

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАБОТЫ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ВОДОРАСТВОРИМЫХ ОСНОВАНИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

В статье рассмотрены вопросы разработки работы системы мониторинга водорастворимых оснований гидротехнических сооружений на основе кондуктометрического метода контроля с применением специальных технических средств измерений. Представлена структура информационной системы мониторинга водорастворимых оснований гидротехнических сооружений. Выполнено математическое описание способа мониторинга на основе кондуктометрического метода контроля. Разработаны общий алгоритм работы информационной системы и алгоритм опроса кондуктометрических датчиков. Предложен адаптивный алгоритм опроса датчиков, позволяющий изменять период опроса в зависимости от уровня угрозы возникновения ЧС.

Ключевые слова: водорастворимое основание, информационная система, алгоритм, гидротехническое сооружение, кондуктометр, чрезвычайная ситуация.

Введение. Для совершенствования контроля за развитием процессов растворения и выноса пород в основаниях гидротехнических сооружений (ГТС) и заблаговременного предупреждения чрезвычайных ситуаций (ЧС), необходимо применение автоматизированной информационной системы мониторинга (ИС). ИС должна осуществлять сбор, обработку и анализ информации о состоянии водорастворимого основания в режиме реального времени [1].

Недостатком существующих методов и технических средств контроля за фильтрацией в основании ГТС является то, что в момент измерения расхода, скорости фильтрации, уровня воды или пробоотбора процесс размыва основания находится на стадии развития и проведение защитных мероприятий будет затруднительным [2].

В дополнение к вышеуказанному, для проведения комплекса мероприятий по определению состояния основания ГТС привлекаются специалисты, применяются ручной труд, переносные технические средства контроля, проводятся лабораторные исследования. Это не только увеличивает стоимость процедуры мониторинга, но и снижает оперативность обнаружения источника ЧС [3].

В рамках решения данной проблемы были проведены исследования по выбору оптимального метода контроля состояния водорастворимых оснований ГТС, поставлены эксперименты для изучения электрохимических и электрофизических свойств подземных вод [4] и определены рациональные параметры технических средств измерений (ТСИ) [5], на основе этого разработаны способ мониторинга состояния водорастворимых оснований ГТС [6], макеты ТСИ, а также требования к ИС. Подобный подход позволяет повысить эффектив-

ность контроля процессов разрушения основания ГТС [7].

Целевой установкой настоящего исследования является разработка алгоритма работы системы мониторинга водорастворимых оснований ГТС с учетом предложенных способов мониторинга и ТСИ.

Описание структуры системы мониторинга. Структура ИС мониторинга, реализованной на разработанной авторами ТСИ АСАМ-3, приведена на рис. 1. Принцип работы, математическое описание, блок-схема, основные технические характеристики макета ТСИ АСАМ-3 приведены в [5].

Количество датчиков, их тип и расположение определяются геологическим строением, гидрогеохимической и гидродинамической обстановкой в водорастворимом основании ГТС. Расположение датчиков в водах водохранилища и в наблюдательных скважинах после ГТС позволяет определить изменение концентрации веществ в воде после прохождения через основание, а также учитывать сезонное изменение общей минерализации воды [8, 9]. Установка датчиков на глубине обосновывается наличием нескольких водоупорных горизонтов или несогласного залегания пород [10].

Математическое описание способа мониторинга. Разработанная система мониторинга позволяет получить значение удельной электрической проводимости (УЭП) $\chi_{i,h}$ в заданной точке основания ГТС в любой момент времени. Информация с датчиков $K_{k,h}$, где $k = 1...n$, $h = 1...m$, установленных в пунктах измерений, по телеметрическим каналам через пункты первичной обработки данных (ППОД) поступает в центр приема, обработки и хранения информации и обеспечивает подачу предупредительных сигналов на пульт управления системой защиты ГТС.

