причины снижения объемов добычи. Производство золота, как и любого другого товара, подчиняется общим законам конъюнктуры и циклического развития. Добываемые объемы растут при увеличении рентабельности освоения месторождений. Происходит это, как правило, за счет вовлечения в разработку менее доступных запасов. В то же время уровень добычи золота может существенно снижаться при неблагоприятной рыночной конъюнктуре даже при высоком уровне обеспеченности запасами. Но такое снижение является стимулом для создания



и внедрения новых технологий, позволяющих снизить затраты на извлечение и переработку минерального сырья и в конечном итоге – к дальнейшему росту добываемых объемов. Другое дело, если падение объемов добычи вызвано дефицитом разведанных запасов. Это снижает стоимость золотодобывающих предприятий и может привести к их закрытию, ухудшает социально-экономическую обстановку в регионах. Поэтому такая ситуация крайне нежелательна.

Очевидно, что разработка долгосрочных прогнозов развития минерально-сырьевого комплекса достаточно трудоемка. Предлагаемый метод с использованием логистических зависимостей позволяет существенно ускорить этот процесс.

Выводы

1. Для описания динамики добычи золота в России предложена логистическая модель, связывающая объемы накопленной добычи с размером извлекаемых запасов и темпом роста накопленной добычи. В качестве исходных данных использовались сведения о размерах запасов золота, учитываемых Государственным балансом запасов полезных ископаемых РФ, а также о фактических объемах добычи золота в периоды, предшествующие началу прогнозного.

2. С использованием логистической модели выполнено исследование необходимых темпов воспроизводства запасов. При этом учитывалось современное состояние российской МСБ золота и прогнозных уровней объемов добычи.

Результаты моделирования показали, что разведанные к настоящему времени запасы обеспечат эксплуатацию сырьевой базы с сохранением достигнутых темпов роста годовой мощности (3 % в год) в течение примерно 6 лет. Далее, если не произойдет существенного увеличения запасов, начнется снижение годовых объемов добычи золота.

Установлено, что для сохранения достигнутых темпов роста объемов добычи золота на протяжении 15 лет и поддержания обеспеченности запасами на уровне не менее 20 лет необходимо, чтобы коэффициент компенсации в течение 10 лет превышал 1.

3. Полученные в результате моделирования оценки коэффициентов компенсации накопленной добычи открываемыми запасами сопоставлены с необходимыми темпами воспроизводства запасов золота, определенными в «Стратегии развития геологической отрасли России до 2030 г.». Установлено, что предусмотренные ею объемы прироста запасов позволяют поддерживать долгосрочный рост объемов добычи золота при заданной обеспеченности запасами, если темпы роста

не превышают 1 % в год. При необходимости обеспечения более высоких темпов роста добываемых объемов недостаточно темпов МСБ, запланированных в Стратегии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 17-06-00058.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Беневольский Б. И.** Эффективность использования распределенного фонда недр и обеспеченность его воспроизводства прогнозируемыми ресурсами золота // Руды и металлы. – 2000. – № 5. – С. 5–9.

2. **Мацко Н. А., Харитонов М. Ю.** Прогнозирование объемов добычи золота в России // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2016. – № 4(28). – С. 87–92.

3. **Михайлов Б. К., Беневольский Б. И., Вартанян С. С.** Основные задачи и направления воспроизводства минерально-сырьевой базы золота в России // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2006. – № 3. – С. 40–45.

4. **Орлов В. П.** Геологическое изучение недр: инерция или модернизация // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2012. – № 6. – С. 6–9.

5. **Проблемы** минерально-сырьевой базы золота России / Б. К. Михайлов, А. И. Иванов, С. С. Вартанян, Б. И. Беневольский // Руды и металлы. – 2015. – № 1. – С. 93–99.

REFERENCES

1. Benevolskiy B.I. [Efficiency of the use of a distributed subsoil fund and ensuring its replacement by the predicted gold resources]. *Rudy i metally*, 2000, no. 5, pp. 5–9. (In Russ.).

2. Matsko N.A., Kharitonova M. Yu. [Forecasting gold production in Russia]. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri – Geology and mineral resources of Siberia*, 2016, no. 4(28), pp. 87–92. (In Russ.).

3. Mikhaylov B.K., Benevol'skiy B.I., Vartanyan S.S. [Main tasks and directions of replacement of the mineral resource base of gold in Russia]. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie – Mineral Resources of Russia. Economics and Management*, 2006, no. 3, pp. 40–45. (In Russ.).

4. Orlov V.P. [Geological study of subsoil: inertia or modernization]. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie – Mineral Resources of Russia. Economics and Management*, 2012, no. 6, pp. 6–9. (In Russ.).

5. Mikhaylov B. K., Ivanov A.I., Vartanyan S.S., Benevolskiy B.I. [Problems of the mineral resource base of gold in Russia]. *Rudy i metally*, 2015, no. 1, pp. 93–99. (In Russ.).

© М. Ю. Харитонов, Н. А. Мацко, 2018