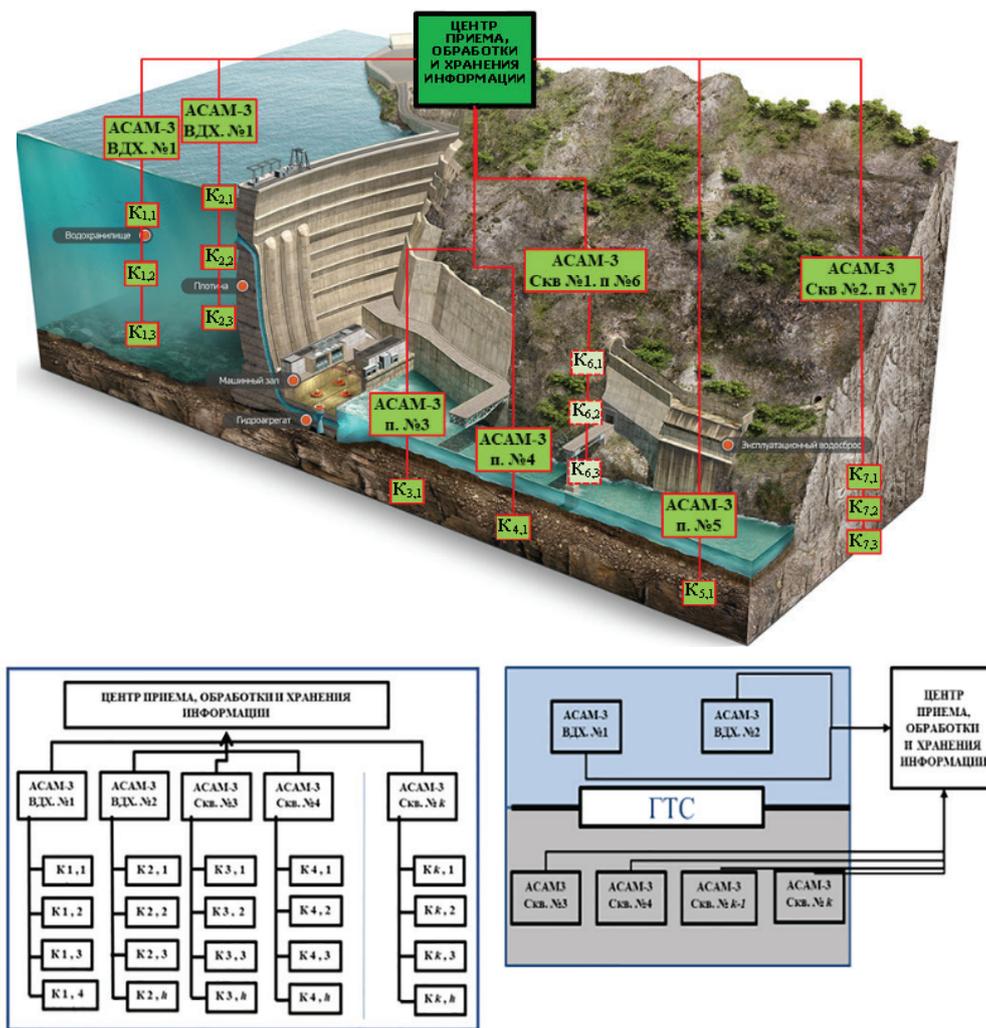


Рис. 1. Структура системы мониторинга водорастворимых оснований ГТС

Матрица данных с кондуктометрических датчиков $K_{k,h}$ имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \chi_{1,1} & \chi_{1,2} & \chi_{1,3} & \chi_{1,4} & \dots & \chi_{k,1} \\ \chi_{2,1} & \chi_{2,2} & \chi_{2,3} & \chi_{2,4} & \dots & \chi_{k,2} \\ \chi_{3,1} & \chi_{3,2} & \chi_{3,3} & \chi_{3,4} & \dots & \chi_{k,3} \\ \chi_{4,1} & \chi_{4,2} & \chi_{4,3} & \chi_{4,4} & \dots & \chi_{k,4} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \chi_{h,1} & \chi_{h,2} & \chi_{h,3} & \chi_{h,4} & \dots & \chi_{k,h} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Погрешность, возникающая при измерении УЭП $\chi_{i,h}$, приводит к необходимости назначения допустимых отклонений от критериальных значений. Допустимыми отклонениями могут быть: при определении минерализации рассола и напоров вблизи пласта соли равны $\pm 5\%$ и при определении общей минерализации приготовляемого опытного образца на растворном узле $\pm 3\%$ от измеряемой величины [11].

При обработке полученных данных, помимо особенностей фильтруемых вод и слагающих основание пород, необходимо учитывать термобарические условия точки измерения.

При увеличении температуры раствора повышается подвижность ионов и снижается вязкость воды, что приводит к повышению УЭП χ раствора. Использованное в структуре разработанного кондуктометра устройство для температурной компенсации приводит результат измерения к постоянной температуре

$$\chi_{k,h} = \frac{\chi_{k,h_{изм.}}}{1 + \alpha_t(t - 15)} \quad (2)$$

Как было установлено в результате экспериментов [4], УЭП χ и общая минерализация C прямо пропорциональны

$$C_{k,h} = \frac{\chi_{k,h} - b}{a} \quad (3)$$

где a и b — коэффициенты, учитывающие инженерно-геологические и гидрогеохимические особенности региона, определяемые лабораторным путем.

С учетом уравнения (3) матрица данных (1) примет вид:

$$\begin{bmatrix} C_{1,1} & C_{1,2} & C_{1,3} & C_{1,4} & \dots & C_{k,1} \\ C_{2,1} & C_{2,2} & C_{2,3} & C_{2,4} & \dots & C_{k,2} \\ C_{3,1} & C_{3,2} & C_{3,3} & C_{3,4} & \dots & C_{k,3} \\ C_{4,1} & C_{4,2} & C_{4,3} & C_{4,4} & \dots & C_{k,4} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{h,1} & C_{h,2} & C_{h,3} & C_{h,4} & \dots & C_{k,h} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Полученные данные являются основой для качественной и количественной характеристик угрозы возникновения ЧС в основании ГТС.

В ходе исследований по совершенствованию систем мониторинга авторами было предложено ввести понятие коэффициента риска размыва пород основания, описываемого уравнением

Таблица 1

Качественный показатель уровня риска
размыва пород в основании

Значение	Уровень риска
$ \theta < 0,3$	Низкий
$0,3 < \theta < 0,7$	Средний
$0,7 < \theta < 1$	Высокий
$ \theta \approx 1; v_{\text{фильтрации}} \uparrow$	Критический

$$\theta = 1 - \frac{C_{\max} - C_{k,h}}{C_{\max} - C_{\text{норм}}} \quad (5)$$

Таким образом, $\theta \in (-1; 1)$. Если:

$\theta \in (-1; 0)$ — наблюдается приток подземных вод с минерализацией менее нормального значения для данной территории и глубины залегания;

$\theta \in (0; 1)$ — наблюдается повышение минерализации вод, что говорит о развитии процессов вымывания на самых ранних стадиях.

Согласно действующим нормативным документам, уровни риска размыва основания были ранжированы следующим способом (табл. 1).

Подобное ранжирование позволяет использовать предложенный коэффициент при прогнозировании ЧС [12].

Для массива данных k с учетом уравнений (3) и (4) получим значения коэффициента риска размыва пород основания для каждой точки измерения:

$$\begin{bmatrix} \theta_{1,1} \theta_{2,1} \theta_{3,1} \theta_{4,1} \dots \theta_{k,1} \\ \theta_{1,2} \theta_{2,2} \theta_{3,2} \theta_{4,2} \dots \theta_{k,2} \\ \theta_{1,3} \theta_{2,3} \theta_{3,3} \theta_{4,3} \dots \theta_{k,3} \\ \theta_{1,4} \theta_{2,4} \theta_{3,4} \theta_{4,4} \dots \theta_{k,4} \end{bmatrix} \quad (6)$$

На основе полученных данных определяют количественные критерии возникновения ЧС.

Массу вынесенных пород получим по формуле

$$m = \frac{\chi_{kx} - \chi_{\text{норм}}}{a} k_{\phi} S_h l t, \quad (7)$$

где k_{ϕ} — коэффициент фильтрации; l — гидравлический градиент.

Объем образующихся пустот $\Delta V_{\text{пустот}}$ в основании ГТС в течение времени t равен объему породы, вынесенной в течение того времени.

$$\Delta V_{\text{пустот}} = \frac{m}{\rho} = \frac{(\chi_{kx} - \chi_{\text{норм}})}{a\rho} k_{\phi} S_h l t, \quad (8)$$

где ρ — плотность породы.

Время $t_{\text{крит}}$ в течение которого объем пустот в основании ГТС достигнет критических значений $V_{\text{пустот}} = V_{\text{крит.пустот}}$ получим как корень уравнения

$$V_{\text{крит.пустот}} - V_{0\text{пустот}} = \frac{(\chi_{kx} - \chi_{\text{норм}}) k_{\phi} S_h l t_{\text{крит}}}{a\rho}, \quad (9)$$

$$t_{\text{крит}} = \frac{(V_{\text{крит.пустот}} - V_{0\text{пустот}}) a\rho}{(\chi_{kx} - \chi_{\text{норм}}) k_{\phi} S_h l}. \quad (10)$$

Таким образом, предложенная система мониторинга позволяет в режиме реального времени оценить состояние основания ГТС.

Разработка алгоритма работы информационной системы. Учитывая структуру ИС и математический аппарат реализуемого способа мониторинга, следует отметить, что устройство управления аналогового интерфейса ИС объединено с цифровой системой управления. Поэтому процесс опроса датчиков и процесс обработки информации являются неразделимыми. Таким образом, эти алгоритмы реализуются как один поток команд, в котором в определенный момент времени включаются команды опроса конкретного датчика.

Алгоритм обработки информации представлен на рис. 3. Алгоритм работы включает в себя такие

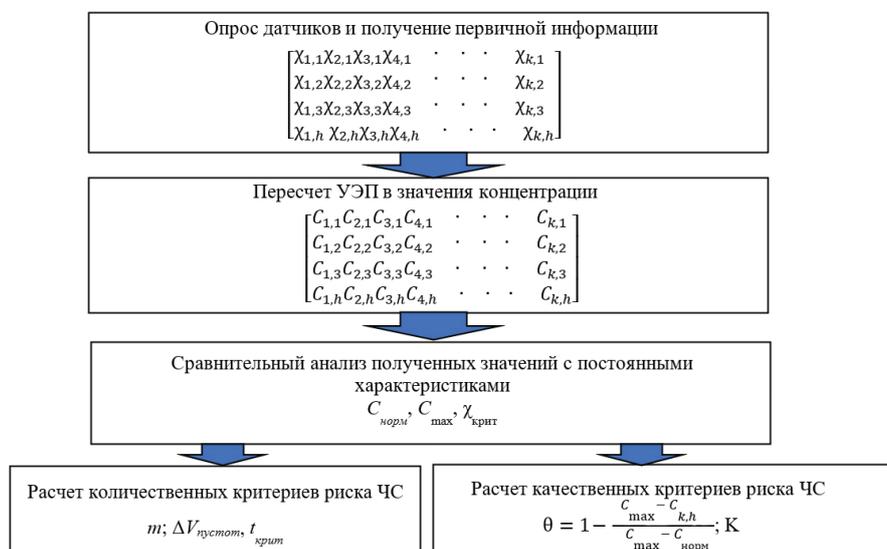


Рис. 2. Обобщенная схема работы ИС

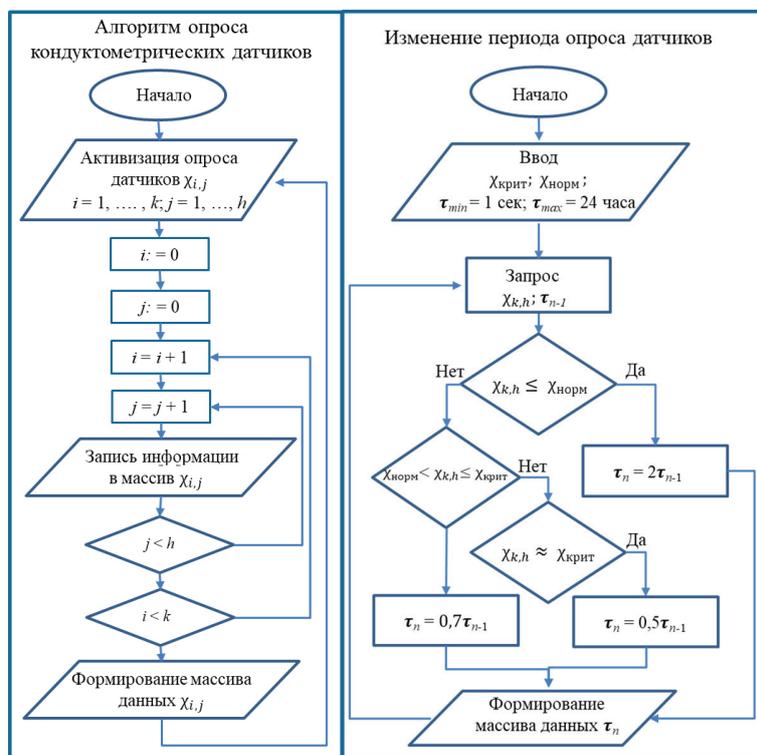


Рис. 3. Адаптивный алгоритм опроса датчиков ИС

Таблица 2

Изменение периода опроса датчиков в зависимости от состояния среды

№	Значения УЭП	Значения $ \theta $	Период опроса датчиков
1	$\chi_{k,h} \leq \chi_{норм}$	$ \theta < 0,3$	$\tau_n = 2\tau_{n-1}$
2	$\chi_{норм} < \chi_{k,h} \leq \chi_{крит}$	$0,3 < \theta < 1$	$\tau_n = 0,7\tau_{n-1}$
3	$\chi_{k,h} \approx \chi_{крит}$	$ \theta \approx 1$	$\tau_n = 0,5\tau_{n-1}$

этапы, как «Опрос датчиков и получение первичной информации», «Пересчет УЭП в значения концентрации», «Сравнительный анализ полученных значений с постоянными характеристиками ($C_{норм}$, $C_{макс}$, $\chi_{крит}$)», «Расчет качественных критериев риска ЧС (θ , К)» Расчет количественных критериев риска ЧС (m ; $\Delta V_{пустот}$; $t_{крит}$)».

Обобщенная схема работы ИС приведена на рис. 2. Циклический опрос датчиков упрощает процедуру обработки информации от датчиков. Поэтому циклический опрос применяется даже при большом отличии частот дискретизации сигналов датчиков аналогового интерфейса. При этом разница в полученных данных может достигать десятков и сотен раз. Такие ситуации возможны в цифровых и аналоговых системах мониторинга.

Аналоговый сигнал с датчиков поступает циклически. Частота получения первичной информации зависит от характеристик ТСИ. Разработанный авторами макет кондуктометра АСАМ-3 позволяет получить данные с интервалом один раз в 2 мс.

Проведенные исследования показали, что при измерениях УЭП количество измерений для получения

достоверных данных должно быть не менее пяти. В связи с этим, минимальное время получения первичной информации составляет 10 мс.

Для уменьшения объемов избыточной первичной информации предложен адаптивный алгоритм опроса датчиков, реализуемый программно (рис. 3). В зависимости от значения $|\theta|$ предлагается период опроса датчиков изменять в диапазоне от 1 секунды до 12 часов.

Если риск размыва пород основания низкий и показатели УЭП подземных вод близки к среднесезонным, то период опроса датчиков увеличивается. Если показатели УЭП подземных вод близки к критическим, то период опроса датчиков уменьшается. Это позволяет получить более детальную информацию о развитии разрушительных суффозионных процессов и заблаговременно предупредить о возникновении ЧС.

Закключение. Таким образом, на основе предложенных структуры ИС и способа мониторинга разработанный адаптивный алгоритм работы ИС, позволяющий автоматически регулировать время опроса датчиков в зависимости от изменения контролируемой среды (табл. 2).

Эффективность разработанного алгоритма работы ИС заключается в том, что при состоянии среды, близкой к среднесезонному для данного региона, период опроса датчиков увеличивается, что уменьшает объем избыточной информации; и наоборот, если показатели УЭП близки к критическим, то период опроса датчиков уменьшается, что позволяет более детально изучить влияние разрушительных суффозионных процессов на водорастворимое основание ГТС.

Использование ИС, основанной на кондуктометрическом методе контроля среды, с применением специальных ТСИ, параметры которых оптимизированы под конкретные условия функционирования ГТС, позволит получать информацию об измене-

ниях в водорастворимом основании ГТС в режиме реального времени.

Такая организация мониторинга водорастворимых оснований ГТС даёт возможность осуществлять комплексный анализ накопленных данных и проводить перспективное планирование защитных мероприятий, направленных на сохранение заданного режима эксплуатации ГТС.

Библиографический список

1. Abdrazakov F. K., Orlova S. S., Pankova T. A. [et al.]. The monitoring of condition of hydraulic structures // Journal of advanced research in dynamical and control systems. 2018. Vol. 10, no. 13. P. 1952–1958.
2. Пономарев А. И. О некотором подходе к формированию тематики перспективных научных исследований в интересах гражданской обороны и ликвидации чрезвычайных ситуаций различного характера // Комплексные проблемы техносферной безопасности: сб. ст. XV Междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 236–240.
3. Satoa M., Kuwanob R. Suffusion and clogging by one-dimensional seepage Tests on cohesive soil // Soils and Foundations. 2015. Vol. 55, Issue 6. P. 1427–1440.
4. Нурмагомедов Т. Н., Сианисян Э. С. Электрохимический метод контроля растворения и выноса гипса в основаниях гидротехнических сооружений // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2019. № 2. С. 60–66. DOI: 10.23683/0321-3005-2019-2-60-65.
5. Нурмагомедов Т. Н., Латышенко К. П., Дружинин В. П., Смирнов Б. П. Обоснование параметров технического средства контроля за карстово-суффозионными процессами в основании гидротехнического сооружения / Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2020. № 1 (44). С. 39–48.
6. Нурмагомедов Т. Н., Латышенко К. П., Батырев В. В., Смирнов Б. П. Обоснование выбора оптимального метода контроля разрушения водорастворимого основания гидротехнического сооружения // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2020. № 2 (45). С. 63–74.
7. Латышенко К. П. Информационно-измерительная система контроля окружающей среды // Общонаучные проблемы инженерной подготовки кадров МЧС РФ: сб. тр. XXIX Междунар. науч.-практ. конф. 2019. С. 83–86.
8. Mohammad R. B., Amirhossein M. Evaluation of Earth Dam Leakage Considering the Uncertainty in Soil Hydraulic Parameters // Civil Engineering Journal. 2019. Vol. 5, no. 7. P. 1543–1556. DOI: 10.28991/cej-2019-03091351.
9. Jamel Asmaa Abdul Jabbar. Analysis and Estimation of Seepage through Homogenous Earth Dam without Filter // Diyala Journal of Engineering Sciences. 2019. Vol. 9, no. 2. P. 38–49.
10. Zainudinov S. Z., Paliivets M. S., Zainudinov B. S. Information flows in hydraulic structures // International journal of emerging trends in engineering research. 2020. Vol. 8, no. 5. P. 1605–1609. DOI: 10.30534/ijeter/2020/21852020.
11. Орехов В. В., Хохотова С. Н., Алексеев Г. В. Математическое моделирование изменения гидрогеологического режима территории в результате строительства подземного комплекса // Вестник МГСУ. 2016. № 4. С. 52–61.
12. Юркин М. А., Семенов Е. С., Латышенко К. П. Предупреждение чрезвычайных ситуаций с применением современных информационных технологий // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2019. № 1 (40). С. 40–45.

ЛАТЫШЕНКО Константин Павлович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры механики и инженерной графики.
SPIN-код: 1878-3258
AuthorID (РИНЦ): 538521
НУРМАГОМЕДОВ Тимур Низамудинович, преподаватель кафедры механики и инженерной графики.
SPIN-код: 5874-3278
AuthorID (РИНЦ): 858711
Адрес для переписки: Nurmagomedov.timur@mail.ru

Для цитирования

Латышенко К. П., Нурмагомедов Т. Н. Разработка алгоритма работы системы мониторинга водорастворимых оснований гидротехнических сооружений // Омский научный вестник. 2020. № 5 (173). С. 84–88. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-173-84-88.

Статья поступила в редакцию 11.09.2020 г.
© К. П. Латышенко, Т. Н. Нурмагомедов